

УДК 691:699.844

К.А. Шашкеев¹, Е.М. Шульдешов¹, О.В. Попков¹, И.Д. Краев¹, Г.Ю. Юрков²**ПОРИСТЫЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6

Описаны структурные особенности пористых материалов, представлены различия между волокнистыми, ячеистыми и зернистыми структурами.

Проведен сравнительный анализ различных пористых звукопоглощающих материалов на основе коэффициентов звукопоглощения при частотах 250, 500, 1000 и 2000 Гц, а также их средней величины. Описана зависимость звукопоглощающих свойств материала от его толщины при различных частотах. Показано влияние сквозной макропористости на акустические свойства изделия.

Наилучшими звукопоглощающими свойствами на частотах 250, 500, 1000 и 2000 Гц (рассмотрены в данной статье) обладают волокнистые материалы, в частности нетканые волокна из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и стекловаты.

Представленные в работе данные могут быть использованы для сравнительной оценки звукопоглощающих материалов в области частот 250–2000 Гц.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: звукопоглощающие материалы, пористые структуры, сравнительный анализ.

This paper discusses a difference between fibrous, cellular and grained sound-absorbing materials on structure and properties.

A comparative analysis of different porous sound-absorbing materials based on their performance at 250, 500, 1000 and 2000 Hz is provided. The effect of the thickness of material on its sound absorption at different frequencies is discussed. The through macroporosity was found to affect the acoustic properties of material.

Fibrous materials, including nonwoven fabrics made of PET or glass wool, were found to have the best sound absorbing properties at 250, 500, 1000 and 2000 Hz.

The data provided in this paper can be used for a comparative evaluation of sound absorbing materials in frequency range from 250 to 2000 Hz.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 15.3. «Materials and coatings for protection against EME, shock, vibration, acoustic and electric influences» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: sound-absorbing materials, porous structures, comparative analysis.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Фонд перспективных исследований [Advanced Research Foundation] E-mail: fpi@fpi.gov.ru

Введение

Создание шестого технологического уклада неразрывно связано с влиянием на окружающую среду [1–4]. Повышенный уровень шума по праву называют «чумой XXI

века». Окружая человека практически во всех областях жизнедеятельности, акустический шум оказывает постоянное негативное влияние на здоровье человека. Шум представляет собой беспорядочные акустические колебания, характеризующиеся сложной стохастической временной и спектральной структурой [5, 6].

Можно выделить два основных способа снижения уровня шума:

- снижение шума в источнике – к данной категории относят оптимизацию конструкции, компоновки или процессов эксплуатации того или иного изделия, что не всегда возможно без ухудшения эксплуатационных характеристик;

- снижение шума на пути распространения от источника шума до человека – к данной группе можно отнести применение звукопоглощающих и звукоизолирующих материалов и конструкций, а также акустическое проектирование помещений, районов и т. д.

Цель данной работы – обзор литературных данных по пористым звукопоглощающим материалам.

Звукопоглощающие материалы

Существуют активные и пассивные звукопоглощающие системы [7]. Активные системы характеризуются использованием внешнего источника энергии для уменьшения уровня звука. В случае пассивных систем ослабление звука происходит без использования дополнительной энергии, благодаря внутренним характеристикам материала. Пассивные системы могут быть разделены на мембранные, резонансные и пористые. На рис. 1 представлены типичные зависимости коэффициента поглощения от частоты для данных систем.

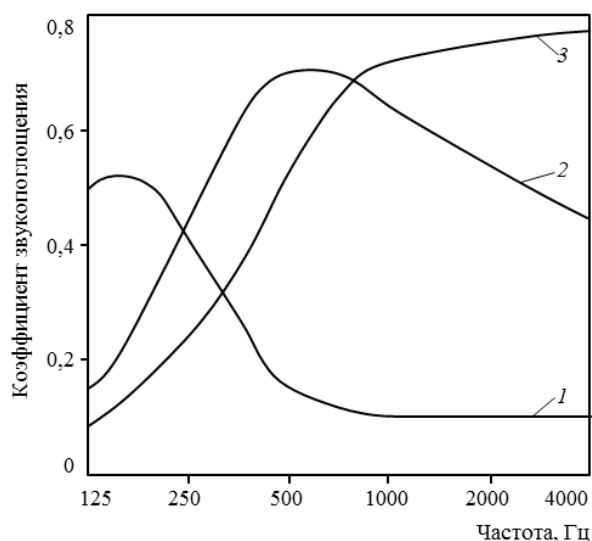


Рис. 1. Типичные зависимости коэффициента поглощения от частоты для мембранных (1), резонансных (2) и пористых (3) звукопоглощающих материалов [7]

