

Научная статья

УДК 621:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-68-81

ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВИАЦИИ*

Часть 2. Влияние внешних факторов на демпфирующие свойства полимерных материалов в вязкоупругом состоянии

Е.А. Борисова¹, Н.Г. Павлюкович¹, М.С. Иванов¹, В.С. Морозова¹, И.В. Мекалина¹

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

Аннотация. Проведен комплексный анализ факторов, определяющих вибропоглощающую способность полимеров в вязкоупругом состоянии. Проанализировано влияние температуры и частоты на релаксационные свойства полимеров, обосновано применение принципа температурно-временной эквивалентности для прогнозирования поведения материалов в широком частотном интервале. Для регулирования диссипативных свойств описаны такие стратегии модификации полимера, как комбинация нескольких полимеров, изменение фазовой структуры и наполнение полимера.

Ключевые слова: вязкоупругое состояние, вибропоглощение, демпфирование, диссипация, релаксация, вибродемпфирующие материалы, принцип температурно-временной эквивалентности, критерий Деборы

Для цитирования: Борисова Е.А., Павлюкович Н.Г., Иванов М.С., Морозова В.С., Мекалина И.В. Вибропоглощающие материалы для авиации. Часть 2. Влияние внешних факторов на демпфирующие свойства полимерных материалов в вязкоупругом состоянии // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 68–81. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-68-81.

Scientific article

VIBRATION ABSORBING MATERIALS FOR AVIATION

Part 2. The influence of external factors on damping properties of polymer materials in a viscoelastic state

E.A. Borisova¹, N.G. Pavlukovich¹, M.S. Ivanov¹, V.S. Morozova¹, I.V. Mekalina¹

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

Abstract. A comprehensive analysis of the factors determining the vibration-absorbing capacity of polymers in the viscoelastic state has been carried out. The influence of temperature and frequency on the relaxation properties of polymers has been studied, and the application of the time-temperature equivalence principle for predicting material behavior over a wide frequency range has been substantiated. To control dissipative properties, such polymer modification strategies as the combination of several polymers, the creation of the phase structure, and the reinforcement of the polymer with fillers are described.

Keywords: viscoelastic state, vibration absorption, damping, dissipation, relaxation, vibration-damping materials, temperature-time equivalence principle, Deborah criterion

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 3 (157), 2026.

For citation: Borisova E.A., Pavlukovich N.G., Ivanov M.S., Morozova V.S., Mekalina I.V. Vibration absorbing materials for aviation. Part 2. The influence of external factors on damping properties of polymer materials in a viscoelastic state. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 68–81. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-68-81.

Введение

Динамическая усталость материалов является одной из основных причин, ограничивающих ресурс работы конструкций в машиностроении (в авиастроении вибрации негативно влияют в первую очередь на обшивку корпуса, лопадки двигателя самолета, конструкции механизации крыльев и стабилизаторов) [1]. Для увеличения срока эксплуатации инженерных конструкций необходимо снизить их вибрации [2]. Активное развитие транспортного машиностроения, аэрокосмической отрасли и гражданского строительства приводит к повышению спроса на разработку вибропоглощающих материалов с более высокими демпфирующими свойствами [3]. В этом контексте особый интерес представляют полимерные и композиционные материалы, демонстрирующие высокий потенциал к диссипации механической энергии [4–6].

Основным инструментом для решения этой задачи являются полимерные материалы в вязкоупругом состоянии, которые при циклическом нагружении проявляют свойства как упругого твердого тела, так и вязкой жидкости. Их ключевая особенность заключается в способности возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки, но с заметной временной задержкой, что обеспечивает сопротивление последующим циклам вибрации. За счет этой особенности материалы в вязкоупругом состоянии предрасположены к необратимому рассеянию энергии при циклическом деформировании, что проявляется в виде гистерезисных потерь [7]. Демпфирующие характеристики полимеров в значительной степени зависят от внешних условий, прежде всего от температуры и частоты приложенной нагрузки, что требует тщательного анализа и учета при разработке вибропоглощающих материалов [8]. Понимание взаимосвязи между релаксационным поведением полимерной матрицы и ее диссипативной способностью позволяет эффективно управлять свойствами вибропоглощающих материалов.

Данное исследование представляет собой аналитический обзор, направленный на обобщение теоретических и практических принципов разработки вибропоглощающих материалов. Работа является второй частью цикла статей о вибропоглощающих материалах в авиации и посвящена систематизации сведений о влиянии внешних факторов на демпфирующие свойства, а также о современных стратегиях модификации полимеров.

Условие достижения максимального вибропоглощения

Полимерные материалы способны поглощать энергию, а следовательно, и вибрации за счет релаксационных процессов, происходящих в матрице. Для исследования релаксационных явлений применяют статические и динамические методы:

- метод релаксации напряжения – образец полимера деформируют на заданную величину, измеряя зависимость уменьшения напряжения от времени;
- метод ползучести – исследуют зависимость деформации, в том числе остаточной (пластической), от времени при постоянной или переменной нагрузке, в частности в области до предела текучести [9];
- метод ударной вязкости;
- метод циклической деформации.

