

УДК 62-758.34

*И.Д. Краев¹, А.Е. Сорокин¹, А.В. Нырцов¹, Н.О. Шипин¹,
А.А. Краева², Ю.М. Титкова³*

ПЕНОПЛАСТЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-10-10

Рассмотрены различные пористые материалы, обладающие звукопоглощающими свойствами. Приведена классификация пористых материалов в зависимости от их структурных признаков, рассмотрено их назначение.

Основное внимание обращено на пористо-ячеистые материалы (пенопласты), среди которых широкое распространение получили пенополиуретаны. Приведены результаты исследовательских работ, направленных на получение новых пенопластов и пористых композиционных материалов, обеспечивающих эффективное поглощение акустических волн в широком диапазоне частот. В зависимости от компонентного состава и концентрации наполнителя получены образцы наполненных и ненаполненных пенополиуретанов с различными структурными параметрами и эксплуатационными характеристиками. Выявлено влияние пористости пенопласта на акустические свойства материалов, показана возможность размещения пористоволокнистого слоя внутри объема пенопласта.

Рассмотрены перспективные пенопласты, способные сохранять эксплуатационные характеристики при повышенных температурах, а также продемонстрировано влияние меламина и его производных на комплекс эксплуатационных свойств. Исследованы акустические и физические свойства образцов импортного пенопласта на основе меламиноформальдегидных смол. Проведены эксперименты, направленные на снижение значений водопоглощения открытоячеистого пенопласта.

Ключевые слова: пористые материалы, волокнистые материалы, пенопласт, полиуретан, композиционные материалы, меламиноформальдегидные смолы, коэффициент звукопоглощения.

*I.D. Kraev¹, A.E. Sorokin¹, A.V. Nyrtsov¹, N.O. Shipin¹,
A.A. Kravtseva², Yu.M. Titkova³*

FOAMS DESIGNED TO ENSURE THE ABSORPTION OF ACOUSTIC WAVES OVER A WIDE RANGE OF FREQUENCIES

Various porous materials with sound-absorbing properties are considered. The classification of porous materials according to their structural features is given, their purposes are considered.

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

²Акционерное общество «Российские космические системы» [Joint Stock Company «Russian Space Systems»]; e-mail: contact@spicecorp.ru

³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева [D.I. Mendeleev University of Chemical Technology]; e-mail: rector@muctr.ru

The main attention is paid to porous-cellular materials (foams), among which polyurethane foams are widely used. The results of research work aimed at obtaining new foams and porous composite materials providing effective absorption of acoustic waves over a wide frequency range are presented. Depending on the component composition and concentration of the filler, samples of filled and unfilled polyurethane foams with different structural parameters and performance characteristics were obtained. The influence of the porosity of the foam on the acoustic properties of materials is revealed, the possibility of placing a porous fiber layer inside the foam volume is shown.

Prospective foams were considered capable of maintaining performance at elevated temperatures, and the effect of melamine and its derivatives on the complex of performance properties was demonstrated. The acoustic and physical properties of samples of imported foam based on melamine-formaldehyde resins are investigated. Experiments aimed at reducing the water absorption values of open-cell foam have been carried out.

Keywords: porous materials, fibrous materials, polystyrene, polyurethane, composite materials, melamine-formaldehyde resins, sound absorption coefficient.

Введение

С ростом темпов индустриализации Российской Федерации, развитием строительной индустрии и транспорта возникает потребность в акустическом комфорте. Профессиональные заболевания органов слуха являются актуальной проблемой во всем мире. По данным Всемирной организации здравоохранения, нейросенсорная тугоухость шумовой этиологии в экономически развитых странах за последнее десятилетие занимает первое место в структуре профессиональных болезней [1]. В России производственный шум также является одним из ведущих неблагоприятных факторов на рабочих местах в большинстве отраслей промышленности. В последние годы растет количество заболеваний, связанных с органами слухового аппарата. По данным Роспотребнадзора, в настоящее время каждый третий работающий подвергается воздействию производственного шума [2].

