

УДК 62-758.34

Е.М. Шульдешов¹, В.В. Лепешкин¹, М.М. Платонов¹, А.М. Романов¹**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В РАСШИРЕННОМ ДО 15 кГц ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-45-49

Исследован коэффициент затухания в диапазоне частот от 6 до 15 кГц для образцов звукопоглощающих полимерных композиционных материалов. Описаны особенности измерения коэффициента затухания образцов. Дано описание стенда для проведения измерений коэффициента затухания звукопоглощающих материалов и методики расчета, необходимой для получения вышеописанных характеристик. Определена точность метода измерения.

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: звукопоглощающий материал, коэффициент затухания, звуковая волна, интенсивность.

This article is devoted to attenuation coefficient research in the range of frequencies from 6 to 15 kHz for samples of sound-proof polymeric composite materials. Features of measurement of attenuation coefficient of samples are described. The stand for carrying out measurements of attenuation coefficient of sound-proof materials is described. The calculation procedure necessary for obtaining of the above described characteristics is described. Accuracy of method of measurement is determined.

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

Keywords: sound-proof material, attenuation coefficient, sound wave, intensity.

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

Введение

В настоящее время во всем мире идет интенсивное технологическое развитие, обусловленное стремлением ряда стран, включая Россию, к переходу к шестому технологическому укладу [2]. Наиболее интенсивное развитие наблюдается в высокотехнологичных отраслях – например, в авиастроении [1, 3, 4]. Так, полимерные композиционные материалы (ПКМ) как конструкционного [5], так и функционального назначения [6] активно используют во всех секторах экономики. В авиастроении данные материалы получили максимально широкое распространение, поскольку позволяют существенно снизить весовые характеристики изделий и, как следствие, увеличить экономичность и экологичность современных летательных аппаратов. Интенсивное развитие привело также к возрастанию влияния на человека вредных факторов – шума и электромагнитного излучения [7]. Особую актуальность приобрели вопросы защиты человека от данных видов негативного воздействия, одним из которых является

применение звуко- [8, 9] и вибропоглощающих [10–12] материалов для снижения шума и радиопоглощающих материалов [13] – для снижения электромагнитного излучения.

Определяющим фактором при разработке и эксплуатации является возможность определения характеристик материала [14–16]. Так, если в случае с радиопоглощающими материалами существуют методы оценки характеристик, охватывающие широкий диапазон частот [17, 18], то стандартная аппаратура, серийно поставляемая производителями акустического оборудования для определения характеристик материалов, ограничена частотой 6400 Гц. В связи с этим расширение возможности определения акустических характеристик до 15 кГц является важной задачей.

Материалы и методы

В данной работе предложен метод измерения коэффициента затухания в диапазоне частот от 6 до 15 кГц для акустических звукопоглощающих полимерных композиционных материалов

(ПКМ). Основной физической величиной, характеризующей поле звуковой волны определенной частоты в пространстве или в конкретной среде, является амплитуда переменного давления P , измеряемая в Н/м^2 . При сложении нескольких звуковых волн приходится учитывать не только максимальную величину давления, но и фазу колебания, поэтому амплитуда переменного давления P выражается комплексным числом. Максимальное значение давления – модуль комплексной амплитуды – обозначается $|P|$ и используется при расчете энергетических характеристик. Второй важнейшей характеристикой звуковой волны является скорость перемещения частиц среды u , связанная с переменным давлением соотношением $P/ρu = Z_b$, где Z_b – волновое сопротивление среды. В средах без потерь энергии Z_b – действительная величина, равная $ρ \cdot c$ (где $ρ$ – плотность среды, кг/м^3 ; c – скорость распространения звука в данной среде, м/с), а величины P и u – синфазны. В общем случае среды со звукопоглощением характеризуются входным сопротивлением Z_b (т. е. комплексной величиной), определяющимся выражением $Z_b = Z'_b + i \cdot Z''_b$ (где Z'_b и Z''_b – соответственно действительная и мнимые части Z_b ; i – мнимая единица). Энергетической характеристикой звуковой волны является интенсивность I – изменение энергии звуковой волны в единицу времени (мощность) на единицу площади (Вт/м^2). В среде без потерь

$$I = \frac{|P|^2}{2\rho c}, \quad (1)$$

с потерями

$$I = \frac{|P|^2}{2|Z_b|^2} Z'_b. \quad (2)$$

В отличие от давления и скорости перемещения частиц, интенсивность – действительная величина. Одной из важнейших физических величин, влияющих на процесс распространения и поглощения звуковых волн в среде, является комплексная постоянная распространения $\gamma = \omega/c - i\beta$ (где ω – круговая частота колебаний; c – скорость распространения звука в среде; β – постоянная затухания, существенно влияющая на звукопоглощение материала).

