

Акустическая эффективность дробленых непористых полимерных материалов в составе насыпных шумопоглощающих модулей

А.В. Краснов, канд. техн. наук, доцент

М.И. Фесина, канд. техн. наук, доцент

Л.Н. Горина, зав.кафедрой, д-р пед. наук, профессор

Тольяттинский государственный университет

e-mail: kaw@yandex.ru, michailfes@yandex.ru, Gorina@tltsu.ru

Ключевые слова:

сырьевые ресурсы, дробленые непористые и пористые полимерные структуры, несущие звукопрозрачные оболочки, звукопоглощающие свойства, экологическая безопасность.

В работе представлены результаты исследований акустической эффективности дробленых непористых полимерных структур из твердых отходов, используемых в составе насыпных шумопоглощающих модулей. Рассматриваются воздушнонепродуваемые структуры материалов, подвергаемые соответствующим технологическим процедурам дробления с образованием полуфабрикатных продуктов, в частности, в виде резиновой крошки, пленочных чипсов и полимерных гранул. Анализируются достигнутые улучшения звукопоглощающей эффективности макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей. Отмечены экологические и стоимостные преимущества применения шумопоглощающих устройств, содержащих дробленые пористые звукопоглощающие структуры.

1. Введение

Возрастающие объемы добычи углеводородного сырья используемого, в частности, для последующего производства из него полимерных звукопоглощающих, звукоизолирующих (акустических) и вибродемпфирующих материалов, с учётом невосполнимости этих сырьевых ресурсов, ведут к их неизбежному истощению. В это же время сами технологические процессы добычи сырья, его транспортировки и технологической переработки вызывают сопутствующее загрязнение окружающей среды. Значительной технической и социальной проблемой являются «экологически грязные» традиционные методы утилизации твердых полимерных отходов. Поэтому уменьшение объемов расходования углеводородного сырья и безопасной утилизации его конечных продуктов является весьма актуальным и востребованным.

Объемы утилизируемых полимерных материалов, вторичная переработка которых недопустима или технологически затруднена, очень значительны. Продукты их вторичной рециклированной переработки слабо востребованы промышленностью. В пер-

вую очередь это относится к конструкциям легковых автомобилей, завершившим свой жизненный цикл и подвергаемым утилизационной переработке. В частности, вес применяемых пластмасс в составе деталей и узлов автомобилей моделей *Lada Priora*, *Lada Kalina*, *Renault Logan* составляет, соответственно, 93,8 кг, 91,4 кг и 91,5 кг. В каждом образце указанных моделей автомобилей примерно 17 кг составляют пенополиуретаны (ППУ), энергетическая утилизация которых путем сжигания ограничена или запрещена действующими национальными и международными стандартами. В это же время потребность в конечных продуктах утилизационной переработки ППУ весьма ограничена и не превышает 20%. По этой причине, огромное количество утилизируемых ППУ в виде отходов вынужденно направляется на свалки, подвергается захоронениям в мусорниках с отчуждением значительных территорий. Альтернативой является рециклированная утилизационная переработка твердых полимерных отходов, в первую очередь, содержащихся в составе автотранспортных средств, завершивших свой жизненный цикл [1–5].

Одним из способов повышения востребованности промышленностью утилизируемых полимерных отходов является их использование в виде дробленых фрагментированных наполнителей звукопоглощающей структуры в составе различного типа шумопоглощающих модулей, разработанных авторами [6, 7]. С использованием тех или иных технологий дробления фрагментированные наполнители могут производиться из пористых (вспененных, волокнистых) структур деталей и узлов, демонтированных с утилизируемых технических объектов. Это, в первую очередь, детали шумоизоляционных пакетов, автомобильных сидений, панелей приборов автотранспортных средств, завершивших свой жизненный цикл, и/или технологические отходы и брак производства полимерных материалов и деталей из них. Конструктивные концепции предлагаемых насыпных шумопоглощающих модулей, подразумевают, в частности, размещение вещества пористой звукопоглощающей структуры (обособленных дробленых фрагментированных наполнителей) в замкнутых полостях несущих звукопрозрачных оболочек. Такого типа несущие звукопрозрачные оболочки могут быть представлены воздухопроницаемыми структурами пленочного типа, например, полиэстеровой, уретановой, поливинилхлоридной.

Несущая звукопрозрачная оболочка может быть также и воздухопродуваемой, выполненной из микроперфорированного фольгового материала (алюминия, меди, латуни) или сплошного тканевого (нетканого) материала (типа «малифлиз», «филтс», стеклоткань, базальто-волокнистая ткань и т.п.). Также может использоваться твердооболочковая воздухопродуваемая и звукопрозрачная конструкция, представленная перфорированной листовой или сетчатой проволоочной структурой. Очевидно, что могут быть также использованы и многослойные звукопрозрачные структуры, сочетающие разнообразные типы вышеперечисленных конструктивно-технологических исполнений.

2. Результаты исследований

Проведенные авторами экспериментальные исследования позволили выявить потенциалы эффективного использования в составе макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей, составленных из дробленых фрагментированных наполнителей из плотных непористых полимерных воздухопродуваемых материалов, подвергаемых соответствующим технологическим процедурам дробления с получением крошки, пленочных чипсов, гранул. Дроблеными структурами материалов такого типа могут являться, в частности, производственно-технологические отходы и брак производства полимерных материалов

и изделий (деталей, узлов) из резины, каучука, поливинилхлорида, полипропилена, полиэтилена (вспененного полиэтилена), полистирола и других типов полимерных материалов. В том числе могут быть использованы как идентичные, так и различные типы плотных непористых полимерных материалов с целенаправленным образованием соответствующих дозированных сочетаний (смесей), наделенных определенными (близкими) или существенно отличающимися физическими характеристиками, химическим составом, межфрагментной макропористостью, а также дополнительным дозированным включением в их состав дробленых пористых материалов.