Для снижения уровня шумового воздействия широкое распространение получили звукоизоляционные материалы и экраны. За последнее время производство звукоизоляции претерпело значительные изменения – современные технологии позволяют создавать достаточно тонкие панели, которые по своим свойствам не уступают каркасным многослойным конструкциям. Звукоизоляционные панели – это универсальная комбинированная звукоизоляционная система, представляющая собой плитный материал, используемый для защиты от шума помещений жилого и общественного назначения [3]. При встрече звуковой волны с какой-либо преградой часть ее проходит через ограждение, часть отражается, часть превращается в тепловую энергию, часть излучается колеблющейся преградой, а часть превращается в корпусной звук, распространяющийся внутри ограждения в помещении [4]. В случае звукоизоляции могут происходить интерференционные процессы в местах нахождения (расположения) источников звука, что приводит к усилению нежелательного воздействия, и вследствие этого не является эффективным решением проблемы. Например, от стен, пола и потолка в производственных помещениях, внутри которых располагается оборудование (как правило, и являющееся источником нежелательного акустического воздействия), в результате их относительно высокой звукоизоляции происходит отражение и нарастание шума, что нарушает работу персонала и может приводить к нежелательным издержкам.

В свою очередь, использование звукопоглощающих материалов предпочтительнее в связи с обеспечением реверберации акустических волн и резким сокращением их отражений от передней границы.

Существуют активные и пассивные звукопоглощающие системы. В случае пассивных систем ослабление звука происходит без использования дополнительной энергии, благодаря параметрам материала. Пассивные системы могут быть разделены на мембранные, резонансные и пористые [5].

По структурным признакам звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на пористоволокнистые, пористо-ячеистые и пористо-губчатые [6]. Создание новых пористых материалов в настоящее время является актуальной задачей. Сущность физического явления, происходящего при гашении звука пористым телом, заключается в следующем. Звуковые волны, падая на поверхность такого материала и проникая далее в его поры, возбуждают колебания воздуха, находящегося в узких порах. При этом значительная часть звуковой энергии расходуется. Высокая степень сжатия воздуха и его трение о стенки вызывают разогрев. За счет этого кинетическая энергия звуковых колебаний преобразуется в тепловую, которая рассеивается в среде.

Часть энергии акустической волны тратится при деформировании гибкого скелета матрицы звукопоглощающего материала [7]. Свойства акустических материалов, и прежде всего звукопоглощение, зависят от величины сквозной пористости, размера пор и распределения их по размерам. Известно, что получение сообщающихся пор обеспечивает прохождение звуковой волны в толщу материала. Создание многомодульной пористости обеспечивает гашение звука на средних и высоких частотах. Достижение необходимого сопротивления продуванию способствует эффективному преобразованию звуковой энергии в тепловую [8].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от действия ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9].

Материалы и методы

В настоящее время одним из перспективных направлений в решении задач по разработке звукопоглощающих пористых материалов с жестким каркасом является использование минерального сырья: пеностекла, пенобетона, пенокерамики и т. д. [10]. При создании звукопоглощающих материалов широкое распространение также получили металлические и текстильные волокна. Материалы, получаемые на их основе, как правило, относятся к группе пористоволокнистых. В зависимости от условий эксплуатации и требований, предъявляемых к звукопоглощающим материалам, используются различные типы волокон с определенной структурой. В частности металлические волокна применяются в изделиях, узлы которых работают при повышенных температурах, – например, при создании пористых звукопоглощающих материалов для звукопоглощающих конструкций двигательных установок авиационных двигателей, работающих при температурах $>300^{\circ}\text{C}$ [11].

Текстильные волокна, в свою очередь, получили широкое распространение в качестве основы звукопоглощающих материалов и композитов для интерьеров и подкапотного пространства автомобилей, для сельскохозяйственной техники и в других видах транспорта [12].

Инновационным направлением в развитии технического текстиля является разработка текстильных композитов. При применении композитов с армирующей составляющей из текстильных материалов в качестве отделочных и конструкционных материалов для транспортных средств требуется оценивать не только их прочностные характеристики, но и акустические свойства [13].