Степени звукоизоляции и звукопоглощения плоскопараллельного образца заданной толщины d характеризуются коэффициентом прохождения $K_{\text{пр}}$, который определяется как отношение комплексной амплитуды давления звуковой волны $P_{\text{пр}}$, прошедшей через образец, к комплексной амплитуде давления падающей звуковой волны $P_{\text{пад}}$ на входе образца. Количественно степень звукоизоляции определяется модулем коэффициента прохождения $|K_{\text{пр}}|$ или его квадратом – коэффициентом прохождения по интенсивности $|K_{\text{пр}}|^2$, который равен отношению интенсивности прошедшей через образец звуковой волны к интен-

сивности падающей волны. Отражение от образца характеризуется комплексным коэффициентом отражения $K_{\text{отр}}$, определяемым как отношение комплексной амплитуды давления отраженной от образца звуковой волны $P_{\text{отр}}$ к комплексной амплитуде давления падающей на образец звуковой волны $P_{\text{пад}}$. Количественно степень отражения характеризуется модулем коэффициента отражения $|K_{\text{отр}}|$ или коэффициентом отражения по интенсивности (по мощности), равным $|K_{\text{отр}}|^2$ и определяемым как отношение интенсивности энергии отраженной звуковой волны к соответствующей величине падающей. Коэффициент звукопоглощения образца α определяют как отношение поглощенной образцом энергии или интенсивности к соответствующей величине падающей волны. Из закона сохранения энергии $\alpha = 1 - |K_{\text{пр}}|^2 - |K_{\text{отр}}|^2$. Если образец расположен на абсолютно жесткой подложке, т. е. прохождение отсутствует, то $\alpha = 1 - |K_{\text{отр}}|^2$. При расчетах упомянутых величин в качестве промежуточной величины используют комплексную величину – входной импеданс $Z_{\text{вх}}$, т. е. комплексное отношение на входе образца – P/u . При падении звуковой волны из воздуха на образец

$$K_{\text{отр}} = \frac{Z_{\text{вх}} - \rho_0 c_0}{Z_{\text{вх}} + \rho_0 c_0}, \quad (3)$$

где ρ_0 и c_0 – плотность и скорость распространения звуковой волны в воздухе соответственно.

Метод измерений основан на сравнении спектральных функций сигналов микрофона, принимающего акустический широкополосный сигнал звуковой волны, излучаемой динамической головкой и прошедшей внутри акустической безэховой мини-камеры до микрофона, – без образца и с образцом, расположенным между динамиком и микрофоном.

В диапазоне частот от 6 до 15 кГц звуковая волна, возбуждаемая динамической головкой, практически не отражается стенками, стенки мини-камеры экранируют микрофон от внешних помех и переотражений, что позволяет получать достоверные результаты. В диапазонах, отличных от описанных, на установке, схема которой представлена ниже, достоверность результатов не гарантируется.

Для материалов, обеспечивающих одновременно звукопоглощение и звукоизоляцию, звукоизолирующие свойства в основном определяются затуханием. Это величина уменьшения энергии или интенсивности акустической волны при ее прохождении в звукопоглощающем материале.

Применительно к терминологии плоских волн величина затухания D при прохождении волны из точки А в точку Б, расположенных на входной от источника до выходной плоскости и материала, определяется как отношение квадратов амплитуд давления в точках А и Б: $D = (p_A/p_B)^2$ или в дБ:

$D_{дб}=20\lg(p_A/p_B)$. Эта величина зависит от характеристик материала – мнимой части β (коэффициент затухания) комплексной постоянной распространения волны $\gamma=k-i\beta$ и расстояния d_{AB} между точками А и В, и равна

$$D=\exp\{2\beta d_{AB}\}, \quad (4)$$

или в дБ

$$D_{дб} \cong 8,7\beta d_{AB}. \quad (5)$$

Коэффициент прохождения через образец равен

$$K_{пр} = (1-K_{1,2}^2) \frac{\exp[-i\gamma d]}{1-K_{1,2}^2 \exp[-i2\gamma d]}, \quad (6)$$

где $K_{1,2}$ – коэффициент отражения от границы среды образца с воздухом.

Модуль коэффициента прохождения в соответствии с выражением (6) вычисляется по формуле

$$|K_{пр}| = \left| (1-K_{1,2}^2) \frac{\exp[-\beta d]}{1-K_{1,2}^2 \exp[-i2\gamma d]} \right|. \quad (7)$$

Для образцов из неметаллических материалов, обычно применяемых для звукопоглощения и звукоизоляции

$$|1-K_{1,2}^2 \exp[-i2\gamma d]| \approx 1. \quad (8)$$

На основании выражения (8) можно сделать вывод, что

$$|K_{пр}| \cong |(1-K_{1,2}^2)| \exp[-\beta d], \quad (9)$$

и вычислить постоянную затухания β , измерив $|K_{пр}|$ для образцов разной толщины.