Мембранные звукопоглощающие системы представляют собой непористые листы или панели, расположенные на определенном расстоянии от глухой стенки. К преимуществам данных конструкций можно отнести высокую стойкость к воздействию климатических факторов. Основным недостатком данного типа поглотителей является небольшой диапазон эффективного поглощения, как правило, не превышающий двух октав.

Резонансные системы – это системы, основанные на резонаторах, одним из способов формирования которых является использование перфорированных листов с расположенными за ними глухими стенками, в ряде случаев разделенными на ячейки – для снижения перемещения акустической волны вдоль конструкции. Основным

отличием таких систем от мембранных является наличие перфорирования в листах, обеспечивающее возможность резонанса при определенных частотах.

Наиболее универсальными и широко применимыми являются системы на основе пористых звукопоглощающих материалов [8, 9]. Они представляют собой твердые вещества с большим количеством пор и каналов. На рис. 2. представлено схематическое изображение пористого материала. В таких материалах присутствуют открытые, закрытые, глухие и сквозные поры, внутренние каналы. Поры влияют на такие характеристики материала, как плотность, механическая прочность, теплопроводность. Закрытые поры в случае жестких стенок менее эффективны для звукопоглощения, чем открытые. Следует также разделять пористость и шероховатость поверхности: неровность считается порой при условии, что ее диаметр меньше ее глубины [8].



Рис. 2. Схематичное изображение твердого пористого материала [8]

Наличие открытой пористости позволяет звуковой волне легче проникать в материал и, распространяясь внутри образца, терять свою энергию на внутренних стенках. Поглощение, вызываемое вязкостью среды, происходит в результате наличия градиента скоростей воздуха вблизи стенок материала. Силы вязкости, вызывающие поглощение звуковой волны, пропорциональны градиенту скорости, а рассеиваемая акустическая мощность, которая определяет поглощенную в единицу времени энергию, также пропорциональна градиенту скорости [10]. При низких частотах основной вклад в поглощение вносит вязкое поглощение на стенках. Однако с ростом частоты вклад вязких потерь в среде, пропорциональный волновому числу, растет. Вклад потерь от теплопроводности, возникающий вследствие неадиабатических температурных изменений при распространении звуковой волны, сопоставим с потерями от вязкости среды.

Среди пористых звукопоглощающих материалов можно выделить три основные группы: ячеистые, волокнистые и зернистые [8]. На рис. 3 представлены три основных типа пористых звукопоглощающих материалов, соответствующие микрофотографии, и физические модели, используемые для описания их звукопоглощающих свойств. Волокнистые материалы, как правило, представлены группами волокон, расположенных в продольном, поперечном и вертикальном направлении (например, базальтовая или минеральная вата). В состав зернистых материалов, как правило, входит шарообразный наполнитель с кубической или гексагональной укладкой (например, материалы на основе перлита, вермикулита, гранул вспененного стекла). Ячеистая структура материала представляет собой поры чаще всего сферической формы, разделенные межпоровыми перегородками (открыто- и закрытопористые пенопласты, ячеистый бетон и т. д.). Во всех перечисленных видах материалов звукопоглощающие свойства прежде всего зависят от вида пор на поверхности материала и характера пористости внутри.