Преимущественное использование полимерных нефтехимических продуктов в качестве дробленых фрагментированных наполнителей не исключает использования в их составе и других продуктов утилизационной переработки промышленных изделий, к примеру, волокон или тканей минерального и/или органического происхождения (хлопковых, шелковых, джутовых, сизальных, льняных, базальтовых, керамических, стеклянных). В связи с этим, одним из существенных преимуществ использования предлагаемого типа звукопоглощающего вещества является возможность использования дробленых многослойных структур, состоящих из различных материалов без проведения дополнительных технологических процедур их сепарированного разделения (расчленения). Как известно, такого типа технологические процессы могут являться весьма сложными, трудоемкими и затратными.

Эффективность рассматриваемых шумопоглощающих устройств иллюстрируется результатами проведенных авторами экспериментальных исследований с макетными образцами открытого и закрытого типов насыпных шумопоглощающих модулей (рис. 1).

Исследования проводились с использованием лабораторно-стендовой установки «Кабина Альфа», содержащей измерительную реверберационную камеру объемом 6,45 м³. В рабочей зоне пространства реверберационной камеры, оборудованной системой калиброванных громкоговорителей, генерировалось диффузное звуковое поле с регистрацией темпа ослабления уровней звуковых давлений в отдельных точках ее пространства при прекращении процесса его генерирования. В исследованиях проводилось определение влияния степени дробления вещества непористых полимерных наполнителей.

При измерениях регистрировались значения показателей «реверберационный коэффициент звукопоглощения» α , и «эквивалентная площадь звукопоглощения» A , характеризующих звукопоглощающие свойства макетных модулей.

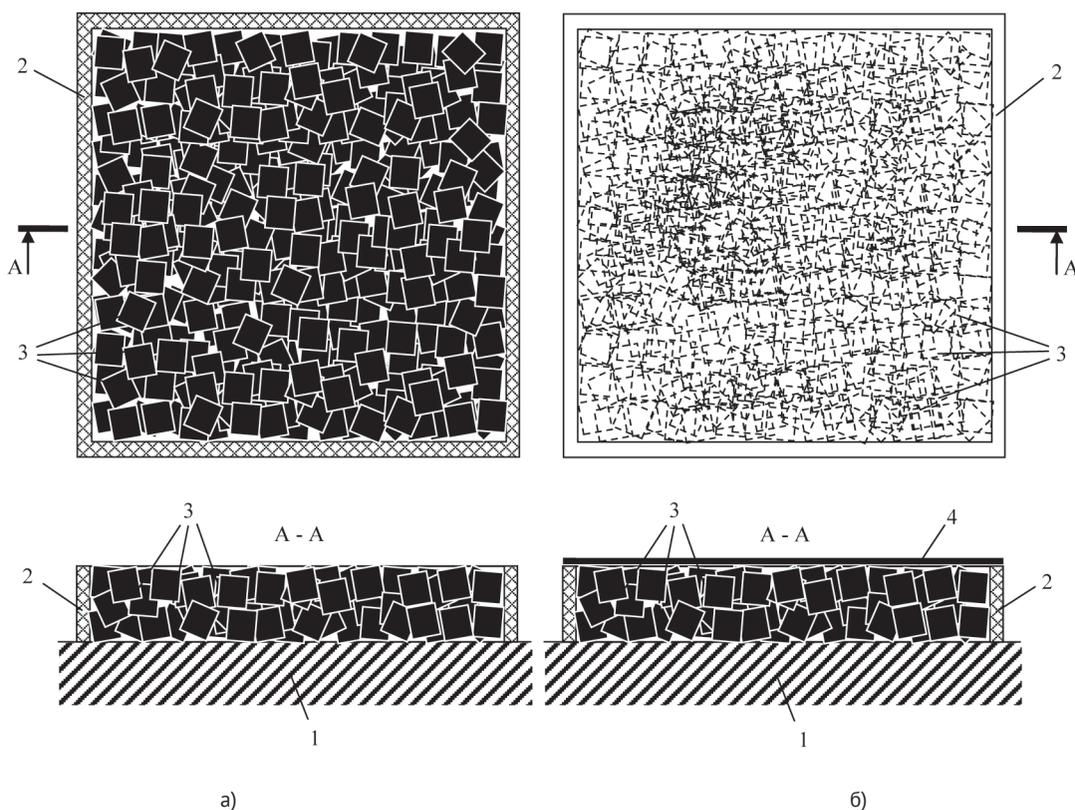


Рис. 1. Схемы макетных образцов открытого (а) и закрытого (б) типов насыпных шумопоглощающих модулей
1 – поверхность пола реверберационной камеры «Кабина Альфа»; 2 – звукоотражающие торцевые элементы, формирующие площадь лицевой поверхности 1 м²; 3 – обособленный дробленый фрагментированный наполнитель из непористых полимерных материалов; 4 – несущая звукопрозрачная оболочка

Таблица 1.

