

Научная статья

УДК 621:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-85-96

## ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВИАЦИИ Часть 1. Механизм и методы исследования демпфирования полимерных материалов

Н.Г. Павлюкович<sup>1</sup>, М.С. Иванов<sup>1</sup>, Е.А. Борисова<sup>1</sup>,  
В.С. Морозова<sup>1</sup>, В.А. Большаков<sup>1</sup>, И.В. Мекалина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Исследована проблема акустического дискомфорта в салоне самолета, вызванного шумом аэродинамического и структурного происхождения. Основное внимание уделено методам снижения шума с применением вибропоглощающих материалов на основе вязкоупругих полимеров. Рассмотрены физические механизмы диссипации колебательной энергии в полимерах, в частности релаксационные процессы. Описаны современные методы исследования вибропоглощающих характеристик, включая динамический механический анализ, анализ амплитудно-частотных и амплитудно-временных зависимостей.

**Ключевые слова:** авиационный шум, демпфирование, вибропоглощение, вязкоупругие материалы, релаксация, полимерные композиты, испытания шумоподавления, вибро-демпфирующие материалы

**Для цитирования:** Павлюкович Н.Г., Иванов М.С., Борисова Е.А., Морозова В.С., Большаков В.А., Мекалина И.В. Вибропоглощающие материалы для авиации. Часть 1. Механизм и методы исследования демпфирования полимерных материалов // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 85–96. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-85-96.

Scientific article

## VIBRATION ABSORBING MATERIALS FOR AIRCRAFT Part 1. Mechanism and research methods for damping of polymeric materials

N.G. Pavlukovich<sup>1</sup>, M.S. Ivanov<sup>1</sup>, E.A. Borisova<sup>1</sup>,  
V.S. Morozova<sup>1</sup>, V.A. Bolshakov<sup>1</sup>, I.V. Mekalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The paper studies the problem of acoustic discomfort in an airplane cabin caused by noise of aerodynamic and structural origin. The main attention is paid to the methods of noise reduction using vibration-absorbing materials based on viscoelastic polymers. Physical mechanisms of vibration energy dissipation, in particular relaxation processes, in polymers are considered. Modern methods of investigation of vibration-absorbing characteristics are described, including dynamic mechanical analysis, analysis of amplitude-frequency and amplitude-time dependencies.

**Keywords:** aircraft noise, damping, vibration absorption, viscoelastic materials, relaxation, polymer composites, noise reduction tests, vibration-damping materials

**For citation:** Pavlukovich N.G., Ivanov M.S., Borisova E.A., Morozova V.S., Bolshakov V.A., Mekalina I.V. Vibration absorbing materials for aircraft. Part 1. Mechanism and research methods for damping of polymeric materials. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 85–96. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-85-96.

## Введение

Шум в салоне и кабине экипажа является одной из важных экологических характеристик пассажирского самолета. Длительное воздействие шума на человека, характерное для магистральных самолетов, ухудшает самочувствие пассажиров, снижает реакцию и работоспособность членов экипажа. Повышение акустической комфортности внутри авиалайнера является одним из факторов, определяющих его конкурентную способность [1]. Согласно ГОСТ 20296–2014, эквивалентный уровень звука в салоне пассажирского самолета не должен превышать 80–85 дБ *A* на всех этапах полета (взлет, набор высоты, крейсерский режим, снижение, заход на посадку), что соответствует требованиям СанПиН 1.2.3685–21, где предусмотрен предельно допустимый уровень звука 80 дБ *A* в течение 8 ч.

Шумовое поле пассажирского самолета формируется в результате сложного взаимодействия нескольких физических процессов, каждый из которых вносит характерный вклад в общий акустический спектр. Выделяют следующие механизмы генерации аэродинамического шума [2]. Турбулентный пограничный слой формируется на 90 % поверхности фюзеляжа и крыла, вызывает колебания обшивок с частотой 800–3000 Гц, таким образом, уровень звукового давления в салоне пассажирского самолета без применения звуко- и виброизоляции достигает 110 дБ. Низкочастотные составляющие шума (100–1000 Гц) связаны с истечением реактивной струи на взлете (100–500 Гц), возникновением зоны обрыва потока воздуха (появление вихрей) при изменении конфигурации крыла во время взлета или посадки (100–500 Гц), работой валов двигателя, гидравлических приводов и вспомогательных систем (200 Гц). В результате возникают вибрации фюзеляжа пассажирского самолета, создается звуковое давление от 80 до 90 дБ [3]. В итоге на вибрации конструкций пассажирского самолета влияет комплекс аэродинамических и структурных факторов.