Макромолекулы полимера за счет большой длины и конформационного энергетического барьера вращения сегментов обладают гибкостью и имеют рыхлую клубкообразную форму. Клубки макромолекул за счет очень малой плотности проникают друг

в друга, образуя флуктуационную сетку [9]. Приложение нагрузки к полимерному образцу инициирует два основных процесса: распад узлов флуктуационной сетки и ориентацию сегментов макромолекул в направлении растяжения [10]. Эти процессы обуславливают интенсивное увеличение напряжений. Если растяжение прекратить на определенной стадии, то в процессе обратного сокращения образца с той же скоростью перегруппировавшиеся узлы не успевают достигнуть полностью равновесного состояния в каждый момент времени. В результате напряжение при сокращении образца оказывается меньше, чем при растяжении, что приводит к формированию петли гистерезиса на диаграмме «напряжение–деформация», как показано на рис. 1 (между кривыми 1' и 3) [9].

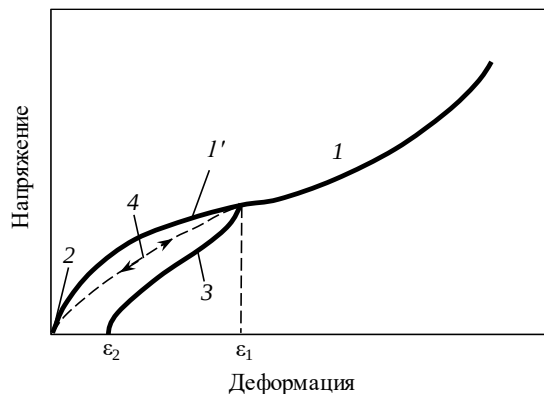


Рис. 1. Петля гистерезиса при напряжении и деформации: 1 – кривая для пространственно-сшитого полимера; 2 – состояние при очень большой скорости деформации; 1' – нагружение; 3 – разгрузка; 4 – нагружение и разгрузка в равновесных условиях; ε_1 , ε_2 – деформация в точке максимальной растяжения и после сокращения [9]

Площадь под кривой деформации соответствует работе, затраченной на деформацию. Разница между затраченной при растяжении и возвращенной при сокращении работами количественно равна площади петли гистерезиса и представляет собой рассеянную энергию. Потери механической энергии обусловлены внутренним трением между сегментами макромолекул и выделяются в виде тепла [9, 11].

Отсутствие петли гистерезиса наблюдается в случаях, когда релаксационные процессы при сокращении успевают пройти полностью. Это происходит при двух крайних режимах деформации [9]:

- при очень высоких скоростях деформации, когда узлы флуктуационной сетки не успевают распасться, а сегменты, сместившись незначительно из положения равновесия, легко возвращаются назад;

- при очень медленных (равновесных) деформациях, когда, несмотря на распад узлов и значительную ориентацию сегментов, благодаря большой продолжительности процесса все структурные элементы успевают вернуться в равновесное состояние.

Для простых релаксирующих систем скорость приближения к равновесию пропорциональна отклонению системы от равновесия. Рассмотрим релаксирующую систему с точки зрения изменения напряжений, тогда скорость перехода к равновесному состоянию пропорциональна напряжению:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\tau}\sigma, \quad (1)$$

где σ – напряжение в образце; $d\sigma/dt$ – скорость релаксации напряжения; $1/\tau$ – коэффициент пропорциональности, зависящий главным образом от структуры и свойств исследуемой системы.

Решаем дифференциальное уравнение первого порядка с помощью разделения переменных и интегрирования (от 0 до t и от σ_0 до σ), в результате получаем:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

Это уравнение помогает понять физический смысл параметра τ . Пусть $t = \tau$, тогда $\sigma = \sigma_0/e$, т. е. τ – время, за которое начальное напряжение уменьшилось в e раз. Константу τ принято называть временем релаксации.

Под действием напряжения σ в материале возникает деформация

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{эл}} + \varepsilon_{\text{вязк}} \Rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_{\text{эл}}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{\text{вязк}}}{dt}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{эл}}$ – упругая (эластическая) деформация; $\varepsilon_{\text{вязк}}$ – пластическая (вязкая) деформация.

Простейшей моделью, описывающей поведение вязкоупругого тела, является модель Максвелла. Данная модель представляет собой последовательное соединение двух элементов: идеально упругой пружины и поршня в идеальной вязкой жидкости, для которых характерны полностью обратимая и полностью необратимая деформация соответственно. Упругие свойства пружины характеризуются модулем упругости E , а жидкость в поршне – коэффициентом динамической вязкости μ .

Упругая деформация в пружине определяется по закону Гука:

$$\varepsilon_{\text{эл}} = \frac{1}{E} \sigma, \quad (4)$$

а скорость нарастания деформации – по формуле

$$\frac{d\varepsilon_{\text{эл}}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (5)$$

Вязкая деформация определяется по закону Ньютона, согласно которому чем больше напряжение, тем больше скорость течения $\dot{\gamma}$:

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{d\varepsilon_{\text{вязк}}}{dt} \Rightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{вязк}}}{dt} = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (3) получено общее уравнение деформации вязкоупругого тела:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu}. \quad (7)$$

В случае релаксации напряжения деформация постоянна ($\varepsilon = \text{const}$), а значит, $d\varepsilon/dt = 0$. Тогда уравнение (7) будет выглядеть следующим образом:

$$0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu} \text{ или } \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{E}{\mu} \sigma. \quad (8)$$

Сравнив уравнения (1) и (8), получим

$$\tau = \frac{\mu}{E}. \quad (9)$$

В случае вибрации происходят многократные циклические колебания деформации, запишем выражение для деформации, которая меняется во времени:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}, \quad (10)$$

где ω – циклическая частота колебания деформации; ε_0 – амплитуда деформации.