Структурные составы исследованных шумопоглощающих модулей

Условное обозначение модуля	Структурный состав образца модуля		Условное обозначение модуля	Структурный состав образца модуля	
	Образец дробленой звукопоглощающей структуры	Наличие звукопрозрачной оболочки		Образец дробленой звукопоглощающей структуры	Наличие звукопрозрачной оболочки
A1	резиновая крошка 1–3 мм, толщина слоя 20 мм	отсутствует	БЕ2	резиновая крошка 3–8 мм, толщина слоя 40 мм	алюминизированная полиэстеровая пленка, толщиной 0,012 мм
Б1	резиновая крошка 3–8 мм, толщина слоя 20 мм	отсутствует		БВЕ2	50% резиновая крошка 3–8 мм, 50% пластиковые чипсы 3–10 мм, толщина слоя 40 мм
В1	пластиковые чипсы 3–10 мм, толщина слоя 20 мм	отсутствует	БВГЕ2		50% резиновая крошка 3–8 мм, 25% пластиковые чипсы 3–10 мм, 25% пластиковые гранулы 2–4 мм, толщина слоя 40 мм
Г1	пластиковые гранулы 2–4 мм, толщина слоя 20 мм	отсутствует		БВГДЕ2	25% резиновая крошка 3–8 мм, 25% пластиковые чипсы 3–10 мм, 25% пластиковые гранулы 2–4 мм, 25% открытоячеистый ППУ 100×50×25 мм, толщина слоя 40 мм
A2	резиновая крошка 1–3 мм, толщина слоя 40 мм	отсутствует			
Б2	резиновая крошка 3–8 мм, толщина слоя 40 мм	отсутствует			
В2	пластиковые чипсы 3–10 мм, толщина слоя 40 мм	отсутствует			
Г2	пластиковые гранулы 2–4 мм, толщина слоя 40 мм	отсутствует			

Оценочный показатель «реверберационный коэффициент звукопоглощения» α_r , определялся в соответствии с выражением [7]:

$$\alpha_r = 55,3 \frac{V}{c \cdot S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \cdot 0,92, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где V – эффективный полезный объем пустой (без исследуемого объекта) реверберационной камеры, м^3 ; c – скорость распространения звука в воздухе, м/с ; S – площадь фронтальной (лицевой) поверхности испытываемого образца насыпного шумопоглощающего модуля, м^2 ; T_1 – время реверберации пустой камеры, без исследуемого образца насыпного шумопоглощающего модуля, с ; T_2 – время реверберации камеры, содержащей исследуемый образец насыпного шумопоглощающего модуля, с .

Оценочный показатель «эквивалентная площадь звукопоглощения» A характеризует абстрактную величину площади плоской звукопоглощающей поверхности, обладающей 100% -ным поглощением звуковой энергии и определялся согласно выражению [6, 7]:

$$A = 55,3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right), \text{ м}^2. \quad (2)$$

При формировании заданной звукопоглощающей структуры фрагментированные наполнители, составленные из дробленых непористых полимерных материалов, распределялись в виде слоистой структуры заданной толщины по площади поверхности равной 1 м^2 ($1000 \times 1000 \text{ мм}$), ограниченной звукоотражающими торцевыми элементами. Структурные составы исследованных образцов насыпных шумопоглощающих модулей представлены в табл. 1, схемы локализованного распределения различного вида дробленых фрагментированных наполнителей приведены в табл. 2 и 3.

Как следует из результатов исследований, представленных на рис.2 реверберационный коэффициент звукопоглощения α_r макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей звукопоглощающая структура которых образована пористым воздухопродуваемым слоем толщиной 20 мм , составленным из дробленых фрагментов непористых полимерных наполнителей, не превышает $0,4$ усл. ед. достигает наибольших значений в диапазоне частот 1600 – 4000 Гц .

Увеличение толщины пористого воздухопродуваемого слоя, составленного из непористых полимерных дробленых фрагментированных наполнителей, в 2 раза (c 20 мм до 40 мм), обеспечивает увеличение значений реверберационного коэффициента звукопоглощения α_r в исследуемом диапазоне частот

400 ... 10000 Гц на величину до $0,62$ усл. ед. При этом, наиболее высокими звукопоглощающими свойствами характеризуется макетный образец модуля В2, пористая воздухопродуваемая звукопоглощающая структура которого образована хаотично размещенными тонкостенными частицами в виде пластиковых чипсов габаритными размерами 3 – 10 мм .

Акустическая эффективность макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей, заполненных фрагментированными наполнителями, составленных из частиц плотных непористых полимерных воздухо непродуваемых структур материалов достигается преимущественно за счет образования многочисленных сообщающихся межграневых (межреберных) воздушных макроканалов и полостей между ними.