Относительный вклад различных источников существенно зависит от режима полета: на взлете доминирует шум реактивной струи двигателя (до 70 %), тогда как во время крейсерского режима возрастает влияние аэродинамического шума (до 60 %). Внутри самолета шум распространяется неравномерно: в носовой части звуковое давление меньше, чем в середине и хвосте самолета. Распределение уровня шума по салону самолета показано на рис. 1.

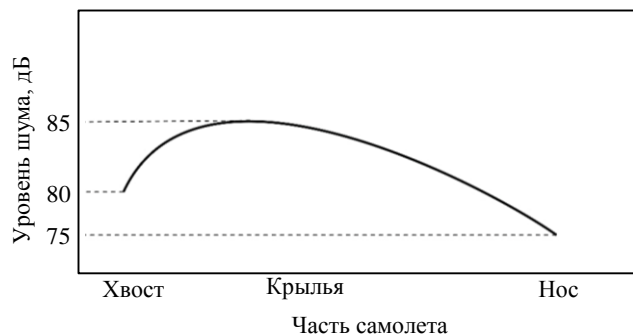


Рис. 1. Распределение шума по салону самолета

Авиационная промышленность использует комплексный подход для уменьшения шума, сочетающий инженерные решения, новые материалы и цифровые технологии [4]. Активно развивающимися направлениями работ по снижению внешнего авиационного шума являются оптимизация конструкций двигателей и их вентиляторов (увеличение степени двухконтурности, широкоходные лопатки вентилятора, сопла с зубчатыми кромками) [5], аэродинамическая модификация крыльев и закрылков для уменьшения турбулентного и вихревого следа [6], методы активного подавления шума на основе антифазных акустических систем [7].

Наиболее распространенным методом снижения шума внутри салона пассажирского самолета до сих пор является использование звуко- и вибропоглощающих материалов [8–10].

Для снижения высокочастотных (1000–5000 Гц) составляющих шума применяют звукопоглощающие материалы, а для низкочастотных (100–1000 Гц) – вибропоглощающие. В качестве звукопоглощающих материалов широко используют пористые и ячеистые структуры, способные эффективно рассеивать акустическую энергию за счет вязкого трения воздуха в порах и многократного переотражения звуковой волны между волокнами и внутри пор [11, 12].

Снижение низкочастотных составляющих шума (вибраций) является крайне сложной задачей, которую решают с помощью полимерных, в том числе многослойных, листовых материалов, обладающих вязкоупругими релаксационными свойствами в необходимом температурном диапазоне (от –60 до +60 °С) [13, 14].

### Теоретические основы вибропоглощения

Высокая эффективность применения полимерных и композиционных материалов для снижения вибрации (и шума) обусловлена специфической особенностью полимеров, заключающейся в повышенной способности к диссипации внешней энергии [15].

Поглощение колебательной энергии вязкоупругими полимерными материалами связано с релаксационными процессами, при которых макромолекулярная система стремится к термодинамическому равновесию (релаксации) через различные формы меж- и внутримолекулярного движения, сопровождающегося диссипацией энергии [16]. Каждому виду молекулярного движения соответствует релаксационный процесс, характеризующийся определенными значениями энергии активации и времени релаксации [15].

Из-за различного межмолекулярного взаимодействия свободных (время оседлой жизни  $10^{-6}$ – $10^{-4}$  с) и связанных флуктуационной сеткой (время оседлой жизни  $10$ – $10^4$  с) сегментов макромолекул полимер имеет непрерывный спектр времен релаксации [17].

Процесс релаксации представляет собой структурную перестройку вещества под действием внешнего теплового и/или механического воздействия. В результате происходят последовательное поглощение энергии структурными элементами вещества (атомы, функциональные группы, сегменты макромолекул, узлы флуктуационной сетки), их переход в возбужденное энергетическое состояние с повышенной внутренней энергией, а затем релаксация в стабильное состояние с выделением тепла. При этом основная часть энергии расходуется на преодоление межмолекулярного трения [16, 18].

Механические свойства полимера зависят как от его химической природы, а именно от влияния полярности функциональных групп на энергетический барьер конформационного вращения, что определяет жесткость макромолекулы, так и от времени (частоты  $1/t$ ) воздействия силы, связанного со временем релаксации  $\tau$  сегментов макромолекул через критерий Деборы  $D = \tau/t$ , а также от температуры, что выражено через принцип температурно-временной эквивалентности (рис. 2) [17].