Следовательно, скорость деформации выражается следующим уравнением:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = i\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t}. \quad (11)$$

Подставим уравнение (11) в выражение (7):

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{E}{\mu} \sigma(t) = iE\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t}. \quad (12)$$

Зависимость (12) выражает линейную вязкоупругость, напряжение прямо пропорционально деформации. Это справедливо и для переменных во времени напряжения и деформации, когда коэффициент пропорциональности (комплексный модуль упругости E^*) зависит от частоты $i\omega$:

$$\sigma(t) = E^*(i\omega) \varepsilon(t). \quad (13)$$

Подставим выражение (10) в формулу (13):

$$\sigma(t) = E^*(i\omega) \varepsilon_0 e^{i\omega t}. \quad (14)$$

Возьмем производную от $\sigma(t)$ по времени и, используя выражение (11), получим:

$$\frac{d\sigma}{dt} = E^*(i\omega) \frac{d\varepsilon}{dt} = E^*(i\omega) i\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t}. \quad (15)$$

Подставим выражения (14) и (15) в уравнение (12):

$$E^*(i\omega) i\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t} + \frac{E}{\mu} E^*(i\omega) \varepsilon_0 e^{i\omega t} = iE\omega \varepsilon_0 e^{i\omega t}. \quad (16)$$

Сократим уравнение (16) и выразим из него $E^*(i\omega)$:

$$E^*(i\omega) = \frac{i\omega \mu E}{i\omega \mu + E}. \quad (17)$$

Умножим числитель и знаменатель выражения (17) на разность $E - i\mu\omega$ и выделим из полученного выражения две части – действительную и мнимую:

$$E^*(i\omega) = \frac{i\omega \mu E}{i\omega \mu + E} \cdot \frac{E - i\mu\omega}{E - i\mu\omega} = \frac{\mu^2 \omega^2 E + iE^2 \mu \omega}{E^2 + \mu^2 \omega^2} = \frac{\mu^2 \omega^2 E}{E^2 + \mu^2 \omega^2} + i \frac{E^2 \mu \omega}{E^2 + \mu^2 \omega^2}. \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что

$$E'(i\omega) = \frac{\mu^2 \omega^2 E}{E^2 + \mu^2 \omega^2}, \quad (19)$$

$$E''(i\omega) = i \frac{E^2 \mu \omega}{E^2 + \mu^2 \omega^2}. \quad (20)$$

Выражение (20) соответствует модулю потерь. Найдем максимальные потери, для этого возьмем производную от E'' по ω и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dE''(i\omega)}{d\omega} = \frac{E^2 \mu (E^2 + \mu^2 \omega^2) - E^2 \mu \omega (2\mu^2 \omega)}{(E^2 + \mu^2 \omega^2)^2} = \frac{E^2 \mu (E^2 - \mu^2 \omega^2)}{(E^2 + \mu^2 \omega^2)^2} = 0 \Rightarrow E^2 - \mu^2 \omega^2 = 0 \Rightarrow \omega = \frac{E}{\mu}. \quad (21)$$

Подставим выражение (21) в уравнение (20):

$$E'' = i \frac{E^3}{E^2 + E^2} = i \frac{E}{2}. \quad (22)$$

Максимум потерь достигается при $\omega = E/\mu$ и $E'' = 0,5E$, на рис. 2 приведена зависимость компонентов модуля упругости от частоты. Значение E' показывает, сколько энергии полимер накапливает при заданной деформации, а потом возвращает при разгрузке; E'' – сколько энергии необратимо потрачено в одном цикле деформации.

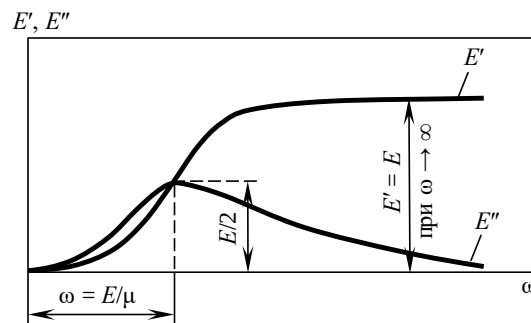


Рис. 2. Зависимости компонентов модуля упругости E от частоты: E' – динамический модуль упругости; E'' – модуль потерь; μ – коэффициент динамической вязкости; ω – циклическая частота

Частота – величина обратная времени, т. е. $\omega = 1/t = E/\mu \Rightarrow t = \mu/E$, следовательно, максимальные потери достигаются при времени деформации $t = \mu/E$. Согласно выражению (9), $\mu/E = \tau$. Таким образом, максимальные гистерезисные потери достигаются при $t = \tau$.

Для описания механических свойств полимера ключевое значение имеет соотношение между временем релаксации материала τ и временем действия внешней силы t . Это соотношение характеризуется критерием Деборы: $D = \tau/t$ [7]. Гистерезисные потери достигают максимума, когда время цикла деформации соизмеримо со временем релаксации материала, т. е. при $t \approx \tau$ и $D \approx 1$ [11, 12].