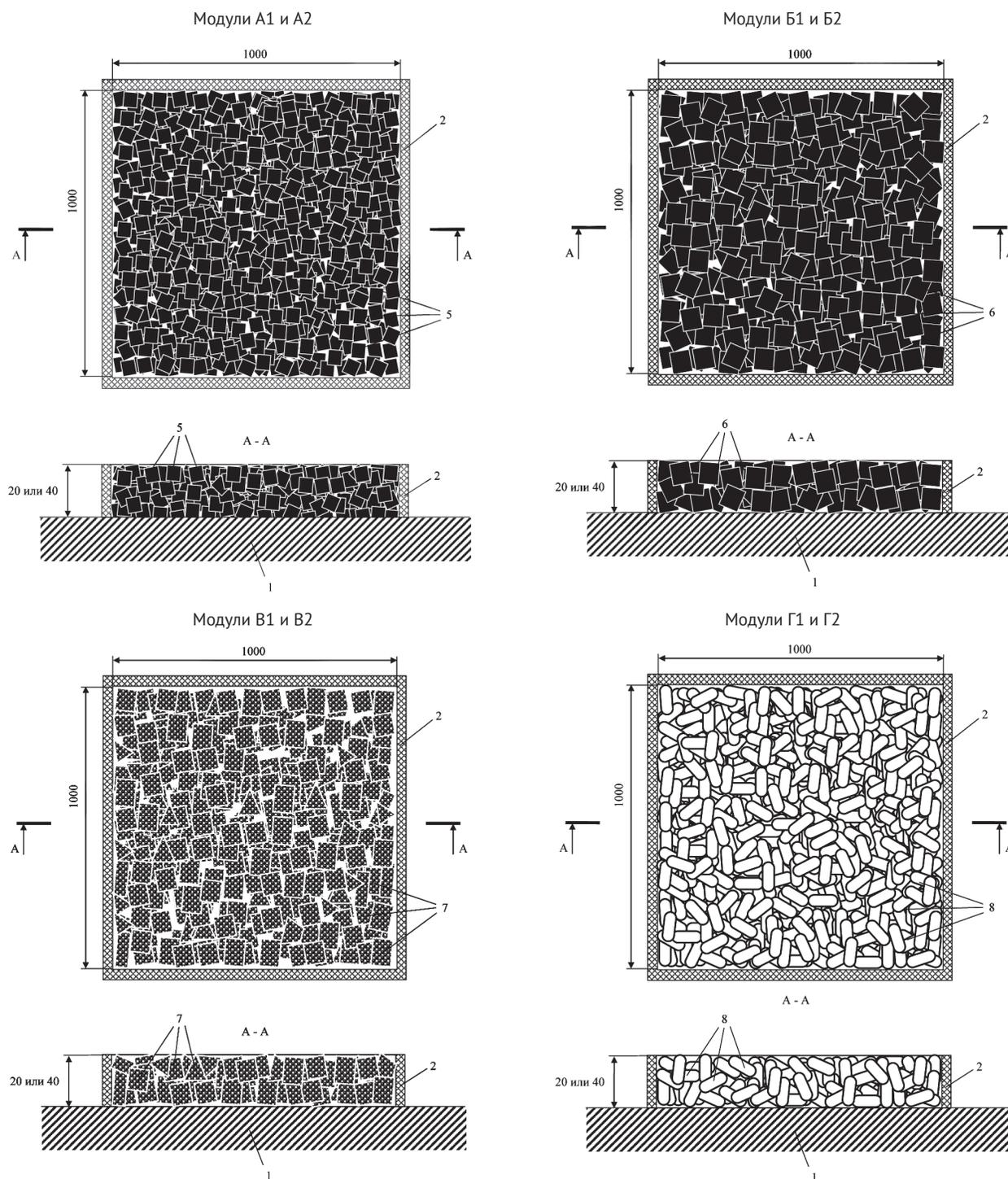
Таким образом, плотные непористые воздухопродуваемые структуры материалов, характеризующиеся неудовлетворительными звукопоглощающими свойствами, после проведения процедур их фрагментированного дробления, могут быть преобразованы в пористые слои воздухопродуваемых структур, наделенных высоким звукопоглощением.

При увеличенных габаритных размерах составных дробленых фрагментированных частей формируется также дополнительный дифракционный краевой механизм сопутствующего рассеяния (поглощения) энергии звуковых волн, возникающий при прохождении и диссипации энергии звуковых волн на краевых граневых (реберных) зонах отдельных частиц непористых полимерных дробленых фрагментированных наполнителей. Кроме этого, могут возникать дополнительные энергетические потери при распространении звуковых волн через насыпные воздухопродуваемые структуры такого типа из-за реализуемого эффекта акустической анизотропии. Энергетические потери могут вызываться дополнительным включением в процесс поглощения звуковой энергии твердых неоднородных структур определенных дозированных составов воздухопродуваемых пористых и воздухопродуваемых плотных полимерных материалов, распределенных соответствующим образом в объеме упругой воздушной среды, заключенной в емкости насыпного шумопоглощающего модуля, на путях распространения звуковых волн.

Свойства звукопрозрачности используемых структур несущих звукопрозрачных оболочек в составе насыпных шумопоглощающих модулей наглядно иллюстрируются результатами выполненных экспериментальных исследований на примерах сопоставления значений реверберационного коэффициента звукопоглощения α_r вариантов макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей открытого и закрытого типов.

Таблица 2.