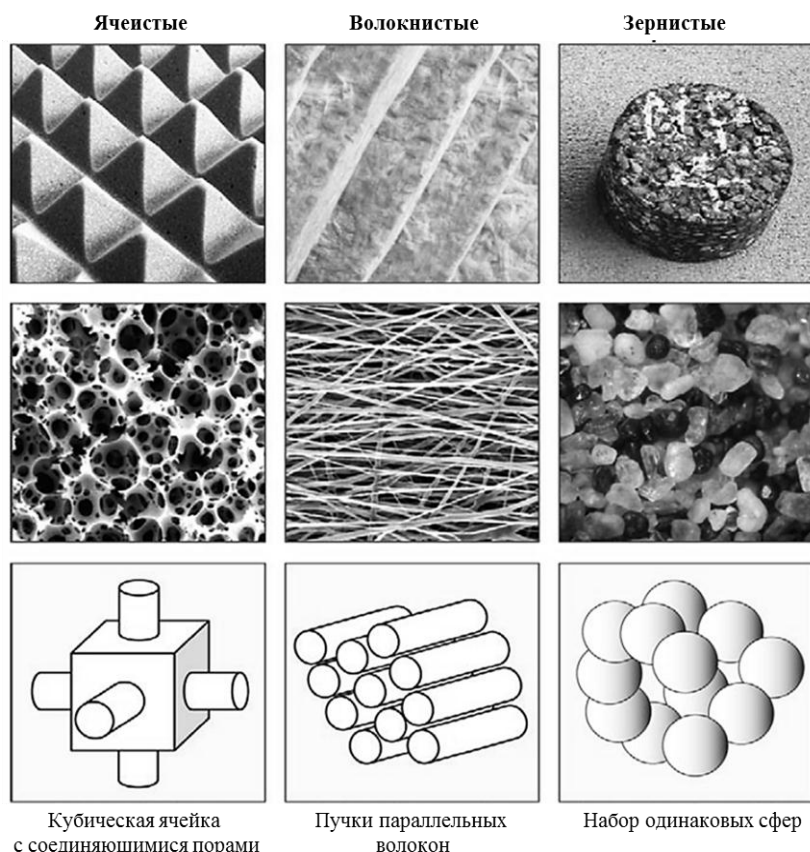


Рис. 3. Три основных типа пористых звукопоглощающих материалов и физические модели, используемые для описания их звукопоглощающих свойств [8]

Из теоритических работ известно, что материалы с высокими звукопоглощающими свойствами в широком интервале частот должны обладать полидисперсной пористостью [11, 12]. При этом величина сквозной пористости находится в пределах 70–90%. Более высокий процент сообщающейся пористости снижает эффективность звукопоглощения вследствие уменьшения вязкого трения воздуха в материале. Для волокнистых структур при низких частот эффективными являются материалы с размером пор 350–400 мкм, для высоких частот: 20–50 мкм.

Ограничение верхнего размера пор связано с тем, что увеличение их размера вызывает снижение диссипации акустической энергии по вязкостному механизму, поэтому, независимо от вида материала, максимальные значения коэффициента звукопоглощения при увеличении размера пор уменьшаются.

Пористые звукопоглощающие материалы

С целью сравнения эффективности различных звукопоглощающих матриц проведен анализ научно-технических литературных данных по звукопоглощающим материалам путем сопоставления коэффициентов звукопоглощения при различной толщине материалов. Коэффициент звукопоглощения (КЗП) материала определяется отношением поглощенной энергии звуковой волны к энергии, падающей на поверхность этого материала. В табл. 1 представлены данные по пористым звукопоглощающим материалам, найденным в литературных источниках. Приведены (при наличии в литературном источнике) данные по пористости и сопротивлению образцов воздушному потоку. В работах, рассмотренных в данном обзоре, как правило, представлена графическая информация частотной зависимости коэффициента звукопоглощения. Для возможности сравнения звукопоглощающих характеристик большого количества материалов из приведенных в работах графических данных определялись значения

коэффициентов звукопоглощения при четырех частотах: 250, 500, 1000 и 2000 Гц. Эффективный КЗП рассчитывали как среднее значение при четырех частотах. Зависимости коэффициентов звукопоглощения от толщины образца приведены на рис. 4.