Демпфирующие свойства изделия зависят как от химической природы материала, которая определяет время релаксации τ , так и от частоты воздействия внешней силы. С помощью критерия Деборы D можно проанализировать взаимосвязь внешних и внутренних факторов, влияющих на демпфирующие свойства полимера, и спрогнозировать поведение полимера в разных условиях [9].

Влияние температуры и частоты на демпфирующие свойства полимерных материалов в вязкоупругом состоянии.

Принцип температурно-временной эквивалентности

Время релаксации τ определяется подвижностью кинетических сегментов макромолекул, которая имеет термически активируемую природу. Зависимость времени релаксации от температуры экспоненциальна и в первом приближении описывается уравнением Эйринга–Френкеля [9]:

$$\tau = \tau_0 e^{U/RT}, \quad (23)$$

где U – энергия активации процесса релаксации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; τ_0 – постоянная (теоретическое время релаксации при бесконечно высокой температуре).

В случае гармонического нагружения время воздействия t связано с циклической частотой ω соотношением

$$t = 1/\omega. \quad (24)$$

Подставим уравнения (23) и (24) в выражение для критерия Деборы:

$$D = \frac{\tau}{t} = \omega \tau_0 e^{U/RT}. \quad (25)$$

Уравнение (25) показывает, что зависимость критерия Деборы от температуры экспоненциальная, а от частоты – линейная.

Температура выступает ключевым внешним параметром, определяющим механическое состояние полимера и его демпфирующую способность [13]. На рис. 3, а схематически представлены термомеханические кривые, иллюстрирующие зависимость динамического модуля упругости E' и коэффициента демпфирования η от температуры при постоянной частоте.

На рис. 3, а можно выделить четыре характерные области [8]:

- стеклообразное состояние – высокое значение E' и низкие значения η , с увеличением температуры E' незначительно уменьшается;
- переходная (переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние) – уровень E' резко снижается на несколько порядков, а значение η достигает максимума, что соответствует наиболее эффективному демпфированию. Температура максимума потерь близка к температуре стеклования T_g ;
- высокоэластическое состояние – значения E' и η стабилизируются на относительно низких уровнях, слабо зависящих от температуры;
- вязкотекучее состояние – уровень E' вновь резко снижается, а величина η может демонстрировать вторичное увеличение для термопластов и стекловидных эмалей.

Частота нагружения оказывает качественно аналогичное влияние (рис. 3, б). Повышение частоты приводит к монотонному увеличению динамического модуля упругости E' . Коэффициент демпфирования возрастает при увеличении частоты в эластичной области, достигает пика в переходной зоне и снижается в стеклообразном состоянии [14].

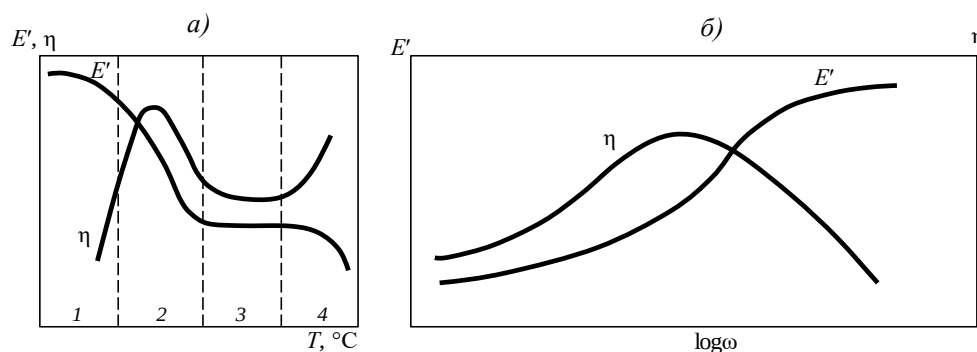


Рис. 3. Зависимости динамического модуля упругости E' и коэффициента демпфирования η от температуры T (а) и частоты колебаний ω (б) [14]: 1 – область стеклообразного состояния; 2 – переходная область; 3 – область высокоэластического состояния; 4 – область вязкотекучего состояния

Важно отметить, что повышение частоты вызывает изменения механических и демпфирующих характеристик, аналогичные изменениям, протекающим при снижении температуры, что подчеркивает глубокую фундаментальную связь временных и температурных эффектов в релаксационных процессах [9, 15].

Обобщение этих зависимостей иллюстрирует рис. 4, на котором представлены зависимости деформации ε и коэффициента демпфирования η от температуры при различных частотах (или от частоты при различных температурах).