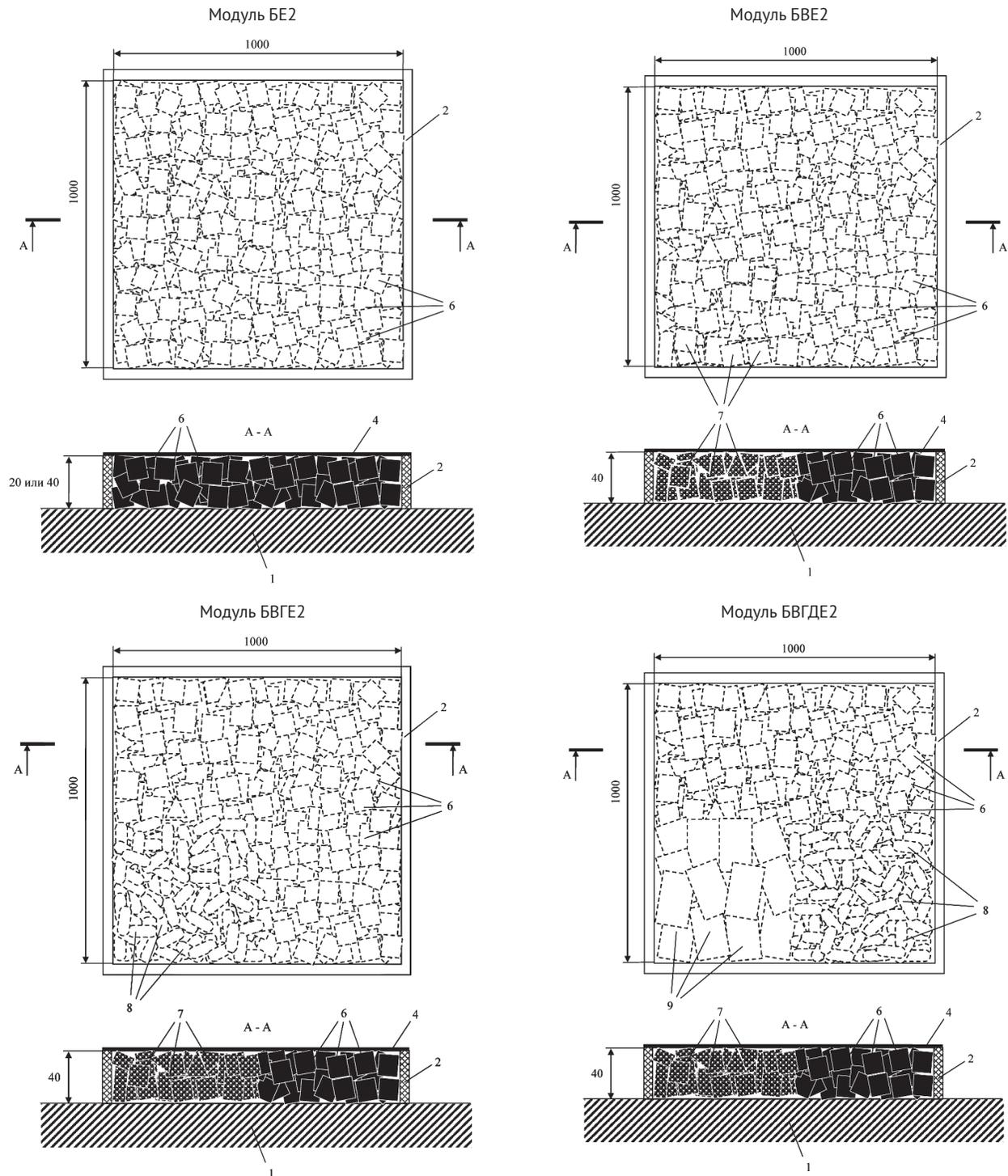
Схема распределения дробленых фрагментированных наполнителей
в составе исследованных шумопоглощающих модулей открытого типа



1 – поверхность пола реверберационной камеры «Кабина Альфа»; 2 – звукоотражающие торцевые элементы, формирующие площадь лицевой поверхности 1 м²; 5 – резиновая крошка 1–3 мм; 6 – резиновая крошка 3–8 мм; 7 – пластиковые чипсы 3–10 мм; 8 – пластиковые гранулы 2–4 мм

Таблица 3

Схема распределения дробленых фрагментированных наполнителей
в составе исследованных шумопоглощающих модулей закрытого типа



1 – поверхность пола реверберационной камеры «Кабина Альфа»; 2 – звукоотражающие торцевые элементы, формирующие площадь лицевой поверхности 1 м²; 4 – несущая звукопрозрачная оболочка; 5 – резиновая крошка 1–3 мм; 6 – резиновая крошка 3–8 мм; 7 – пластиковые чипсы 3–10 мм; 8 – пластиковые гранулы 2–4 мм; 9 – открытоячеистый ППУ 100×50×25 мм