Наиболее выраженной зависимостью механических свойств от времени воздействия силы полимер обладает в переходной (из стеклообразного в высокоэластическое состояние) температурной области II (рис. 2, *a*) при условиях, когда преимущественное характерное время релаксации совпадает с периодом  $t$  воздействия силы и критерий Деборы равен 1. В области II большая часть приложенной тепловой и/или механической энергии тратится на преодоление внутреннего трения при перемещении свободных и входящих в узлы флуктуационной сетки сегментов макромолекул, а также на перегруппировку узлов, которые в каждый момент времени не успевают восстановиться полностью. Поэтому напряжение при сокращении меньше, чем при нагружении образца, образуется петля гистерезиса (рис. 3, *a*), ее площадь соответствует потере работы при превращении ее в тепло, которое в основном выделяется за счет внутреннего трения сегментов макромолекул [17, 19].

Для любого релаксационного процесса характерно появление резонансного максимума на кривой температурной зависимости коэффициента механических потерь [17], поэтому при температуре меньше температуры стеклования существуют также менее выраженные вторичные релаксационные переходы, соответствующие конформационному вращению функциональных групп и их частей (рис. 2, б) и связанные с диссипацией энергии, в том числе с ударной вязкостью [16, 17].

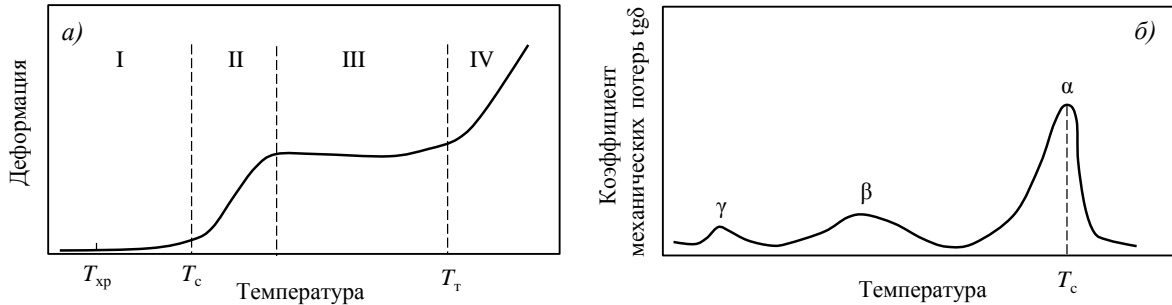


Рис. 2. Термомеханическая кривая аморфного полимера (а), где I–IV – области стеклообразного состояния, переходная, высокоэластического и вязкотекучего состояния,  $T_{xp}$ ,  $T_c$  и  $T_t$  – температуры хрупкости, стеклования и текучести, и соответствующие  $T_c$  и  $T_{xp}$  релаксационные переходы (б) [17]

При многократных циклических деформациях вязкоупругого полимерного тела вследствие релаксационных процессов вектор напряжения отстает от вектора деформации на угол ( $\pi/2 > \delta > 0$ ), при этом вектор деформации  $\epsilon$  совпадает с его действительной частью  $\epsilon'$  и осью абсцисс, а вектор напряжения  $\sigma^*$  раскладывают на действительную  $\sigma'$  и мнимую части  $i\sigma''$  и выражают комплексным числом  $\sigma^* = \sigma' + i\sigma''$  (рис. 3, б). Модуль упругости также выражается комплексным числом  $E^* = E' + iE''$ , а фазовый угол будет соответствовать формуле

$$\text{tg} \delta = \frac{E''}{E'}, \tag{1}$$

где  $E'$  – энергия, которую полимер накапливает при заданной деформации, а потом возвращает при разгрузке;  $E''$  – необратимо потраченная в одном цикле энергия [17, 20].

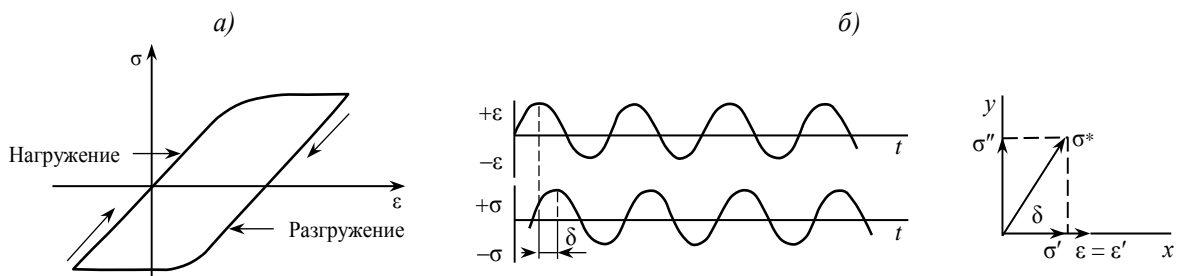


Рис. 3. Этапы нагружения/разгружения (гистерезис) (а), синусоиды напряжения/деформации вязкоупругого полимера и сдвиг по фазе между ними (б):  $\sigma$  – нагрузка;  $\epsilon$  – деформация;  $t$  – время [17]

Важной особенностью демпфированных гармонических колебаний является конечное значение энергии, рассеиваемой за каждый цикл. При воздействии на систему гармонической силы

$$f(t) = F \sin(\omega t), \tag{2}$$

где  $F$  – сила;  $\omega$  – циклическая частота;  $t$  – время,

возникает динамический отклик, описываемый как

$$\varepsilon(t) = A \sin(\omega t + \delta), \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда;  $\delta$  – фазовый угол.