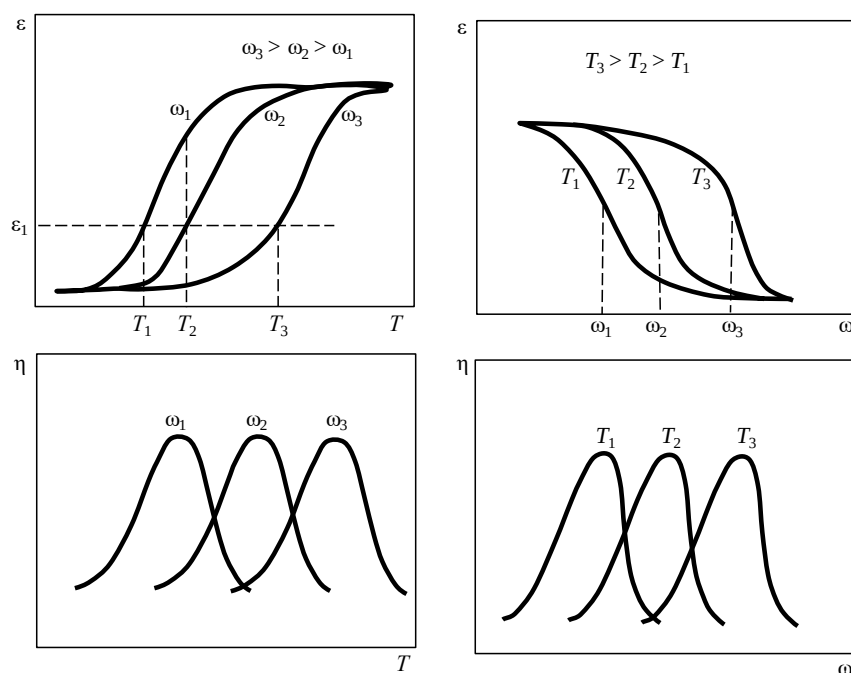


Рис. 4. Изменение амплитуды деформации ε и коэффициента демпфирования η от частоты ω и температуры T [9]

Анализ показывает, что повышение частоты нагружения (с ω_1 до ω_2) смещает релаксационный переход (зона максимального η или резкого снижения E') в область более высоких температур (с T_1 до T_2) [9]. Это объясняется тем, что при большей частоте сегментам полимерной цепи требуется более высокая термическая подвижность (достигаемая при увеличении температуры) для успешной реориентации за сократившийся период цикла нагрузки [9, 16].

Наблюдаемая симметрия и взаимное соответствие кривых, полученных при варьировании температуры и частоты, являются прямым следствием принципа температурно-временной эквивалентности [11, 17]. Согласно этому принципу, одинаковые механические состояния материала могут быть достигнуты изменением как температуры, так и времени цикла нагрузки (частоты) [18]. Это позволяет строить обобщенные релаксационные или резонансные кривые и предсказывать поведение материала в широком диапазоне времени или частот по данным, полученным в ограниченном интервале [19].

Построение обобщенной кривой осуществляется в рамках метода приведенных переменных [20]. Одна из изотермических кривых, соответствующая произвольно выбранной базовой (приведенной) температуре $T_{пр}$, принимается за опорную. Кривые, полученные при других температурах, сдвигаются относительно нее по оси частот на величину логарифма температурного коэффициента сдвига $\log a_T$. Выбор $T_{пр}$ не является строго фиксированным, однако на практике часто используют температуру, близкую к температуре стеклования материала или превышающую ее на $\sim 50^\circ\text{C}$ [21, 22].

Применимость метода температурно-временной эквивалентности демонстрируют экспериментальные данные. Например, для композиционных материалов на основе

поливинилацетата показано, что изменение частоты с 1 до 10 Гц смещает релаксационные характеристики в область более высоких температур на величину $\Delta T \approx 6-7^\circ\text{C}$, а изменение с 10 до 100 Гц – на $\Delta T \approx 8-9^\circ\text{C}$ [16, 23]. Такие сдвиги согласуются с принципом температурно-временной эквивалентности и подтверждают возможность прогнозирования свойств материалов в расширенных частотных диапазонах на основе ограниченного набора изотермических измерений.

Зависимость демпфирующих свойств материалов в вязкоупругом состоянии от амплитуды циклической деформации

Зависимость демпфирующих свойств полимеров от амплитуды циклических деформаций аналогична их зависимости от температуры. Зависимости динамического модуля упругости и коэффициента демпфирования от амплитуды деформации представлены на рис. 5.

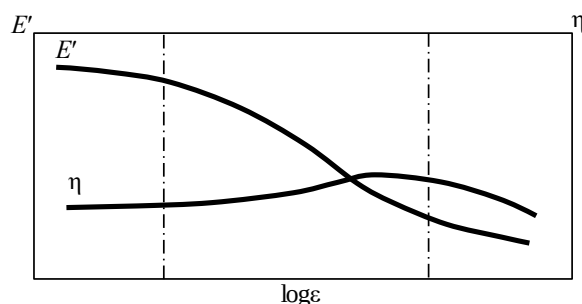


Рис. 5. Зависимости динамического модуля упругости E' и коэффициента демпфирования η от амплитуды деформации ε [14]

Динамический модуль упругости уменьшается при возрастании амплитуды колебаний. Коэффициент демпфирования сначала возрастает до максимального значения, а затем уменьшается с повышением амплитуды колебаний.

Комбинирование демпфирующих материалов

Традиционные гомополимеры, статистические сополимеры и термодинамически совместимые смеси полимеров характеризуются высокими коэффициентами демпфирования, однако обладают относительно узким диапазоном времени релаксации [24]. Это приводит к интенсивному, но локализованному поглощению колебательной энергии в узких интервалах температур и частот, что является принципиальным ограничением их применения в качестве демпфирующих материалов [24, 25]. В связи с этим актуальной задачей является разработка подходов к расширению рабочего температурно-частотного диапазона при сохранении высокой диссипативной способности. С этой целью используют макро- (конструкционный) и микроскопический (морфологический) подходы.