Следует отметить, что одними из важнейших направлений развития материаловедения для сложных технических систем в настоящее время являются разработка и широкое применение полимерных композиционных материалов и изделий из них [14, 15]. В зависимости от химического строения полимерной матрицы композиционного материала, типа наполнителя, а также морфологии и его пространственного распределения внутри объема матрицы, обеспечивается комплекс требуемых эксплуатационных характеристик.

К основным требованиям, предъявляемым к звукопоглощающим материалам, в ряде случаев относятся не только акустические характеристики, но и физико-механические свойства. Сочетаемость таких свойств может быть обеспечена композиционными материалами. Во ФГУП «ВИАМ» разработан звукопоглощающий материал-конструкция марки ВЗМК-1, представляющий собой стеклосотопласт с пористым наполнителем, предназначенный для изготовления звукопоглощающих конструкций двигательных установок перспективных двигателей с рабочей температурой до 150°C [16].

Создание звукопоглощающего композиционного материала возможно с использованием практически любого полимерного связующего [17]. К одному из наиболее распространенных полимеров при создании звукопоглощающих материалов и композитов относится полиуретан [18]. Принцип получения пенополиуретанов основан на химической реакции между изоцианатами, полиэфирами и водой обычно в присутствии катализаторов, эмульгаторов и других добавок.

В настоящее время пенополиуретаны занимают особое место среди других пенопластов, так как обладают рядом весьма ценных свойств, большой сырьевой базой и широкими технологическими возможностями получения. Наполненные и ненаполненные открытоячеистые пенопласты на основе полиуретана в зависимости от их физических параметров (толщина, воздухопроницаемость и т. д.), структуры, пористости, морфологии пор могут обеспечивать поглощение акустических волн в широком диапазоне частот.

Проведены исследования, направленные на определение влияния физических параметров пенопласта на основе полиуретана на акустические характеристики. Для изготовления экспериментальных образцов пенополиуретанов использовали два различных компонентных состава, одним из которых являлась серийно выпускаемая ЗАО «Блокформ» полиуретановая система СПУ-208. Пены, получаемые на ее основе, отличались высокой эластичностью и в зависимости от соотношения между компонентами А, Б, Д и водой обладали различной пористостью (средним размером пор по объему). Изготовление жестких пенопластов осуществляли по рецептурам со следующими компонентами: полиэфирполиол, аминный катализатор, полиизоцианат, силиконовый пенорегулятор и газообразующий агент – вода. Для формирования мультипористой структуры у жестких пенопластов в их состав вводили порошки вспученного вермикулита (марок ВВФ-0,5; ВВФ-1,0 и ВВФ-2,0) различных концентраций.

С целью обеспечения более широкого рабочего акустического диапазона без значительного увеличения габаритов материала проведены работы, направленные на создание многослойной композиционной панели, состоящей из чередующихся слоев пенополиуретана на основе системы СПУ-208 и минеральной (базальтовой) ваты. Проведены также исследования по созданию трудносгораемых пенопластов с повышенной термостойкостью на основе полиуретана и порошка фосфата меламина. В связи с потребностью в звукопоглощающих пористо-ячеистых материалах, способных сохранять эксплуатационные характеристики при повышенных температурах (>200°C), исследованы акустические и физические характеристики образцов импортных пенопластов (производство компании Ваза Тек) на основе вспененной меламиноформальдегидной смолы.

С использованием методов оптической микроскопии получены изображения микроструктур образцов пенополиуретана на металлографическом микроскопе Olympus GX53 при увеличении $\times 10$. Для оценки акустических характеристик образцов пенопластов определены значения коэффициента звукопоглощения на низкочастотном интерферометре производства датской фирмы Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S (B&K) двухмикрофонным методом, называемым также методом передаточной функции при уровнях шума до 120 дБА в диапазоне частот от 100 до 6400 Гц.