Например, для серии образцов одного и того же материала при различной толщине образцов измеряется величина $|K_{пр1}|, \dots, |K_{прn}|, |K_{прn+1}|, \dots$ при толщине d_1, \dots, d_n, d_{n+1} соответственно, тогда в соответствии с (9)

$$\beta_{n,n+1} \cong \frac{\ln \frac{|K_{прn}|}{|K_{прn+1}|}}{d_{n+1} - d_n}. \quad (10)$$

Затем по формулам (4) или (5) рассчитывается величина затухания D или $D_{дб}$.

Измерения проводятся на стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 1. Усилитель мощности и микрофонный усилитель применяются при измерении свойств материала с большими потерями. При проведении измерений коэффициента затухания в диапазоне частот до 15 кГц в комплект измерительной установки должно входить следующее измерительное оборудование:

- 1 – персональный компьютер;
- 2 – анализатор спектра марки ZET 017-U2.

Основные технические характеристики: количество каналов 2; диапазон частот 0,1–25000 Гц; относительная погрешность установки частоты $\pm 0,1\%$; нестабильность частоты сигнала за 8 ч работы (не более) $\pm 0,01\%$;

3 – усилитель мощности марки LV 102.1;

4 – безэховая мини-камера с уровнем безэховости -20 дБ;

5 – микрофонный усилитель марки RFT 00.011; микрофон измерительный 1-го класса точности МПА-201 – диапазон частот 50–25000 Гц; динамическая головка НТН 8.7 – частотный диапазон 1500–20000 Гц, излучаемая мощность 300 Вт (рис. 2).

Безэховая мини-камера выполнена в виде трубы прямоугольного сечения, состоящей из секции, в которую устанавливается динамическая головка в торце камеры, секции возбуждения звуковых волн, а также секции, принимающей звуковую волну, в которую устанавливается микрофон.

Секция возбуждения звуковых волн (СВ) выполнена из трехслойного звукопоглотителя. Два наружных слоя изготовлены из вспененного асбеста (материал «Изотерм») плотностью 33 и 40 кг/м³, а внутренний – из вспененного базальта (материал типа «Файерест-3») плотностью 20–22 кг/м³. Возможно применение других звукопоглощающих материалов, обеспечивающих коэффициент поглощения не менее 0,9.

Внутренняя полость СВ перед образцом сужается, образуя диафрагму, благодаря которой звуковая волна от динамической головки к микрофону проходит только через центральную часть образца, и тем самым устраняется влияние торцов образца на характеристики продольной волны. Образцы материала должны быть в форме пластины размером 170×175 мм и толщиной до 30 мм. Держатель образца состоит из пяти слоев материала «Изотерм». Секция, принимающая звуковую волну, представляет собой камеру, выполненную из многослойного поглотителя (внутренний слой – материал типа «Файерест-3», остальные – «Изотерм»), в центре которой расположен микрофон. С целью уменьшения влияния задней стенки секции на результаты измерений, микрофон установлен в вершине пирамиды. Выходной сигнал с анализатора спектра через усилитель мощности подаются на динамическую головку, которая под его воздействием возбуждает звуковую волну в СВ. Эта волна проходит через образец, расположенный сразу за диафрагмой СВ, или без него, если образец отсутствует, к микрофону и с него подается на вход анализатора спектра.

Звукопоглощающий материал стенок мини-камеры устраняет влияние внешних помех и самих стенок на результаты измерений. Уровень влияния помех и переотражений оценивался по уровню модуляции прямого сигнала при перемещении микрофона вдоль линии связи. Уровень модуляции составил не более 1%.