Таблица 1

Характеристики пористых звукопоглощающих материалов

Тип матрицы	Литературный источник	Материал	Условный номер образца	Толщина материала, мм	Пористость, %	Сопротивление воздушному потоку $R \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$	Эффективный КЗП
Ячеистый	[13]	Алюминиевая губка	1	10	57	—	0,23
	[13]	Алюминиевая губка	2	20	57	—	0,44
	[14]	Медная губка	3	20	49	—	0,28
	[15]	Вспененный полиуретан марки «Акустицелл»	4	24	95	22	0,54
	[16]	Вспененный полиуретан	5	25	—	—	0,42
	[17]	Пластиковая губка марки «Трамико»	6	30	96	6	0,37
	[18]	Пеностекло	7	30	—	—	0,34
	[18]	Вспененный полиуретан	8	30	—	—	0,5
	[18]	Мочевинформальдегидный пенопласт	9	30	—	—	0,49
	[19]	Переработанный вспененный полиуретан	10	31	90	32,3	0,63
	[20]	Алюминиевая губка	11	40	66	—	0,6
	[21]	Пластик (без уточнения)	12	51,44	98	10,8	0,66
Волокнистый	[22]	Перфорированная пластина с полиэфирной тканью	13	8	—	—	0,29
	[23]	Полиэфирные волокна	14	11	—	45	0,16
	[24]	Волокна из полиэфира, шерсти и хлопка	15	14,8	—	—	0,6
	[25]	Стекловата	16	15	95	—	0,17
	[21]	Волокнистый материал (без уточнения)	17	18,5	99	14,6	0,25
	[26]	Полиэфирные и полипропиленовые волокна	18	20	—	—	0,27
	[26]	Волокна из чайного листа с хлопчатобумажной тканью	19	20	—	—	0,31
	[24]	Джутовые волокна	20	22,6	—	—	0,62
	[15]	Минеральная вата марки «Акустек»	21	24,4	95	29	0,48
	[17]	Стекловата марки «Сант-Гобэн»	22	25	98	40	0,46
	[25]	Стекловата	23	25	95	—	0,35
	[27]	Целлюлозные волокна	24	25	98	3,5	0,44
	[28]	Волокна из нержавеющей стали	25	25,7	81	98	0,57
	[29]	Полиэтилентерефталатные волокна	26	30	—	—	0,59
	[18]	Асбестовые волокна	27	30	—	—	0,46
	[18]	Войлок из битумной минеральной ваты	28	30	—	—	0,54
	[18]	Древесно-волоконная плита	29	30	—	—	0,42
	[15]	Полиэфирные волокна марки «Акустифайбер»	30	39	95	2	0,26
	[20]	Стекловата	31	40	—	—	0,73
	[29]	Полиэтилентерефталатные волокна	32	50	—	—	0,83
	[30]	Льняные волокна	33	50	—	—	0,59
	[28]	Волокна из нержавеющей стали	34	50	91	40	0,67
	[31]	Древесные волокна	35	50	85	—	0,67
	[27]	Целлюлозные волокна	36	50	98	—	0,6
	[32]	Базальтовая вата без перфорации	37	57,5	94	135	0,5
	[32]	Базальтовая вата с перфорацией	38	57,5	—	—	0,7

Продолжение

Тип матрицы	Литературный источник	Материал	Условный номер образца	Толщина материала, мм	Пористость, %	Сопротивление воздушному потоку $R \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^4$	Эффективный КЗП
Волокнистый	[33]	Волокнистый материал на основе системы полимер/металл/полимер с низкой точкой плавления (биндер)	39	60	—	—	0,73
	[34]	Полиэфирные волокна	40	65,1	—	—	0,57
	[28]	Волокна из нержавеющей стали	41	75	Град.*	—	0,78
	[31]	Древесные волокна	42	75	90	—	0,79
	[27]	Целлюлозные волокна	43	75	98	—	0,8
	[27]	Целлюлозные волокна	44	100	98	—	0,78
Зернистый	[25]	Цеолит	45	15	71	61,2	0,34
	[35]	Полые микросферы (муллит, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, кварц) и фосфатный неорганический адгезив	46	20	75	150	0,44
	[36]	Стальной шлак и пепел	47	25	50	—	0,42
	[25]	Цеолит	48	25	69	62	0,42
	[18]	Стальной шлак и пепел	49	30	48	—	0,52
	[18]	Перлитовый цемент	50	30	—	—	0,46
	[18]	Глинистая акустическая плитка	51	30	—	—	0,43
	[18]	Пеногипс	52	30	—	—	0,48
	[37]	Неорганический материал на основе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$	53	50	55	23	0,52
	[38]	Метакаолин (70%) и порошок доменного шлака (30%)	54	60	—	—	0,68

* Град. – градиентная структура.