В системе без демпфирования фазовый угол  $\delta$  изменяется скачком от 0 до 180 градусов при прохождении резонансной частоты. Наличие демпфирования приводит к плавному изменению угла  $\delta$ , величина которого существенно зависит от механизма диссипации энергии.

К энергетическим соотношениям за один цикл колебаний относятся:

- энергия, необратимо потраченная в одном цикле  $D = \pi A F \sin \delta$ ;
- накопленная упругая энергия  $U = 0,5 F A \cos \delta$ .

Соотношение  $D/U = 2 \pi \operatorname{tg} \delta$  позволяет ввести коэффициент механических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{D}{2 \pi U} = \frac{E''}{E'}. \quad (4)$$

Отклонение фазового угла  $\delta$  от 0 до 180 градусов и отношение рассеянной энергии к упругой строго соответствуют друг другу, что можно использовать для задания другого способа определения коэффициента механических потерь:

$$\eta = \frac{D}{2 \pi U} = \operatorname{tg} \delta, \quad (5)$$

где  $\eta$  – коэффициент демпфирования;  $\operatorname{tg} \delta$  – коэффициент механических потерь;  $\delta$  – фазовый угол.

### **Характеристики материала, отвечающие за демпфирование**

Исследование вибропоглощающих свойств полимерных материалов требует комплексного подхода, основанного на определении ключевых динамических характеристик. Основными экспериментально получаемыми параметрами демпфирования при циклических деформациях являются:

- коэффициент механических потерь, измеренный методом динамического механического анализа, выраженный через тангенс угла механических потерь и связанный с отношением потерянной и накопленной энергий;
- коэффициент потерь (определенный резонансным методом), связанный с оценкой интенсивности пиков резонансных колебаний;
- логарифмический декремент затухания, связанный с отношением амплитуд затухающих колебаний.

Эти характеристики отражают способность материала рассеивать энергию при циклических деформациях и позволяют количественно оценить его демпфирующую эффективность при различных режимах нагружения. Определение этих характеристик необходимо для анализа поведения полимеров в условиях динамических воздействий и разработки материалов с заданными вибропоглощающими свойствами.

### ***Коэффициент механических потерь (демпфирования), связанный с поглощенной материалом энергией и измеренный методом динамического механического анализа***

Экспериментальное определение коэффициента демпфирования позволяет оценить способность материала гасить вибрации и демпфировать механические колебания, что особенно важно при разработке вибропоглощающих материалов с заданными динамическими характеристиками.

С физической точки зрения коэффициент демпфирования – это отношение рассеянной (потерянной) энергии к упругой (накопленной). Для определения коэффициента демпфирования применяют метод динамического механического анализа [21]. Коэффициент демпфирования приближенно равен коэффициенту механических потерь материала, так как демпфирование осуществляется за счет диссипации энергии в материале (механические потери в свою очередь отражают меру поглощенной материалом энергии). Коэффициент демпфирования, полученный этим методом, показывает, как соотносятся вязкие и упругие свойства материала (формулы (1) и (4)) [22].

Экспериментальные исследования проводят в соответствии с ГОСТ Р 57916–2017, ГОСТ Р 57919–2017, ГОСТ Р 57739–2017 и ГОСТ Р 56801–2015.

**Коэффициент потерь, связанный с резонансной частотой**

Демпфирующие свойства материала определяют амплитуду установившихся колебаний конструкции при гармоническом нагружении в режиме вынужденных колебаний. При приложении периодической силы амплитуда колебаний возрастает до достижения динамического равновесия.

В случае вынужденных колебаний может возникать явление резонанса – резкое увеличение амплитуды колебаний при приближении частоты внешнего воздействия к собственной частоте колебания материала. Для вязкоупругих полимерных материалов это явление описано ранее условиями, при которых критерий Деборы равен 1 и достигается экстремум  $\text{tg}\delta$ .

При отсутствии демпфирования амплитуда вынужденных колебаний при резонансе будет неограниченно возрастать, и система не достигнет динамического равновесия.

В действительности некоторое затухание всегда имеется и приводит систему в динамическое равновесие при амплитудах, значения которых зависят от величины демпфирующих сил. Чем большими демпфирующими свойствами обладает материал, тем меньше амплитуда колебаний при резонансной частоте (рис. 4) [22].