Результаты и обсуждение

Исследования по влиянию размеров пор, а также их объемного распределения внутри пенопласта, показали, что для обеспечения эффективного поглощения акустических волн в широком диапазоне частот требуется полидисперсная пористая структура с равномерным процентным распределением размеров пор, лежащих в интервале от 50 до 600 мкм. Такая структура получена на образцах жестких пенопластов, наполненных порошком вермикулита марки ВВФ-0,5, и образцах пенопласта на основе полиуретановой системы СПУ-208.

Полидисперсная структура полиуретанового пенопласта представлена на рис. 1.

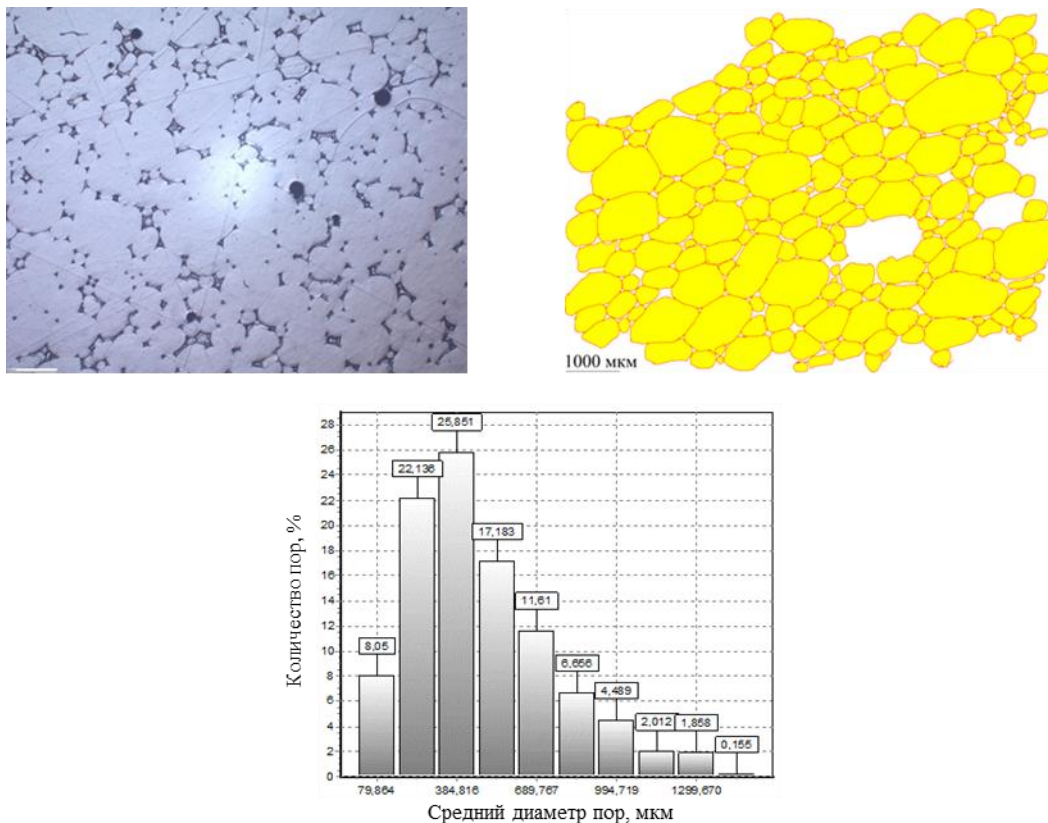


Рис. 1. Микроструктура образца полиуретанового пенопласта и график процентного распределения пор в зависимости от их среднего диаметра

На рис. 2 представлены акустические характеристики (зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты) для образцов полиуретановых пенопластов различных составов и структур. Видно, что к одному из основных параметров, определяющих акустические характеристики материала, относится объемное распределение пор по их размерам. Так, для образцов пенополиуретана с преобладанием в структуре крупных

пор характерны более низкие значения коэффициентов звукопоглощения практически во всем частотном диапазоне. При этом на некоторых диапазонах появляются ярко выраженные резонансы. Результаты исследований по влиянию структурных параметров пористого материала на его звукопоглощающие свойства более подробно рассмотрены в работе [19].