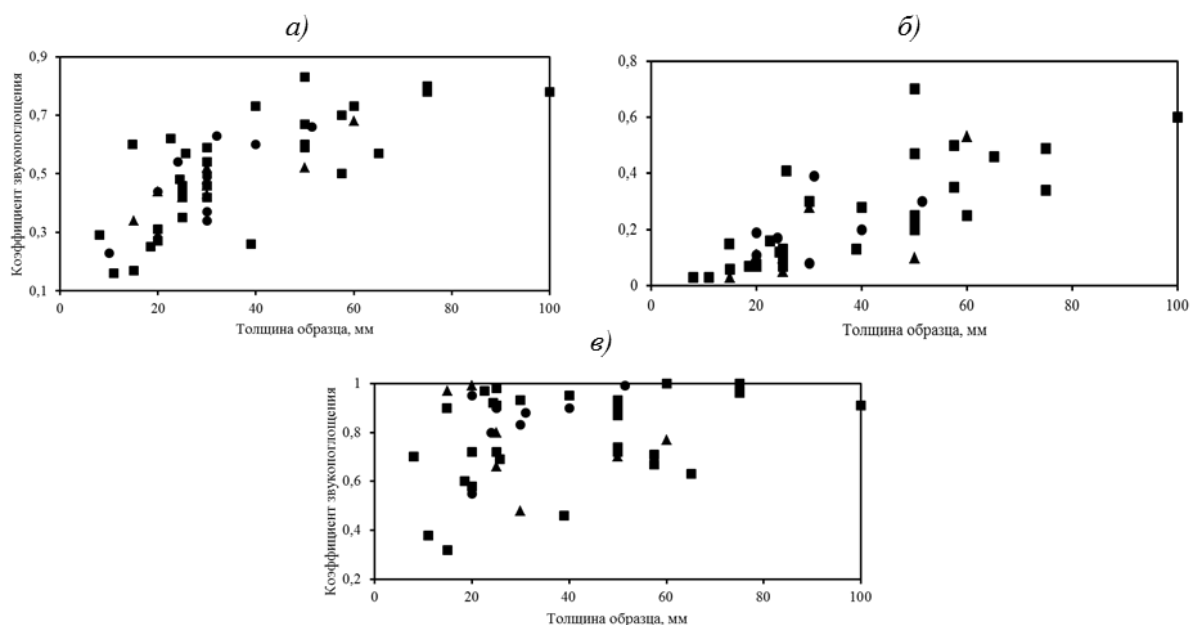


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента звукопоглощения (а) и коэффициентов звукопоглощения при частоте 250 Гц (б) и 2000 Гц (в) от толщины образца с типом матрицы ячеистым (●), волокнистым (■) и зернистым (▲)

Рассмотренные материалы разделены на три типа: зернистые, волокнистые и ячеистые (табл. 1). На рис. 4, а представлена зависимость величины КЗП от толщины образца.

Наилучшие звукопоглощающие свойства показали волокнистые материалы. Так, в работе [24] авторы исследовали волокнистые материалы на основе волокон из полиэфира, шерсти и хлопка. Толщина одного слоя материала составила 3,7 мм. В табл. 1 (образец 15) представлены данные для образца, состоящего из четырех слоев. Высокие звукопоглощающие свойства при толщине 22,6 мм представлены также авторами работы [24] для джутового волокна, состоящего из четырех слоев.

Лучшие звукопоглощающие свойства получены авторами работы [20] на образцах стекловаты при толщине 40 мм. В данной работе образцы на основе алюминиевой губки показали несколько худшие характеристики, чем образцы из стекловаты:

Материал	Коэффициент звукопоглощения
Алюминиевая губка	0,6
Стекловата	0,73

Однако образцы на основе алюминия не являются вредными для здоровья человека, в отличие от образцов из стекловаты: они не поглощают влагу, могут нести физические нагрузки, а также использоваться при более высоких температурах эксплуатации.

Для толщины материала 50 мм лучшие характеристики наблюдались для волокнистых нетканых образцов на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [29]. Образцы представляют собой многослойные системы, термически скрепленные при продувке горячим воздухом. При толщине 30 мм эти образцы также показывают наилучшие звукопоглощающие свойства. Таким образом, образцы на основе ПЭТФ являются прекрасной альтернативой образцам на основе стекловаты и минеральной акустической ваты.