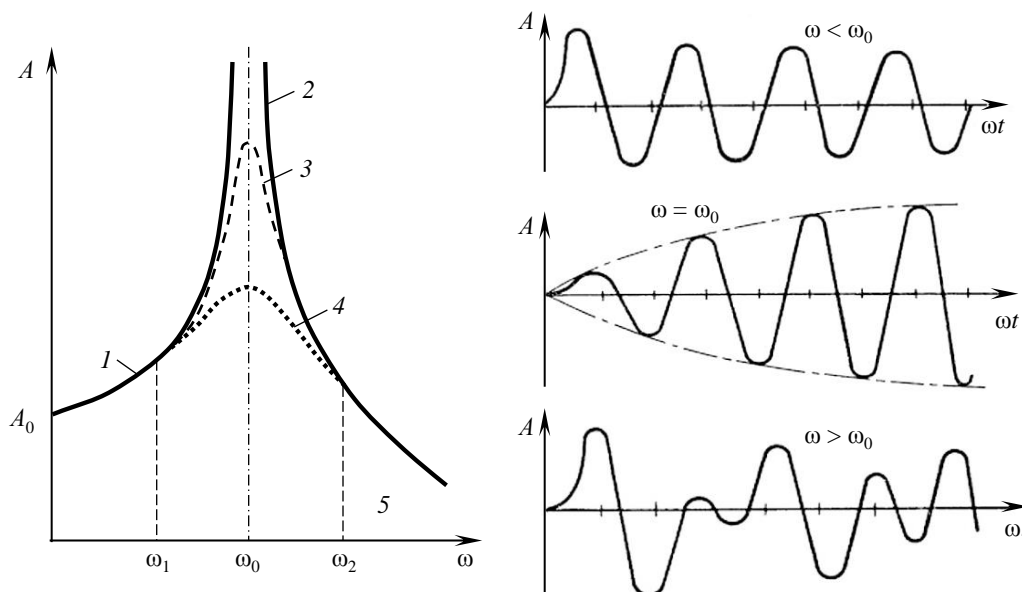


Рис. 4. Влияние демпфирования на вынужденные колебания [22]: 1, 5 – области, на которые не влияет демпфирование; 2 – отсутствие демпфирования; 3 – слабое демпфирование; 4 – сильное демпфирование; A – амплитуда; ω – частота; ω₀ – резонансная частота; t – время

Для частот, значительно больших или значительно меньших, чем резонансная, влияние демпфирования будет низким. Следовательно, демпфирующие свойства материала можно охарактеризовать с помощью величины амплитуды колебания материала при резонансной частоте.

Характеристикой демпфирования, связанной с амплитудой колебания в области резонансной частоты, является полуширина спектральной линии. За полуширину спектральной линии принимают разность частот, которым соответствует уменьшение интенсивности вдвое. Для случая гармонических колебаний интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды ( $I \approx A^2$ ), значит, при уменьшении интенсивности в 2 раза ( $I_1 = I_0/2$ ) амплитуда уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз ( $A_1 = A_0 / \sqrt{2}$ ). Следовательно, полуширину спектральной линии находят по разности частот, которым соответствует уменьшение амплитуды в  $\sqrt{2}$  раз (рис. 5).

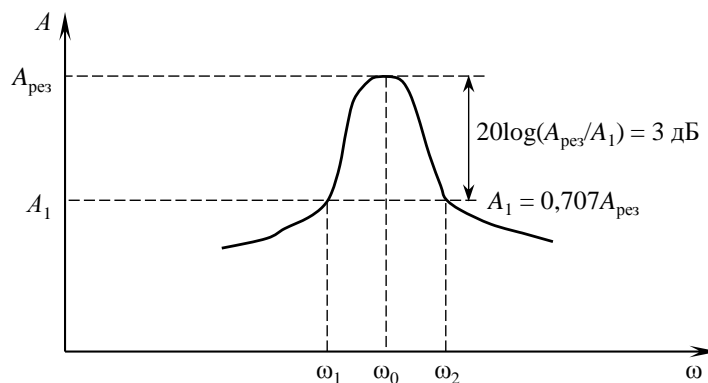


Рис. 5. Определение полуширины спектральной кривой:  $A_{рез}$  – амплитуда при резонансной частоте колебаний  $\omega_0$ ;  $A_1$  – амплитуда в  $\sqrt{2}$  раз меньшая  $A_{рез}$ ;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – частоты колебаний, соответствующие амплитуде  $A_1$

Коэффициент демпфирования, связанный с резонансной частотой, находят по формуле

$$\eta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}, \tag{6}$$

где  $\eta$  – коэффициент демпфирования;  $\omega_0$  – резонансная частота;  $\omega_2$  и  $\omega_1$  – частоты, лежащие справа и слева от резонансной частоты, амплитуды которых меньше резонансной амплитуды в  $1/\sqrt{2}$  раз.