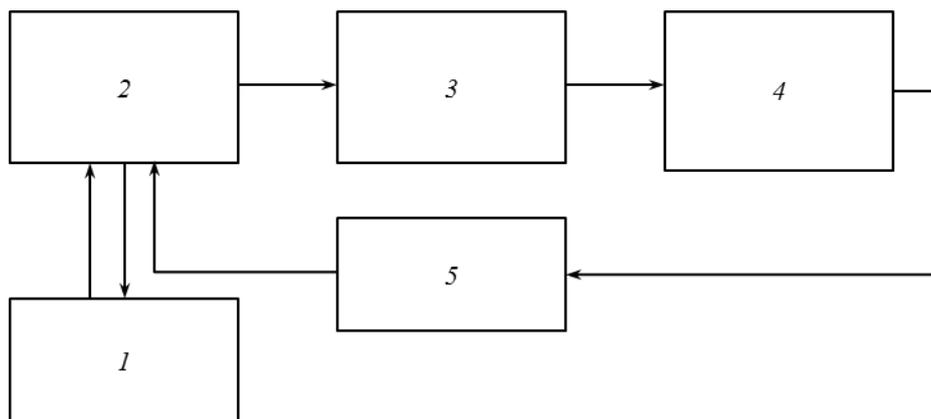


Рис. 1. Функциональная схема стенда для измерений коэффициента прохождения:
 1 – персональный компьютер; 2 – анализатор спектра марки ZET 017-U2; 3 – усилитель мощности; 4 – безэховая мини-камера, в торцах которой установлены динамическая головка и микрофон; 5 – микрофонный усилитель

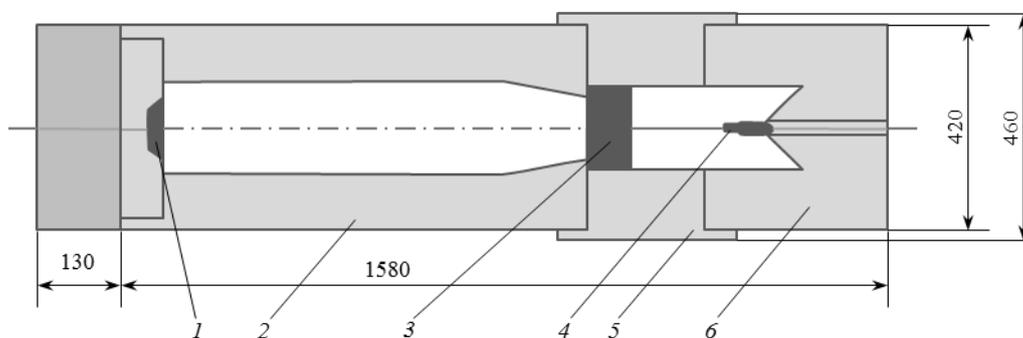


Рис. 2. Безэховая мини-камера:
 1 – секция с динамической головкой; 2 – секция возбуждения звуковых волн; 3 – образец; 4 – микрофон; 5 – держатель образца; 6 – секция, принимающая звуковую волну

Метрологические характеристики метода измерений коэффициента затухания акустических волн

Диапазон измерений	Показатель повторяемости, %	Предел повторяемости, %	Показатель воспроизводимости, %	Предел воспроизводимости, %	Показатель точности (при $p=0,95$), %
От 0,1 до 0,9	4,6	12,75	6,15	15,0	10,5

Результаты и обсуждение

Проведена оценка точности метода. Поскольку неизвестны истинные значения коэффициента затухания и в качестве опорных приняты средние значения по совокупности измерений, то вместо стандартных отклонений приведены оценки, полученные в результате двух серий измерений, по 30 измерений в каждой серии, проводимых в один день, одним оператором, на одной и той же аппаратуре. Методика выполнения измерений обеспечивает получение результатов измерений коэффициента затухания постоянной распространения волны

с метрологическими характеристиками, не превышающими значений, приведенных в таблице.

Применение описанного метода значительно расширит частотный диапазон определения коэффициента затухания, что позволит оценивать поведение материалов на частотах, которые невозможно определить с помощью такого оборудования, как, например, низкочастотный интерферометр, что положительно скажется на процессе разработки и оценки эффективности звукопоглощающих полимерных композиционных материалов.

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. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
5. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. №2. С. 9–14.
6. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.03.2015).
7. Образцова Е.П., Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Юрков Г.Ю. Гибридные функциональные материалы, сочетающие в себе звукопоглощающие и радиопоглощающие свойства // *Материаловедение*. 2016 (в печати).
8. 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: 09.03.2015).
9. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Пористоволокнистый материал сверхнизкой плотности на основе металлических волокон // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 38–41.
10. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 47–49.
11. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Тюменева Т.Ю., Большаков В.А. Влияние клеевого слоя на демпфирующие свойства вибропоглощающего материала на основе термопластичного полиуретана // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. №2. С. 23–27.
12. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А., Долгополов С.С. Влияние армирующего слоя на коэффициент механических потерь вибропоглощающих материалов // *Пластические массы*. 2015. №3–4. С. 13–16.
13. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14.
14. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.03.2015).
15. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 56–63.
16. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 64–68.
17. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля комплексной диэлектрической проницаемости входных слабо наполненных слоев градиентных радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2014. №10. Ст. 11 ([viam-works.ru](http://www.viam-works.ru)).
18. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля коэффициента отражения радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2015. №6. С. 44–48.