Наибольшие проблемы при создании пористых звукопоглощающих материалов возникают на низких частотах. На рис. 4, б представлены данные по звукопоглощению на частоте 250 Гц. При сравнении значений коэффициента звукопоглощения, представленных на рис. 4, б, в, видно, что толщина образца влияет на звукопоглощающие свойства материала в большей степени при низких частотах, чем при высоких. Так, при частоте 2000 Гц поглощение в интервале значений 0,9–1 может быть получено уже при толщине образца ~20 мм. Однако для частоты 250 Гц увеличение значений происходит по мере роста толщины образцов во всем рассматриваемом диапазоне (КЗП от 0 до 100 мм).

Наибольшее значение КЗП при частоте 250 Гц получено авторами работы [29] на нетканых образцах из ПЭТФ (образец 32, КЗП при частоте 250 Гц составляет 0,7 при толщине 50 мм). В данной работе [29] показано, что увеличение содержания ультратонких волокон в образце улучшает поглощающие свойства в области низких частот.

Относительно высокие значения поглощения при низкой частоте получены авторами работы [28] для волокнистого образца из нержавеющей стали (образец 25) – коэффициент звукопоглощения при частоте 250 Гц составляет 0,41 при толщине 25,7 мм.

Взаимосвязь звукопоглощающих свойств при низких и средних частотах и пористости образцов представлена в работе [19]. На основе образцов из вспененного полиуретана показано, что с увеличением плотности образца улучшаются поглощающие свойства при низких частотах, но ухудшаются при более высоких (1000–2000 Гц). Авторы работы [28] на волокнистых образцах из нержавеющей стали также указывают на улучшение поглощающих свойств при низких частотах с увеличением плотности материала. Следует отметить, что зависимость поглощающих свойств от пористости

материала имеет экстремальный характер, поскольку, с одной стороны, с увеличением плотности увеличивается сопротивляемость воздушному потоку, способствующая улучшению звукопоглощающих характеристик образца, а с другой – высокая плотность образца приводит к усилению отражения звуковой волны от поверхности материала.

В работе [32] представлены данные по улучшению звукопоглощающих свойств методом перфорирования пористых образцов на основе базальтовой ваты (рис. 5). Благодаря наличию сквозной микропористости удалось улучшить поглощающие свойства во всем исследуемом диапазоне частот. При этом исходный образец обладал относительно слабыми звукопоглощающими свойствами.

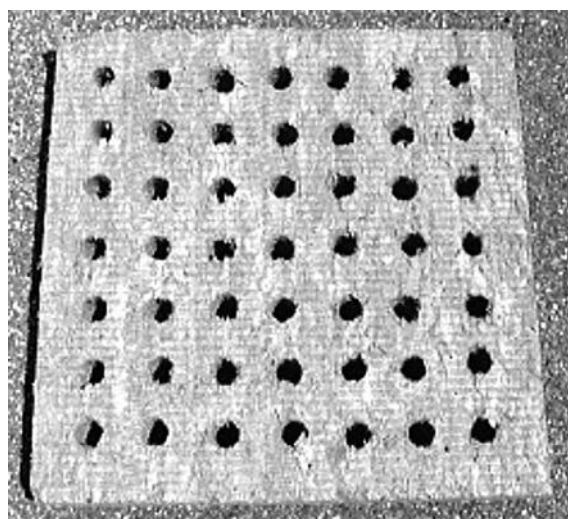


Рис. 5. Пример материала с двойной пористостью – перфорированная базальтовая вата [32]

Среди неволокнистых типов матриц следует выделить вспененный полиуретан [15, 16, 18, 19]. Материалы на его основе обладают высокими звукопоглощающими свойствами. Технология его получения также позволяет использовать его с наполнителями, такими как перлит, вермикулит и другие.

Рассмотренные в данной работе типы матриц представлены в табл. 2.