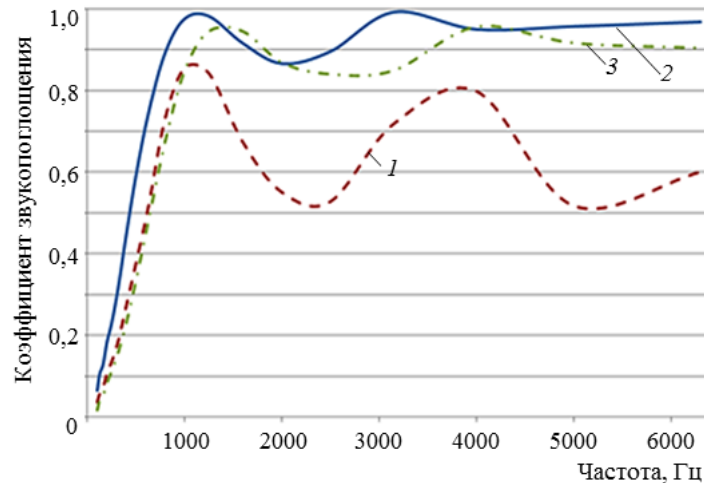


Рис. 2. Зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты для образцов полиуретановых пенопластов:

1 – пенополиуретан с преобладанием крупных пор (>600 мкм) в структуре; 2 – пенополиуретан с полидисперсной структурой, преобладающий процент распределения размеров пор находится в интервале от 50 до 600 мкм; 3 – пенополиуретан, наполненный порошком вермикулита, с полидисперсной структурой, преобладающий процент распределения размеров пор находится в интервале от 50 до 600 мкм

В настоящее время в строительной индустрии в качестве теплоизоляционных и звукопоглощающих материалов широкое распространение получили различные пористоволокнистые материалы – как правило, минеральные ваты на основе базальтовых или асбестовых волокон. Существует большое количество марок данных материалов, например Rockwool. Такие материалы обеспечивают хорошие теплоизоляционные свойства и эффективное звукопоглощение в широком диапазоне частот: при толщине 50 мм образец базальтового волокнистого материала обладает коэффициентом звукопоглощения не менее 0,8 в диапазоне частот от 600 до 6400 Гц. Однако пористоволокнистые материалы имеют ряд недостатков: высокие значения водопоглощения, низкая стойкость к действию различных микроорганизмов (от простейших бактерий до плесени и т. д.), а также в связи с летучестью пыли от волокон может наноситься вред здоровью людей. Известно, что, при насыщении водой или влагой объема пористого материала, наблюдается заметное снижение звукопоглощающих характеристик и рост теплопроводности. Для устранения недостатков возможно размещение панели волокнистого материала в текстильной или пленочной упаковке. Обычно такие защитные слои являются воздухонепроницаемыми или имеют крайне низкие значения воздухопроницаемости, вследствие чего происходит резкое ухудшение звукопоглощающих свойств. В тех случаях, когда требуется сохранение полезных эксплуатационных характеристик, перспективно использование композиционной полимерной звукопоглощающей панели марки ВТИ-26, разработанной во ФГУП «ВИАМ» [20].

Данная звукопоглощающая панель представляет собой многослойный материал с расположенным между слоями пенополиуретана слоем минеральной ваты.

Размещение пористоволокнистого материала в объеме пористо-ячеистого материала позволяет снизить значение водопоглощения в десятки раз при обеспечении более широкого рабочего диапазона эффективного звукопоглощения без увеличения общих габаритов материала по сравнению с материалом на основе минеральной ваты.

Дополнительное снижение водопоглощения в составе ВТИ-26 обеспечивает внешний текстильный слой, с наружной стороны которого нанесено тонкое воздухопроницаемое покрытие на основе гидрофобного каучука.

На рис. 3 приведена сравнительная характеристика зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты для образцов материала ВТИ-26 и образцов полиуретанового пенопласта без наполнителя. Толщина образцов составила 50 мм.

Внешний вид звукопоглощающей панели марки ВТИ-26 приведен на рис. 4.