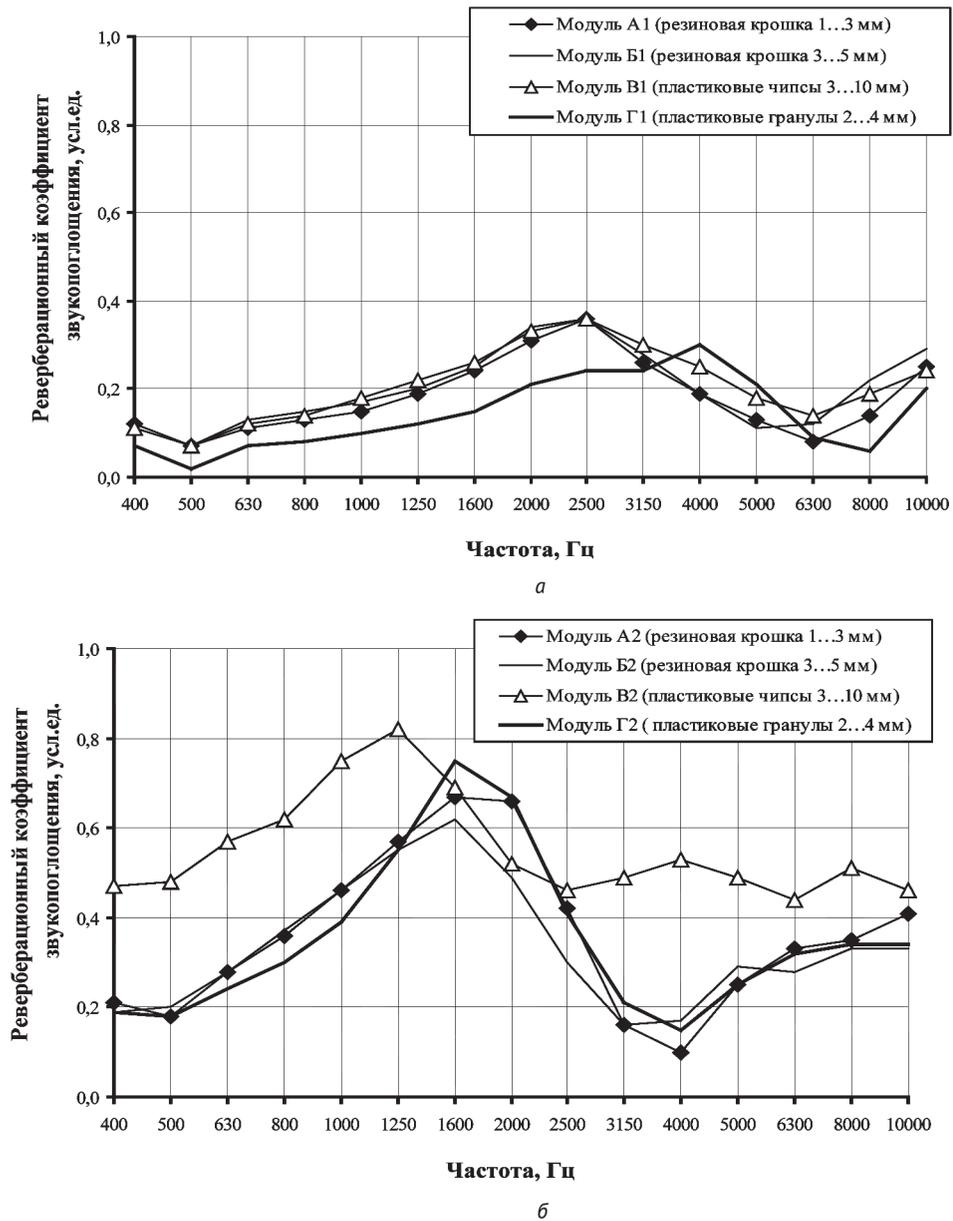


Рис. 2. Результаты определения реверберационного коэффициента звукопоглощения макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей открытого типа, толщина воздухопродуваемого слоя звукопоглощающей структуры 20 мм (а) и 40 мм (б)

Как следует из результатов исследований, представленных на рис. 3, использование макетных образцов закрытых шумопоглощающих модулей с применением защитной звукопрозрачной алюминизированной полиэстеровой пленки толщиной 0,012 мм, обеспечивает увеличение значений реверберационного коэффициента звукопоглощения α , до 0,1 усл. ед. в диапазоне частот 400–1250 Гц и третьоктавной полосе частот со среднегеометрическим центром 4000 Гц. При этом, в диапазонах частот 1600–2500 Гц и 5000–10000 Гц отмечается снижение реверберационного коэффициента звукопоглощения на величину до 0,21 усл. ед.

Для оценки акустической эффективности макетных образцов, в которых содержались непористые полимерные дробленые фрагментированные наполнители, образованные дробленой резиновой крошкой (размерами 3–8 мм) дозировано вводились дробленые фрагменты других типов плотных непористых полимерных частиц материалов. Как свидетельствуют результаты исследований, представленные на рис. 4, замещение в базовом составе (макетный модуль БЕ2) 50% объема дробленой резиновой крошки пластиковыми чипсами размера 3–10 мм (макетный модуль БВЕ2), обеспечивает

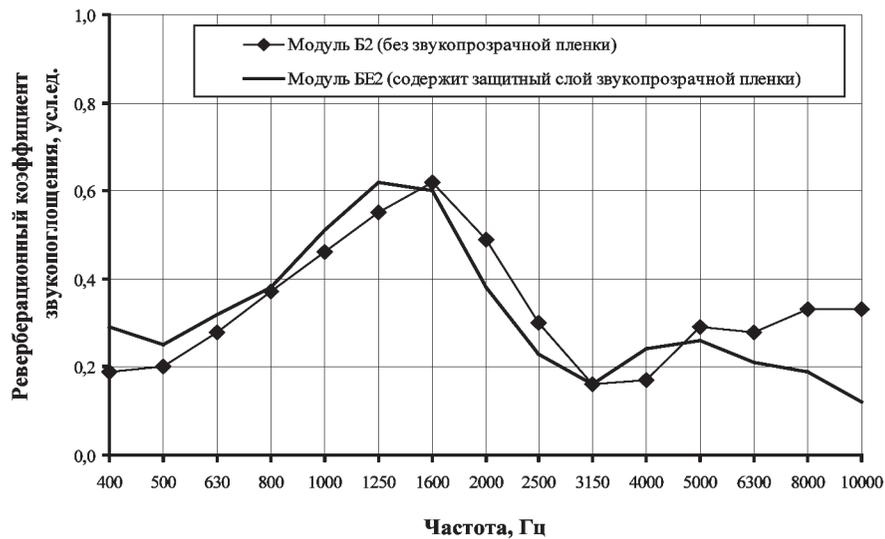


Рис. 3. Реверберационный коэффициент звукопоглощения α_r макетных образцов открытого (модуль Б2) и закрытого (модуль БЕ2) насыпных шумопоглощающих модулей, заполненных дробленой резиновой крошкой габаритных размеров 3–8 мм