Эта характеристика демпфирования будет однозначной для вязкого демпфирования, которое характерно для полимеров, но при иных типах демпфирования и она будет зависеть от амплитуды колебаний. Таким образом, данный параметр следует использовать с некоторой осторожностью, что, впрочем, относится ко всем характеристикам демпфирования [22].

Для определения данного параметра применяется метод Оберста в режиме вынужденных колебаний. Данная методика, регламентированная стандартами ASTM E756-05, ГОСТ Р 56803–2015 и ГОСТ Р 56801–2015, позволяет экспериментально оценить ключевые динамические характеристики материала. В ходе испытаний анализируется амплитудно-частотная характеристика системы, что позволяет определить коэффициент потерь  $\eta$ , характеризующий демпфирующие свойства материала,

и динамический модуль упругости  $E$ , отражающий жесткостные характеристики [23]. Метод обеспечивает комплексную оценку вибродемпфирующих свойств материалов.

### Логарифмический декремент затухания

Рассмотрим случай свободно затухающих колебаний. При изгибе и последующем освобождении консольной балки возникают затухающие колебания, причем амплитуда каждого последующего цикла уменьшается. В идеальном случае (без потерь) колебания продолжались бы бесконечно (рис. 6, а). В реальных системах всегда присутствуют потери (за счет различных дефектов материала), которые приводят к затуханию колебаний. При наличии в системе вязкого демпфера, создающего силу, пропорциональную скорости, колебания постепенно затухают, но не полностью, теоретически полная остановка требует бесконечного времени (рис. 6, б) [22].

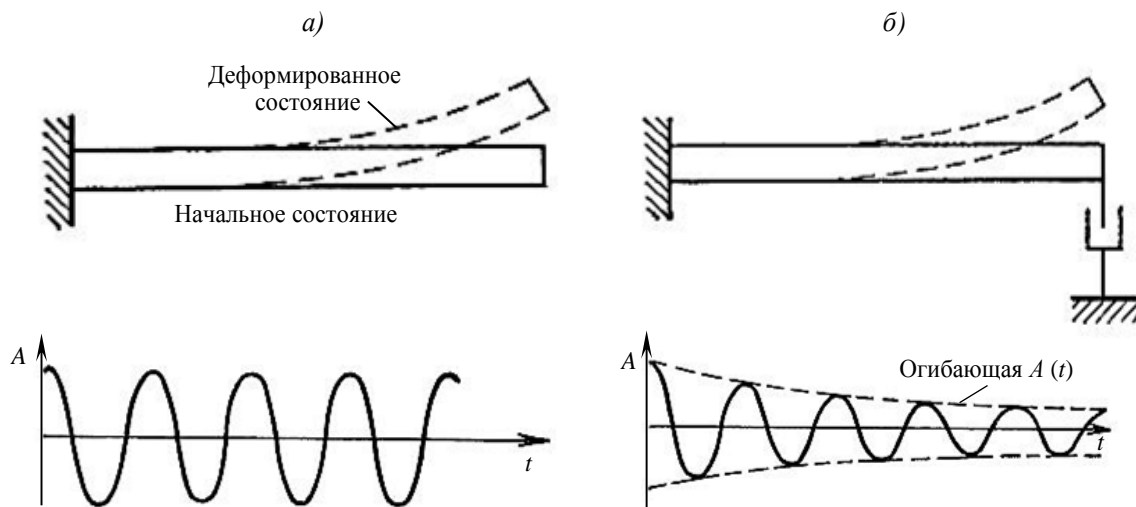


Рис. 6. Влияние демпфирования на свободные колебания [22]: а – балка без демпфирования; б – балка с вязким демпфером ( $A$  – амплитуда)

Скорость затухания колебаний демпфированных конструкций может служить характеристикой демпфирования. Обычно характеристикой затухания указанного типа является логарифмический декремент, т. е. отношение амплитуд  $n$ - и  $(n + N)$ -циклов:

$$\lambda = \frac{1}{N} \ln \frac{A_n}{A_{n+N}}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – логарифмический декремент затухания;  $n, N$  – количество циклов колебаний (мод или форм колебаний);  $A_{n+N}$  – амплитуда колебания  $(n + N)$ -го цикла;  $A_n$  – амплитуда колебания  $n$ -го цикла.

Эта формула хорошо работает в том случае, когда огибающая затухающих колебаний имеет форму экспоненты  $A(t)\exp\{-\delta t\}$ , например, как на рис. 6, б.