Наиболее простым методом расширения температурно-частотного диапазона является создание композиционных систем из полимерных материалов, пики демпфирования которых расположены в различных температурных областях (конструкционный подход) [14]. Эффективность такого подхода подтверждается расчетами, показывающими расширение температурно-частотного диапазона для комбинации двух термопластов с различающимися температурами максимумов потерь, как показано на рис. 6, а [26]. Конструктивная реализация может включать как многослойное («сэндвич») расположение материалов, так и их рациональное пространственное распределение по демпфируемой поверхности с учетом геометрических параметров конструкции [27].

Альтернативной стратегией является изменение фазовой и/или химической структуры полимера (морфологический подход). Изменить фазовую структуру полимера можно с помощью создания в объеме одного материала микрогетерогенной структуры с несколькими релаксационными переходами, что приводит к расширению спектра времени релаксации, как показано на рис. 6, б [8, 25]. К традиционным методам формирования такой морфологии относятся: смешение химически несоединимых полимеров, комбинирование двух или более сетчатых полимеров с образованием взаимопроникающих полимерных сеток, синтез блок-сополимеров [25, 28], пластификация (введение низкомолекулярных пластификаторов) или химическое сшивание макромолекулярных цепей. Кроме того, перспективным направлением модификации полимерной матрицы является введение дисперсных наполнителей [29, 30], которые способствуют повышению температуры стеклования композитов и смещению пиков демпфирующих свойств полимера в сторону более высоких температур [31, 32].

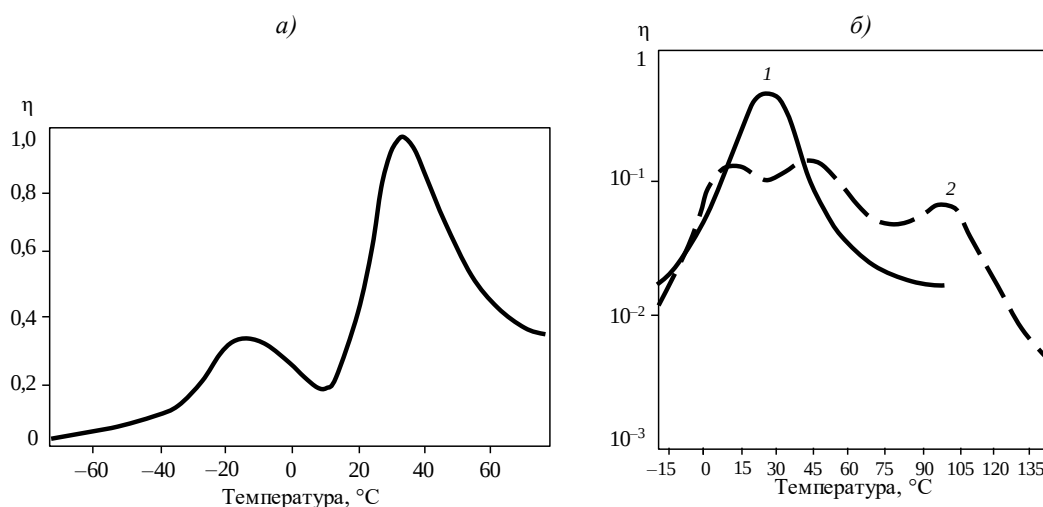


Рис. 6. Влияние модификации материалов на коэффициент демпфирования η различных полимерных композиций при использовании макро- (а) [26] и микроскопического (б) [14] подходов: 1 – однородный материал; 2 – полимерная смесь

Выбор стратегии модификации вибропоглощающих материалов определяется требованиями к рабочим температурно-частотным диапазонам и необходимому уровню диссипации энергии в конкретных условиях эксплуатации.

Заключения

Эффективность вибропоглощения полимерных материалов определяется фундаментальным соотношением между временем релаксации материала τ и характерным временем внешнего воздействия t . Максимальная диссипация энергии наблюдается при совпадении этих параметров ($t \approx \tau$), когда критерий Деборы $D = \tau/t \approx 1$, что объясняет критическую зависимость демпфирующих свойств от температуры и частоты нагружения.

Основными внешними факторами, влияющими на диссипативные свойства полимерных материалов, являются температура и частота внешнего воздействия. Показано, что зависимость критерия Деборы от температуры экспоненциальная, а от частоты – линейная.

Принцип температурно-временной эквивалентности является эффективным инструментом для прогнозирования демпфирующих характеристик в широком эксплуатационном диапазоне. Он позволяет моделировать поведение материала при различных частотах и температурах на основе ограниченного набора экспериментальных данных, что необходимо для инженерного проектирования.

Для расширения рабочего диапазона вибропоглощающих полимерных материалов эффективны две стратегии: макроскопическое комбинирование различных полимерных материалов в конструкции и микроскопическое изменение структуры полимера. Первый подход позволяет получить композиционный слоистый материал с высокими пиковыми значениями демпфирования в нескольких температурных областях. С помощью второго подхода может быть смещена и расширена рабочая температурная область вибропоглощающего материала, однако максимальное значение коэффициента демпфирования может быть снижено. Введение дисперсных наполнителей в полимерную матрицу позволяет сместить температуру максимального демпфирования в область больших значений.