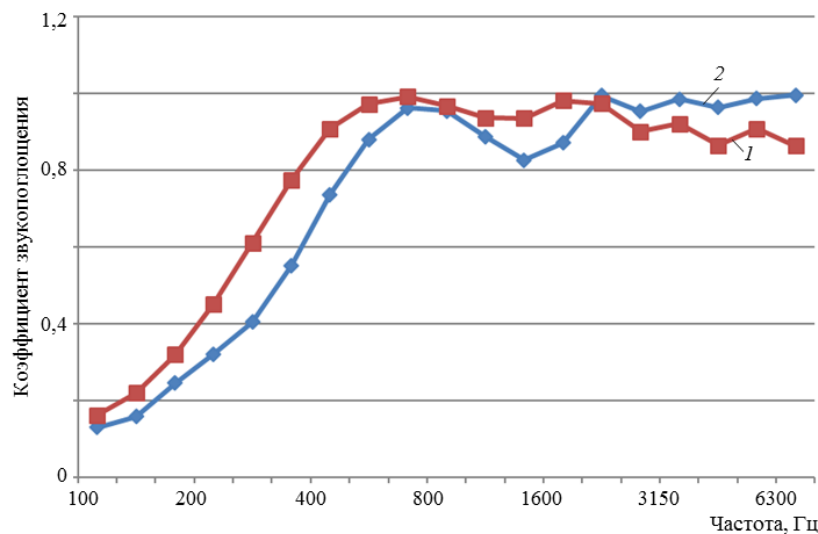


Рис. 3. Зависимость коэффициентов звукопоглощения от частоты для образцов из ВТИ-26 (1) и пенополиуретана (2)



Рис. 4. Внешний вид звукопоглощающей панели марки ВТИ-26

Известно, что большинство полиуретановых пенопластов обладают низкой стойкостью к действию ультрафиолетового излучения и термоокислительной деструкции, низкой тепло- и термостойкостью, а также являются горючими материалами. Барьерные слои, изготовлены из тканепленочных материалов, могут служить защитой

от негативных воздействий, но, как правило, в то же время приводят к снижению основных эксплуатационных свойств. Например, в случае использования пенополиуретанов в качестве звукопоглощающих материалов такие слои снижают звукопоглощение практически во всем исследуемом диапазоне частот. Эффективным решением данной проблемы может являться изменение компонентного состава при получении пенополиуретановых пенопластов. Широкое распространение в качестве добавок, снижающих действие термоокислительной деструкции и других факторов, приводящих к ухудшению эксплуатационных характеристик, получили меламин и его производные.

Проведены исследования по определению влияния фосфата меламина на эксплуатационные свойства пенопластов. В рецептуре экспериментальных образцов использовали полиуретановую систему следующего состава: полиэфирполиол, аминный катализатор, полиизоцианат, силиконовый пенорегулятор и газообразующий агент – вода. В результате проведенных экспериментов установлено, что уже при относительно небольшой массовой концентрации фосфата меламина (не более 20%) происходило повышение термостойкости образцов пенопласта на 20–30°C и обеспечивалась пожаробезопасность (материал переходил в категорию трудногоряемых). Введение фосфата меламина, безусловно, влияет на протекание реакции вспенивания системы, скорость отверждения и, как следствие, на параметры структуры, в том числе пористость. Экспериментально получены образцы пенопластов на основе полиуретана и фосфата меламина, обладающие полидисперсной пористостью и обеспечивающие схожие акустические свойства по сравнению со свойствами пенопластов на основе полиуретановой системы СПУ-208 (рис. 3). В настоящее время проводится большое количество научно-исследовательских работ в области создания полиуретановых пенопластов с повышенными значениями термо- и теплостойкости [21].

Среди существующих пенопластов большую известность приобрели материалы на основе меламиноформальдегидных смол [22]. Пенопласты, получаемые путем вспенивания ряда меламиноформальдегидных смол (ПМФС), обладают высокими значениями термо- и теплостойкости, являются трудногоряемыми материалами и обеспечивают эффективное звукопоглощение при достижении необходимых параметров структуры. Основными производителями данных материалов являются компания *Vaza Tek* (Германия), а также фирмы в США, Японии и Китае.