Все это относится к случаю вязкого демпфирования, характерного для полимеров, описываемого комплексным модулем и связанного с описанными релаксационными процессами и тангенсом механических потерь [22].

Для определения логарифмического декремента затухания применяют метод крутильного маятника, регламентированный ГОСТ Р 56745–2015 и ГОСТ Р 56801–2015.

### Заключения

Уменьшение шума внутри пассажирского самолета достигается при применении вибро- и звукопоглощающих материалов. Эффективность использования полимерных материалов для снижения вибрации (и структурного шума) обусловлена способностью полимеров к диссипации внешней энергии. Молекулярный механизм поглощения энергии колебаний в полимерах объясняется теорией релаксации, в основе которой лежат процессы перехода полимерной системы к состоянию термодинамического равновесия за счет реализации различных видов молекулярного движения, сопровождающегося потерями энергии.

Наибольший уровень демпфирующих свойств полимеры проявляют в температурной области, где интенсивность теплового движения сегментов достаточна для их перемещения, но недостаточна для свободного следования за деформацией. В этих условиях наблюдаются максимальное внутреннее трение и, соответственно, максимальное поглощение механической энергии. Именно вязкоэластичное состояние, при котором диапазон времен релаксации соответствует характерным скоростям деформации, обеспечивает оптимальные условия для вибропоглощения.

Уровень вибропоглощения материалов характеризуется коэффициентом потерь, на который влияют как диапазон температур, так и частота воздействия силы, что выражено через принцип температурно-временной эквивалентности.

Коэффициент потерь материала, определяющий эффективность гашения вибраций, не является константой и в значительной степени зависит от температуры и частоты колебаний. Максимальные потери механической энергии в полимерах проявляются в области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое, т. е. в области размораживания сегментальной подвижности, положение которой на шкале температур определяется температурой стеклования.

Наиболее информативными методами оценки вибропоглощающих свойств материалов являются динамический механический анализ и резонансный метод Оберста, так как они позволяют учесть зависимость свойств от частоты и температуры.

Данные измерений для одной и той же системы, полученные разными способами, непосредственно сопоставлять нельзя. Это важно учитывать при сравнении результатов экспериментов по определению эффективности демпфирующих устройств, проводимых различными способами.

### Список источников

1. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Долгополов С.С. Исследование демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S3. С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10.
2. Smith M.J.T. *Aircraft noise*. New York, USA: Cambridge University Press, 1989. 369 p.
3. Dennis L. *Huff Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines*. Ohio, USA: National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center Cleveland, 2007. P. 1–10.
4. Боголепов И.И. *Промышленная звукоизоляция*. Л.: Судостроение, 1986. 367 с.
5. Халецкий Ю.Д., Почкин Я.С. Снижение шума вентилятора авиадвигателя путем наклона лопаток спрямляющего аппарата // *Акустический журнал*. 2015. Т. 61. № 1. С. 106.
6. Гайфуллин А.М., Головкин В.А., Головкин М.А. и др. Экспериментально-расчетный подход к решению задачи ослабления вихревого следа // *Аэродинамика летательных аппаратов: материалы XI школы-семинара*. М.: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2000. С. 34–35.
7. Васильев А.В. О принципах классификации систем активной компенсации низкочастотного шума и вибрации // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2006. № 4. Т. 8. С. 1156–1170.

8. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 448 с.
9. Colombo C., Carradó A., Palkowski H. et al. Impact behaviour of 3-layered metal-polymer-metal sandwich panels // *Composite Structures*. 2015. No. 133. P. 140–147.
10. Sokolova O., Carradó A., Palkowski H. Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending // *Composite Structures*. 2011. Vol. 94. Is. 1. P. 1 – 7.
11. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7 (101). С. 59–72. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72.
12. Сагомонова В.А., Целикин В.В. Вибропоглощающий материал с перфорированным армирующим слоем // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 125–133. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
13. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
14. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2017-9140-2020-0-1-45-53.
15. Михайлин Ю.А. Полимерные композиционные материалы (армированные пластики, ВПКМ) // *Технология машиностроения*. 2007. № 3 (57). С. 5–18.
16. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: НОТ, 2010. 822 с.
17. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2007. 367 с.
18. Bergmann J., Stambke M. Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid // *Joints Physics Procedia*. 2012. No. 39. P. 84–91.
19. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). С. 41–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-01-41-50.
20. Glushchenkov V.A., Palkowski H., Yusupov R.Y. et al. A non-destructive method for evaluating the adhesion between the layers of metal-polymer-metal composite materials // *Materiali in Tehnologije*. 2024. Vol. 58. Is. 1. No. 1. P. 3–8.
21. Сагомонова В.А., Долгополов С.С., Сорокин А.Е., Целикин В.В. Оценка возможности применения вибропоглощающего материала на основе полиуретана в качестве уплотнителей // *Труды ВИАМ*. 2021. № 10 (104). С. 28–35. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-28-35.
22. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 3. С. 2–9. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-3-2-9.
23. Harhash M., Gilbert R.-R., Hartmann S. et al. Experimental characterization, analytical and numerical investigations of metal/polymer/metal sandwich composites – Part 2: free bending // *Composite Structures*. 2020. Vol. 232. P. 217–228.