Таким образом, управление демпфирующими характеристиками требует комплексного подхода, основанного на глубоком понимании релаксационных процессов. Совместное применение рассмотренных стратегий открывает путь к созданию высокоэффективных демпфирующих систем с заданными свойствами для ответственных инженерных применений, например, в авиации.

Список источников

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
2. Ионов А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000. 368 с.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
4. Bert C.W. Composite materials: a survey of damping capacity of fiber reinforced composites // Damping Applications for Vibration Control / ed. P.J. Torvik. New York, 1980. P. 53–63.
5. Gibson R.F. Dynamic mechanical properties of advanced composite materials and structures: a Review // Shock & Vibration Digest. 1987. Vol. 19. No. 7. P. 13–22.
6. Зиновьев П.А., Ермаков Ю.Н. Характеристики рассеяния энергии при колебаниях в элементах конструкций из волокнистых композитов (обзор). М.: ЦНИИ науч.-техн. информ., 1989. 76 с.
7. Corcaro R.D., Sperling L.H. Relation of polymer chemical composition to acoustic damping // Sound and vibration damping with polymers: ACS Symposium series. Washington: American Chemical Society, 1990. Vol. 424. P. 317–345. DOI: 10.1021/bk-1990-0424.
8. Mohan D. Rao Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 262. Is. 3. P. 457–474. DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00106-8.
9. Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2007. 367 с.
10. Колесников В.И., Чернышев С.Л., Колесников И.В. и др. Модернизация фрикционного низкоамплитудного демпфера с вакуумным ионно-плазменным покрытием рабочих поверхностей трения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 106–118. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-106-118.
11. 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> (дата обращения: 30.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-85-96.
12. Иванов М.С., Кулезнев В.Н. Испытание падающим грузом полиэтиленов трубных марок // Пластические массы. 2016. № 11–12. С. 23–26.
13. Смирнов С.В., Мясникова М.В. Использование упруговязкопластической модели для описания реологического поведения материала полимерного покрытия при индентировании // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). С. 78–89. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-78-89.

14. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 448 с.
15. Jones D.I.G. On temperature-frequency analysis of polymer dynamic mechanical behaviour // Journal of Sound and Vibration. 1990. Vol. 140. Is. 1. P. 85–102.
16. Скуратова Т.Б., Кириллов С.Е., Сятковский А.И. Диссипативные свойства полимерных пленок и композитных материалов на основе поливинилацетата // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. № 7. С. 881–887. DOI: 10.1134/S0044461819070090.
17. Иванов М.С., Кулезнев В.Н. Метод механической спектроскопии полиэтилена трубных марок // Труды ВИАМ. 2016. № 11 (47). С. 68–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-9-9.
18. Комова Н.Н., Потапов Е.Э., Грусков А.Д., Заиков Г.Е. Особенности принципа температурно-временной эквивалентности в полиэтилене низкой плотности, наполненном шунгитом // Вестник МИТХТ. 2013. Т. 8. № 1. С. 24–35.
19. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2010. 557 с.
20. Физическая акустика: в 7 т. / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. Т. 2, ч. Б: Свойства полимеров и нелинейная акустика. 420 с.
21. Бабкина Н.В., Ткалич М.Г., Бровко А.А. Роль температуры приведения при построении обобщенных вязкоупругих функций для прогнозирования демпфирующих свойств эпоксидного полимера // Полимерный журнал. 2015. Т. 37. № 1. С. 34–40.
22. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 536 с.
23. Сятковский А.И., Скуратова Т.Б., Трофимов Д.Н., Мазур А.С. Влияние параметров композитных материалов на основе поливинилацетата на их диссипативные свойства // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 4. С. 575–580. DOI: 10.31857/S004446182004012X.
24. Сятковский А.И. Термопластичные пленочные материалы для демпфирования инженерных конструкций // Пластические массы. 2023. № 9–10. С. 48–50. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-48-52.
25. Chakraborty B.C., Ratna D. Polymer for vibration damping applications. Elsevier, 2020. 348 p.
26. 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.
27. Chen R., Luo H., Wang H., Zhou W. Topology optimization of partial constrained layer damping treatment on plate for maximizing modal loss factors // Composites and Advanced Materials. 2021. Vol. 30. P. 1–19.
28. Саморядов А.В., Калугина Е.В., Битт В.В., Паршиков Ю.Г., Эргашев А.Т. Разработка и исследование свойств композиционных материалов на основе термопластичных гибридных матриц // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 51–68. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-51-68.
29. Шеянов Д.А. Методы регулирования вибропоглощающих свойств полимерных материалов // Научный аспект. 2024. № 1. Т. 43. С. 5615–5621.
30. 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: 28.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
31. Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия, 1979. 440 с.
32. Сагомонова В.А., Иванов М.С., Платонов М.М. и др. Влияние углеродных наноразмерных наполнителей на коэффициент механических потерь композиции из термопластичного полиуретана // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 1. С. 9–14.

References

1. Mikhailin Yu. A. *Structural polymer composite materials*. 2nd ed. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2010, 822 p.