Проведены исследования физических и акустических свойств образцов импортного пенопласта ПМФС. Установлено, что значение объемной плотности материала не превышает 11 кг/м³, максимальная рабочая температура эксплуатации достигает 240–250°C.

Зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты для образца ПМФС (толщина 50 мм) представлена на рис. 5. Видно, что значения коэффициента звукопоглощения превышают 0,8 в диапазоне от 500 до 6400 Гц, что демонстрирует эффективное поглощение акустических волн в широком диапазоне частот. В связи с тем, что такие пенопласты являются открытоячеистыми, они, как правило, обладают высокими значениями водопоглощения (в зависимости от их структурных параметров и плотности в ряде случаев значения водопоглощения могут достигать 12000%). Во ФГУП «ВИАМ» проведен ряд экспериментов, направленных на снижение суточного водопоглощения образцов ПМФС путем их пропитки различными гидрофобизирующими составами. В результате достигнуто снижение среднего значения суточного водопоглощения с 12000 до 11% (в ~110 раз) при увеличении плотности материала не более чем в 10 раз с сохранением рабочего акустического диапазона.

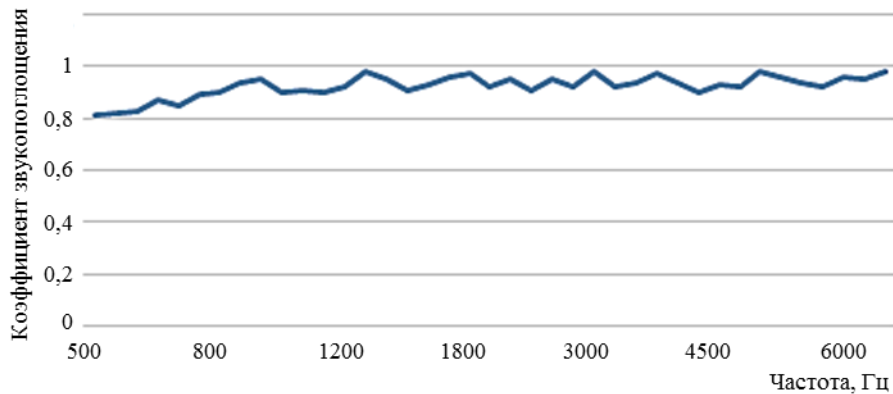


Рис. 5. Зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты для образца ПМФС

ПМФС являются уникальными в своем роде материалами и имеют перспективу использования не только в качестве поглотителей акустических волн, но и как теплоизоляторы и сорбенты загрязнений и вредных веществ.

Заключения

Согласно приведенным данным, пористо-ячеистые материалы имеют широкую перспективу использования для обеспечения эффективного звукопоглощения в широком диапазоне частот.

Одним из основных параметров, влияющих на акустические характеристики пористо-ячеистых материалов, является пористость. На примере исследований полиуретановых пенопластов установлено, что наиболее широкополосное поглощение акустических волн достигается материалами с полидисперсной пористостью. Обеспечение необходимых структурных параметров возможно не только путем изменения компонентного состава полиуретановых пенопластов, но и благодаря введению ряда наполнителей, например вермикулита.

Отмечено, что сочетание пористо-ячеистых материалов с пористоволокнистыми может приводить к расширению диапазона эффективного звукопоглощения, а также к улучшению других эксплуатационных характеристик (снижение водопоглощения). Для обеспечения пожаробезопасности ряда пенопластов, в том числе полиуретановых, и повышения их тепло- и термостойкости большой интерес представляют меламина и его производные. Эксперименты по введению фосфата меламина в состав полиуретановой системы продемонстрировали рост максимальной температуры эксплуатации на 20–30°C при переходе материала в категорию трудносгораемых.