## References

1. Sagomonova V.A., Sytyi Yu.V., Kislyakova V.I., Dolgopolov S.S. Investigation of the damping properties of vibration-absorbing materials based on thermoplastic elastomers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S3, pp. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10.

2. Smith M.J.T. *Aircraft noise*. New York, USA: Cambridge University Press, 1989, 369 p.
3. Dennis L. *Huff Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines*. Ohio, USA: National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center Cleveland, 2007, pp. 1–10.
4. Bogolepov I.I. *Industrial Soundproofing*. Leningrad: Sudostroenie, 1986, 367 p.
5. Khaletskiy Yu.D., Pochkin Ya.S. Reducing Aircraft Engine Fan Noise by Tilting Straightener Blades. *Akusticheskiy zhurnal*, 2015, vol. 61, no. 1, p. 106.
6. Gaifullin A.M., Golovkin V.A., Golovkin M.A. et al. An Experimental and Computational Approach to Solving the Problem of Wake Vortex Attenuation. *Aerodynamics of Aircraft: Proceedings of the XI School-Seminar*. Moscow: TsAGI im. N.E. Zhukovsky, 2000, pp. 34–35.
7. Vasiliev A.V. On the principles of classification of active compensation systems for low-frequency noise and vibration. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2006, no. 4, vol. 8, pp. 1156–1170.
8. Nashif A., Jones D., Henderson J. *Vibration Damping*. Trans. from Engl. Moscow: Mir, 1988, 448 p.
9. Colombo C., Carradó A., Palkowski H. et al. Impact behaviour of 3-layered metal-polymer-metal sandwich panels. *Composite Structures*, 2015, no. 133, pp. 140–147.
10. Sokolova O., Carradó A., Palkowski H. Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*, 2011, vol. 94, is. 1, pp. 1–7.
11. Shuldeshov E.M., Kraev I.D., Obratsova E.P. Materials for sound-proof designs of aircraft engines (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), pp. 59–72. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72.
12. Sagomonova V.A., Tselikin V.V. Vibration damping material with perforated constraining layer. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 125–133. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
13. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
14. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2017-9140-2020-0-1-45-53.
15. Mikhailin Yu.A. Polymer Composite Materials (Reinforced Plastics, VPKM). *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2007, no. 3 (57), pp. 5–18.
16. Mikhailin Yu.A. *Structural Polymer Composite Materials*. 2nd ed., rev. and add. St. Petersburg: NOT, 2010, 822 p.
17. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Chemistry and Physics of Polymers*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: KolosS, 2007, 367 p.
18. Bergmann J., Stambke M. Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid. *Joints Physics Procedia*, 2012, no. 39, pp. 84–91.
19. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 41–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-01-41-50.
20. Glushchenkov V.A., Palkowski H., Yusupov R.Y. et al. A non-destructive method for evaluating the adhesion between the layers of metal-polymer-metal composite materials. *Materiali in Tehnologije*, 2024, vol. 58, is. 1, no. 1, pp. 3–8.
21. Sagomonova V.A., Dolgoplov S.S., Sorokin A.E., Tselikin V.V. Evaluation of vibration-absorbing material based on polyurethane using possibility for a seal. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), pp. 28–35. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-28-35.

22. Kablov E.N., Sagomanova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Study of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9. DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-3-2-9.
23. Harhash M., Gilbert R.-R., Hartmann S. et al. Experimental characterization, analytical and numerical investigations of metal/polymer/metal sandwich composites – Part 2: free bending. *Composite Structures*, 2020, vol. 232, pp. 217–228.

*Информация об авторах*

**Павлюкович Надежда Геннадьевна**, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Иванов Михаил Сергеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Борисова Елена Алексеевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Морозова Вероника Сергеевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Большаков Василий Александрович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Мекалина Ирина Васильевна**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

*Information about the authors*

**Nadezhda G. Pavlukovich**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Mikhail S. Ivanov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Elena A. Borisova**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Veronika S. Morozova**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vasiliy A. Bolshakov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Irina V. Mekalina**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.09.2025.  
The article was submitted 14.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.09.2025.