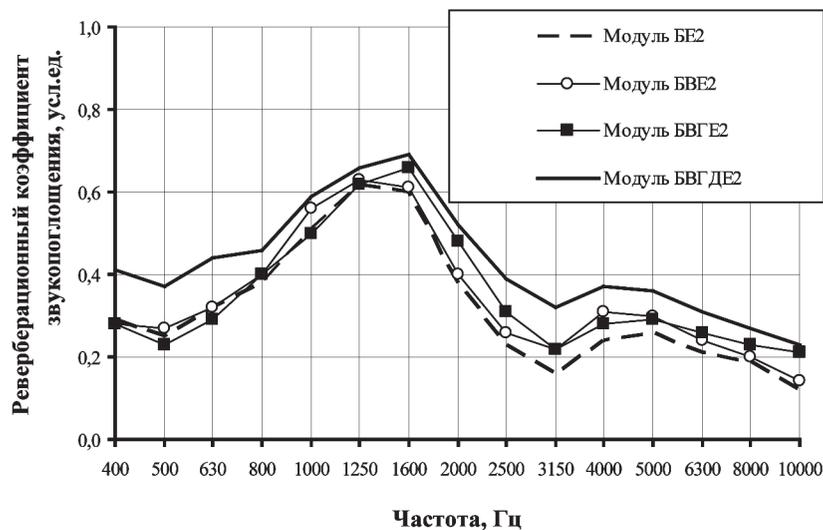


Рис. 4. Реверберационный коэффициент звукопоглощения α_r насыпных шумопоглощающих модулей закрытого типа, звукопоглощающая структура которых образована составами частиц дозированных смесей фрагментированных наполнителей, составленных из различного типа полимерных структур материалов

несущественное (до 0,07 усл. ед.) увеличение реверберационного коэффициента звукопоглощения α_r в диапазоне частот 500–10000 Гц. В это же время, замещение в базовом объемном составе 50% частиц дробленой резиновой крошки 25% объемом полимерных чипсов и 25% объемом полимерных гранул (макетный модуль БВГЕ2), позволяет дополнительно увеличить реверберационный коэффициент звукопоглощения α_r в диапазоне частот 1600–10000 Гц относительно сопоставляемого базового состава смеси на 0,1 усл. ед. Дополнительное замещение базового объемного состава 25% дробленой рези-

новой крошки соответствующим объемом частиц дробленых элементов из открытоячейстого пенополиуретана (макетный модуль БВГДЕ2), вызывает увеличение реверберационного коэффициента звукопоглощения α_r сопоставляемого базового состава смеси на 0,16 усл. ед. в исследуемом диапазоне частот 400–10000 Гц (см. рис. 4).

Весьма эффективным является использование дробленых фрагментированных наполнителей из непористых полимерных воздушнонепродуваемых структур материалов в составе насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа, образо-

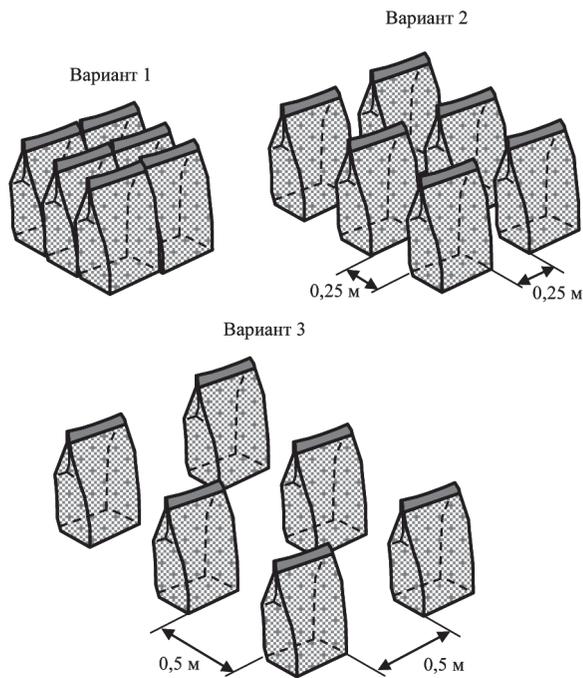


Рис. 5. Пространственные схемы размещения трех исследованных вариантов макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа на поверхности пола малой реверберационной камеры «Кабина Альфа»

ванных замкнутой несущей формообразующей звукопрозрачной оболочкой, выполненной из рулонного полимерного пленочного, тканевого или нетканого волокнистого материала, в полость которой помещен дробленый фрагментированный непористый поли-

мерный наполнитель. Для иллюстрации достигаемой акустической эффективности насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа приведены результаты исследований шести макетных образцов (размерами 0,40×0,15×0,10 м), располагаемых беззазорно на поверхности пола реверберационной камеры «Кабина Альфа» (вариант 1), и располагаемых с различными воздушными промежутками (0,25 мм и 0,5 мм) между противоположными торцевыми поверхностями модулей (варианты 2 и 3, см. рис. 5). Звукопоглощающая структура исследованных макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа была образована дробленой резиновой крошкой габаритными размерами 3–8 мм.

Как свидетельствуют приведенные результаты исследований (см. рис. 6) размещение на плоской ограниченной поверхности площадью 1 м² (макетный модуль БЕ2) дробленого фрагментированного наполнителя, составленного из непористых полимерных воздухонепродуваемых структур, помещенных в емкости беззазорно расположенных макетных образцов насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа, вызывает дополнительное увеличение эквивалентной площади звукопоглощения A в диапазоне частот 400–800 Гц на величину до 0,47 м², а в диапазоне частот 2000–10000 Гц на 0,24–0,52 м² относительно сопоставляемого слоеного варианта равномерного распределения аналогичного количества и качественного состава фрагментированного наполнителя.