2. Ionov A. V. *Means of reducing vibration and noise on ships*. St. Petersburg: Krylov Central Research Institute, 2000, 368 p.
3. Kablov E. N., Antipov V. V. The role of new-generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Bert C.W. *Composite materials: a survey of damping capacity of fiber reinforced composites. Damping Applications for Vibration Control*. Ed. P.J. Torvik. New York, 1980, pp. 53–63.
5. Gibson R.F. Dynamic mechanical properties of advanced composite materials and structures: a Review. *Shock & Vibration Digest*. 1987, vol. 19, no. 7, pp. 13–22.
6. Zinoviev P.A., Ermakov Yu.N. *Characteristics of energy dissipation during vibrations in structural elements made of fiber composites (review)*. Moscow: Central Research Institute of Scientific and Technical Information, 1989, 76 p.
7. Corcaro R.D., Sperling L.H. Relation of polymer chemical composition to acoustic damping. *Sound and vibration damping with polymers: ACS Symposium series*. Washington: American Chemical Society, 1990, vol. 424, pp. 317–345. DOI: 10.1021/bk-1990-0424.
8. Mohan D. Rao Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 262, is. 3, pp. 457–474. DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00106-8.
9. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Chemistry and physics of polymers*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: KolosS, 2007, 367 p.
10. Kolesnikov V.I., Chernyshev S.L., Kolesnikov I.V. et al. Modernization of the low-amplitude friction damper with vacuum ion-plasma coating of friction working surfaces. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 106–118. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 28, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-106-118.
11. 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> (accessed: May 30, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-85-96.
12. Ivanov M.S., Kuleznev V.N. Drop weight testing of polyethylene pipe grades. *Plasticheskie massy*, 2016, no. 11–12, pp. 23–26.
13. Smirnov S.V., Myasnikova M.V. Adaptation of elastic-viscoplastic model for description of rheology of polymer coating material during indentation. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 78–89. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 28, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-78-89.
14. Nashif A., Jones D., Henderson J. *Damping of Vibrations*. Trans. from Engl. Moscow: Mir, 1988, 448 p.
15. Jones D.I.G. On temperature-frequency analysis of polymer dynamic mechanical behaviour. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, vol. 140, is. 1, pp. 85–102.
16. Skuratova T.B., Kirillov S.E., Syatkovsky A.I. Dissipative properties of polymer films and composite materials based on polyvinyl acetate. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2019, vol. 92, no. 7, pp. 881–887. DOI: 10.1134/S0044461819070090.
17. Ivanov M.S., Kuleznev V.N. Method of mechanical spectroscopy of pipe grades of polyethylene. *Trudy VIAM*, 2016, no. 11 (47), pp. 68–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-9-9.
18. Komova N.N., Potapov E.E., Gruskov A.D., Zaikov G.E. Features of the principle of temperature-time equivalence in low-density polyethylene filled with shungite. *Vestnik MITKhT*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 24–35.
19. Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Rheology: concepts, methods, applications*. St. Petersburg: Profession, 2010, 557 p.
20. *Physical acoustics: in 7 vols*. Ed. W. Mason. Moscow: Mir, 1969, vol. 2, part B: Properties of polymers and nonlinear acoustics, 420 p.
21. Babkina N.V., Tklich M.G., Brovko A.A. The Role of Reference Temperature in Constructing Generalized Viscoelastic Functions for Predicting the Damping Properties of Epoxy Polymers. *Polimernyy zhurnal*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 34–40.

22. Ferry J. *Viscoelastic Properties of Polymers*. Moscow: Foreign Literature Publ. House, 1963, 536 p.
23. Syatkovsky A.I., Skuratova T.B., Trofimov D.N., Mazur A.S. Influence of the Parameters of Polyvinyl Acetate-Based Composite Materials on Their Dissipative Properties. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2020, vol. 93, is. 4, pp. 575–580. DOI: 10.31857/S004446182004012X.
24. Syatkovsky A.I. Thermoplastic film materials for damping engineering structures. *Plasticheskie massy*, 2023, no. 9–10, pp. 48–50. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-48-52.
25. Chakraborty B.C., Ratna D. *Polymer for vibration damping applications*. Elsevier, 2020, 348 p.
26. Sagomonova V.A., Sytyi Yu.V., Kislyakova V.I., Dolgoplov S.S. Investigation of the damping properties of vibration-absorbing materials based on thermoplastic elastomers. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S3, pp. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10.
27. Chen R., Luo H., Wang H., Zhou W. Topology optimization of partial constrained layer damping treatment on plate for maximizing modal loss factors. *Composites and Advanced Materials*, 2021, vol. 30, pp. 1–19.
28. Samoryadov A.V., Kalugina E.V., Bitt V.V., Parshikov Yu.G., Ergashev A.T. Development and research of the properties of composite materials based on thermoplastic hybrid polymer matrix. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 51–68. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 28, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-51-68.
29. Sheyanov D.A. Methods for regulating vibration-absorbing properties of polymeric materials. *Nauchnyy aspekt*, 2024, vol. 43, no. 1, pp. 5615–5621.
30. 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: January 28, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
31. Manson J., Sperling L. *Polymer Mixtures and Composites*. Moscow: Khimiya, 1979, 440 p.
32. Sagomanova V.A., Ivanov M.S., Platonov M.M. et al. Effect of Carbon Nanosized Fillers on the Mechanical Loss Coefficient of Thermoplastic Polyurethane Composites. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2017, no. 1, pp. 9–14.

Информация об авторах

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

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

Морозова Вероника Сергеевна, 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

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

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

Veronika S. Morozova, 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 17.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.05.2026.

The article was submitted 17.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 10.05.2026.