Таблица 2

Матрицы звукопоглощающих материалов

Тип матрицы	Примеры материалов	Материалы, показавшие наилучшие звукопоглощающие свойства
Волокнистый	<i>Минеральные:</i> волокна из асбеста, стекловата, войлок из битумной минеральной ваты, базальтовая вата. <i>Синтетические:</i> волокна из полиэфира, полипропилена, полиэтилентерефталата (ПЭТФ). <i>Природные:</i> волокна из шерсти, хлопка, чайного листа, джута, древесины, льна, целлюлозы. <i>Металлические:</i> волокна из нержавеющей стали. <i>Гибридные:</i> на основе полимерных, металлических и керамических материалов	Стекловата, нетканый материал из ПЭТФ
Ячеистый	Вспененный полиуретан, алюминиевая или медная губка, пеностекло, мочевиноформальдегидный пенопласт	Вспененный полиуретан
Зернистый	Цеолит, полые микросферы (муллит, α - Al_2O_3 , кварц) и фосфатный неорганический адгезив, стальной шлак и пепел, перлитовый цемент, глинистая акустическая плитка, пеногипс, неорганический материал на основе Al_2O_3 - SiO_2	Полые микросферы (муллит, α - Al_2O_3 , кварц) и фосфатный неорганический адгезив

Относительно невысокие звукопоглощающие характеристики зернистых материалов связаны с тем, что они обладают относительно малой пористостью (50–75%). Однако природа неорганического наполнителя данного типа материалов позволяет использовать их при более высоких температурах, чем, например, изделия на основе органических материалов.

Заключение

На основе анализа научно-технических литературных данных представлены сравнительные характеристики звукопоглощающих материалов с различным типом матриц. Показано, что наилучшими звукопоглощающими свойствами при частотах 250, 500, 1000 и 2000 Гц (рассмотрены в данной статье) обладают волокнистые материалы на основе стекловаты и нетканого материала из ПЭТФ. Толщина образца оказывает существенное влияние на поглощающие характеристики материалов при низких частотах (250 Гц). При высоких частотах (2000 Гц) достичь значений коэффициента звукопоглощения в интервале 0,9–1 можно при толщине образца ~20 мм.

Среди ячеистых материалов наилучшими поглощающими характеристиками обладает вспененный полиуретан, который также может быть использован с различными наполнителями.

Относительно низкая звукопоглощающая способность зернистых материалов объясняется сравнительно низкой пористостью этих материалов.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-38-20717 мол_a_вед.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites // Russian nanotechnologies. 2013. V. 8. Issue 3–4. P. 163–185.
3. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
5. Платонов М.М., Железина Г.Ф., Нестерова Т.А. Пористоволокнистые полимерные материалы для изготовления широкодиапазонных ЗПК и исследование их акустических свойств // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №6. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-9-9.
6. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // Авиационные материалы и технологии. 2016 (в печати).
7. Jacobsen F., Poulsen T., Rindel J.H., Gade A.Ch., Ohlrich M. Fundamentals of acoustic and noise control. Orsted: Technical University of Denmark. 2007. P. 172.
8. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials // Sound and Vibration. July 2010. P. 12–17.
9. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столянков Ю.В., Румянцева Т.В. Пенополиимиды // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
10. Исакович М.И. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 502 с.
11. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов. М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2013. 156 с.