Включение в процесс поглощения звуковой энергии боковых поверхностей пакетированных шумопоглощающих модулей (установка их с воздушным

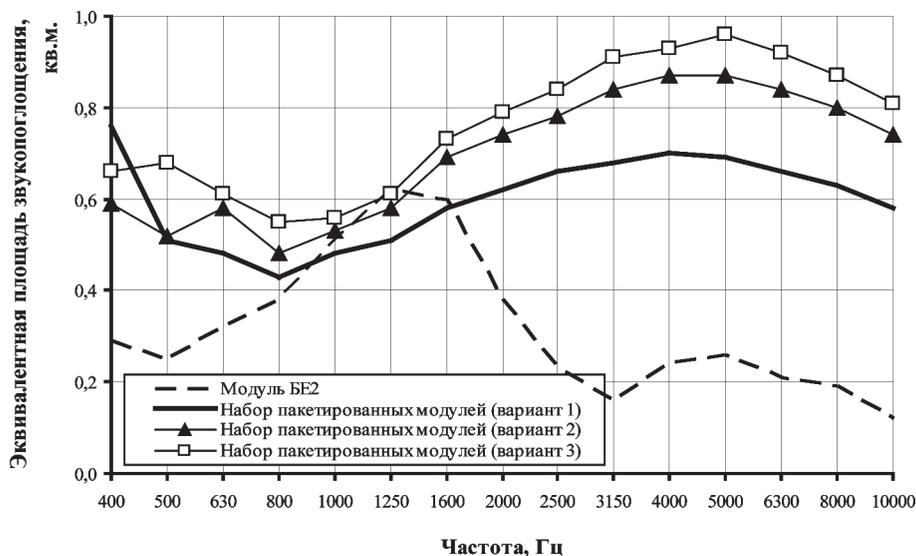


Рис. 6. Эквивалентная площадь звукопоглощения A исследованных вариантов макетных образцов закрытых насыпных шумопоглощающих модулей пакетированного типа

зазором 0,25 м, согласно представленного варианта 2) позволяет дополнительно повысить эквивалентную площадь звукопоглощения A на величину до 0,18 м² в диапазоне частот 630–10000 Гц. Последующее увеличение воздушных зазоров между боковыми поверхностями стенок пакетированных шумопоглощающих модулей в два раза (до 0,5 м – согласно варианта 3) дополнительно повышает эффективность поглощения звуковой энергии в исследуемом диапазоне частот 400–10000 Гц на величину до 0,16 м².

3. Выводы

Таким образом, потенциально возможное освоение промышленного производства предлагаемых концепций технических устройств типа насыпных шумопоглощающих модулей, как и другого аналогичного типа разнообразных шумопонижающих устройств, применительно к объектам транспортного машиностроения, строительной индустрии, бытовой

техники, использующих звукопоглощающее полуфабрикатное сырье в виде дробленых фрагментированных наполнителей, произведенных из соответствующих утилизируемых полимерных структур, позволяет осуществить принцип рационализации: «Произведем больше полезного, лучшего качества – из меньшего и дешевого, устраняя вредное». Это подразумевает расходование меньшего количества исходного дорогостоящего углеводородного сырья путем его компенсации замещения утилизируемыми твердыми отходами полимерных материалов, реализуемого соответствующей технологической рециклированной переработкой, с получением оригинальных звукопоглощающих веществ, наделенных улучшенными звукопоглощающими, экологическими и стоимостными свойствами, которые могут быть в последующем использованы в составе разнообразных эффективных шумопонижающих устройств, применяемых в шумогенерирующих технических объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Greiner R. DaimlerChrysler – Contribution to sustainable mobility // Proceeding Rieter Automotive Conference. – 2005. – P2. – P. 1–8.
2. Scherubl B., Hintermann M. Application of natural fibre reinforced plastics for automotive exterior parts, with a focus on underfloor systems // Proceeding Rieter Automotive Conference. – 2005. – P3. – P. 1–11.
3. Schiavone F., Pierini M., Eckert V., Lesage G. From Life-Cycle Assessment to systematic integration of environmental criteria inside product development process: a research activity towards eco-efficiency and eco-innovation // Proceeding Rieter Automotive Conference. – 2005. – P4. – P. 1–20.
4. Baroggi J.L., Lassartesses R., Richet S., Boyer A., Casulli J., Stopin G. End of life vehicle recycling: Rieter's contribution // Proceeding Rieter Automotive Conference. – 2005. – P5. – P. 1–18.
5. Miyadera K. Creating Sustainable Mobility // Proceeding Rieter Automotive Conference. – 2007. – A1. – P. 1–16.
6. Автомобильные акустические материалы: Проектирование и исследование низкошумных конструкций автотранспортных средств: монография. [В 2 ч.]. Ч. 1 / М.И. Фесина [и др.]: ТГУ, 2010. – 303 с.
7. Практические приемы повышения звукопоглощающих свойств материалов и конструкций деталей машин: учеб.-метод. пособие / М.И. Фесина, А.В. Краснов, Л.Н. Горина: ТГУ, 2012. – 227 с.

Acoustic Efficiency of Shredded Nonporous Polymeric Materials as a Part of Bulk Noise-Attenuating Modules

A.V. Krasnov, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Togliatti State University

M.I. Fesina, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Togliatti State University

L.N. Gorina, Pro-Rector, Doctor of Pedagogy, Professor, Togliatti State University

The results of researches related to acoustic efficiency of shredded nonporous polymeric structures from the solid waste used as a part of bulk noise-attenuating modules are presented in this work. The air-tight structures of materials subjected to corresponding technological procedures of crushing with formation of semi-finished products, in particular, in the form of rubber crumb, film chips and polymeric granules are considered. The reached improvements of sound-absorbing efficiency of bulk noise-attenuating modules' model samples are analyzed. Ecological and cost advantages of use of the noise-attenuating devices containing shredded porous sound-absorbing structures have been noted.

Keywords: raw material resources, shredded nonporous and porous polymeric structures bearing sound transparent covers, sound-absorbing properties, ecological safety.