Проведенные исследования эксплуатационных характеристик пенопластов на основе меламиноформальдегидной смолы показали их эффективность в качестве звукопоглощающих материалов, в том числе с возможностью их использования в изделиях, работающих в условиях повышенных температур (до 240–250°C). Дополнительно проведены эксперименты, направленные на снижение значений водопоглощения образцов ПМФС, в результате которых получены гидрофобизирующие составы, позволяющие снизить среднее значение суточного водопоглощения более чем в 100 раз при сохранении рабочего акустического диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волгарева А.Д., Каримова Л.К., Маврина Л.Н. и др. Производственный шум как фактор профессионального риска на предприятиях нефтехимической отрасли // Анализ риска здоровью. 2017. №1. С. 116–124. DOI: 1021668/health.risk/2017.1.13.
2. Терехов А.Л. Повышение безопасности при эксплуатации технологического оборудования ПАО «Газпром» // Безопасность труда в промышленности. 2017. №6. С. 36–45.

3. Трунова Н.А., Касимов Р.Г. Выбор оптимального варианта звукоизоляции в крупнопанельном здании // Роль технических наук в развитии общества: сб. материалов II Междунар. науч.-практич. конф. Кемерово, 2017. С. 178–183.
4. Романенко А.Э., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Исследование влияния конструктивных параметров гибкой звукоизолирующей панели на ее звукоизоляционную характеристику // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2017. №1. С. 347–352.
5. Шашкеев К.А., Шульдешов Е.М., Попков О.В., Краев И.Д., Юрков Г.Ю. Пористые звукопоглощающие материалы (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6.
6. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №6. С. 76–79.
7. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н. Характеристика звукоизоляционных строительных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №5. С. 64–66.
8. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Барыбин А.А., Бондарь Д.Д. Основы создания звукопоглощающих материалов // Научное обозрение. 2017. №7. С. 32–35.
9. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Вайсера С.С., Пучка О.В., Лесовик В.С. и др. Влияние влагосодержания, воздухопроницаемости и плотности материала на его звукопоглощающие характеристики // Строительные материалы. 2017. №6. С. 24–27.
11. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Пористоволокнистый металлический материал для звукопоглощающих конструкций авиационных ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4 (40). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-1-1.
12. Тулейко А.С., Бухаров С.Н. Разработка новых экологически безопасных звукопоглощающих материалов для интерьеров транспортных средств // Тез. докл. IV Респ. науч.-технич. конф. молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования». Гомель, 2016. С. 47–48.
13. Башков А.П., Башкова Г.В., Евдокимов А.В. Анализ акустических свойств инновационных текстильных материалов // XIX Междунар. науч.-практич. форум «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы». Иваново, 2016. Ч. 1. С. 202–206.
14. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
15. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
16. Полимерный звукопоглощающий материал и способ изготовления: пат. 2612674 Рос. Федерация; опубл. 13.03.17.
17. Гречишников В.А., Гумеров И.Ф., Гумеров М.И. и др. Разработка композиционных материалов с повышенными вибро-звукопоглощающими свойствами // Стин. 2017. №5. С. 28–34.
18. Шапарев А.В., Савина А.И., Дзеник А.Д. Полиуретановые композиционные материалы с высокими звукопоглощающими свойствами // Сб. науч. статей Междунар. науч.-технич. конф. «Автоматизация технологических процессов механической обработки, упрочнения и сборки в машиностроении». г. Набережные Челны, 2016. С. 322–326.
19. Образцова Е.П., Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Юрков Г.Ю. Гибридные функциональные материалы, сочетающие в себе звукопоглощающие и радиопоглощающие свойства // Материаловедение. 2016. №12. С. 19–24.
20. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Платонов М.М. Полимерная композиционная звукопоглощающая панель // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №5 (53). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-7-7.
21. Glowacz-Czerwonka D. The Polyurethane Foams Based on Melamine-formaldehydecyclohexanone Resins // Cellular Polymers. 2017. Vol. 36. No. 1. P. 35–49.
22. Cleaning implement based on melamine formaldehyde foam comprising abrasive particles: pat. US 9023905 B2; publ. 05.05.15.