12. Liu Sh., Chen W., Zhang Y. Design optimization of porous fibrous materials for maximizing absorption of sound under set frequency bands // *Applied Acoustics*. 2014. V. 76. P. 319–328.
13. Han F., Seiffert G., Zhao Yu., Gibbs B. Acoustic absorption behavior of an open-cell aluminium foam // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. V. 36. P. 294–302.
14. Xie Zh., Ikeda T., Okuda Yo., Nakajima H. Sound absorption characteristics of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification // *Materials Science and Engineering A*. 2001. V. 386. P. 390–395.
15. Sagartzazu X., Hervella-Nieto L., Pagalday J.M. Review in Sound Absorbing Materials. 2008. V. 15. P. 311–342.
16. Yamashita T., Suzuki K., Nishino S., Tomota Yo. Relationship between Sound Absorption Property and Microscopic Structure Determined by X-ray Computed Tomography in Urethane Foam Used as Sound Absorption Material for Automobiles // *Materials Transactions*. 2008. V. 49. №2. P. 345–351.
17. Castagnede B., Moussatov A., Lafarge D., Saeid M. Low frequency in situ metrology of absorption and dispersion of sound absorbing porous materials based on high power ultrasonic non-linearly demodulated waves // *Applied Acoustics*. 2008. V. 69. P. 634–648.
18. Sun P., Guo Zh. Preparation of steel slag porous sound-absorbing materials using powder as pore former // *Journal of Environmental Sciences*. 2015. V. 36. P. 67–75.
19. Rey R., Alba J., Arenas J.P., Sanchis V.J. An empirical modeling of porous sound absorbing materials made of recycled foam // *Applied Acoustics*. 2012. V. 73. P. 604–609.
20. Lu T.J., Chen F., He D. Sound absorption of cellular metals with semiopen cells // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 108. №4. P. 1697–1709.
21. Doutres O., Salissou Ya., Atalla N., Panneton R. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube // *Applied acoustics*. 2010. V. 71. P. 506–509.
22. Yu X., Lv L., Wei Ch., Cui Yo., Wang X., Liu T. Research on sound absorption properties of multilayer structural material based on discarded polyester fiber // *The Journal of The Textile Institute*. 2014. V. 105. №10. P. 1009–1013.
23. Kino N., Ueno T. Evaluation of acoustical and non-acoustical properties of sound absorbing materials made of polyester fibres of various cross-sectional shapes // *Applied Acoustic*. 2008. V. 69. P. 575–582.
24. Seddeq H.S., Aly N.M., A A.M., Elshakankery M.H. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials // *J. Industrial Textile*. 2012. V. 43. №1. P. 56–73.
25. Cuiyun D., Guang C., Xinbang X., Peisheng L. Sound absorption characteristics of a high-temperature sintering porous ceramic material // *Applied Acoustics*. 2012. V. 73. P. 865–871.
26. Ersoy S., Kucuk H. Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties // *Applied Acoustics*. 2009. V. 70. P. 215–220.
27. Arenas J. P., Rebolledo J., Rey R., Alba J. Sound Absorption Properties of Unbleached Cellulose Loose-Fill Insulation Material // *BioResources*. 2014. V. 9. №4. P. 6227–6240.
28. Bo Zh., Tianning Ch. Calculation of sound absorption characteristics of porous sintering fiber metal // *Applied Acoustics*. 2009. V. 70. P. 337–346.
29. Lee Y.E., Joo Ch.Wh. Sound Absorption Properties of Thermally Bonded Nonwovens Based on Composing Fibers and Production Parameters // *J. Applied Polymer Science*. 2004. V. 92. P. 2295–2302.
30. Hajj N.E., Mboumba-Mamboundou B., Dheilily R.-M., Aboura Z., Benzeggagh M., Queneudec M. Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows // *Industrial Crops and Products*. 2011. V. 34. P. 921–928.
31. Wassilieff C. Sound Absorption of Wood-Based Materials // *Applied Acoustics*. 1996. V. 48. №4. P. 339–356.
32. Sgard F.C., Olly X., Atalla N., Castel F. On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials // *Applied Acoustics*. 2005. V. 66. P. 625–651.

-
33. Yang T.L., Chiang D.-M., Chen R. Development of a Novel Porous Laminated Composite Material for High Sound Absorption // J. Vibration and Control. 2001. V. 7. P. 675–698.
 34. Narang P.P. Material Parameter Selection in Polyester Fibre Insulation for Sound Transmission and Absorption // Applied Acoustics. 1995. V. 45. P. 335–358.
 35. Wu G., Li R., Yuan Y., Jiang L., Sun D. Sound absorption properties of ceramic hollow sphere structure with micro-sized open cell // Materials Letters. 2014. V. 134. P. 268–271.
 36. Sun P., Guo Zh.-Ch. Sintering preparation of porous sound-absorbing materials from steel slag // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2015. V. 25. P. 2230–2240.
 37. Takahara H. The Sound Absorption Characteristics of Particulate Porous Ceramic Materials // Applied Acoustics. 1994. V. 41. P. 265–274.
 38. Hung T.-Ch., Huang J.-Sh., Wang Yi.-W., Lin K.-Yi. Inorganic polymeric foam as a sound absorbing and insulating material // Construction and Building Materials. 2014. V. 50. P. 328–334.