

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЛАГОПРИЯТНОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Владимир Александрович Смирнов^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Российская Федерация;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Российская Федерация

В связи со строительством линий метрополитена мелкого заложения, транспортных магистралей, трамвайных и железнодорожных линий вибрационное воздействие на человека и среду его обитания значительно увеличилось. В настоящее время для защиты от негативного вибрационного воздействия используются как конструкции виброизоляторов, так и различные упругие строительные материалы. От качества материалов зависит в дальнейшем эффективность гашения вибрационных воздействий. Поэтому данная работа направлена на проведение сопоставительной оценки физико-механических характеристик резин при статическом и динамическом сжатии, необходимых для расчетов и конструирования виброизоляторов и сейсмоизоляторов, а также для идентификации феноменологических моделей материала. Исследованы четыре материала: резины марок ИРП-1346 и ИРП-1347, резина марки ТМКШ и композит на основе резиновой крошки (РК), связанной полимерным связующим. Испытания выполнены на пульсаторе при статическом нагружении (управление перемещением) и при гармоническом воздействии с частотами 5, 10 и 20 Гц. По результатам определены удельная нагрузка и относительная деформация, статический модуль упругости, динамическая жесткость, комплексный модуль упругости и его составляющие (E' и E''), фазовый сдвиг, тангенс угла потерь, а также энергетические показатели за цикл. Установлено, что ТМКШ демонстрирует максимальную жесткость в статике и динамике, ИРП-1347 занимает промежуточное положение, ИРП-1346 характеризуется меньшей жесткостью при сопоставимых деформациях, а материал на основе крошки — наименьшей жесткостью и повышенной вариативностью параметров. Показано выраженное влияние амплитуды деформации на E' , E'' и $\tan \delta$, соответствующее нелинейному поведению наполненных эластомеров; при повышении частоты и деформации для ряда материалов возрастает доля потерь, что может быть использовано для повышения демпфирования в вибро- и сейсмозащите при условии контроля температурных и долговременных эффектов.

Ключевые слова: динамические характеристики, модуль упругости, коэффициент потерь, резина, эластомеры, вязкоупругие материалы

Для цитирования: Смирнов В.А. Оценка динамических характеристик вибродемпфирующих материалов для обеспечения благоприятной среды обитания человека // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 4. С. 83–92. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.83-92

EVALUATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER MATERIALS UNDER DYNAMIC LOADS

Vladimir A. Smirnov^{1,2}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
(NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

The aim of this study is to comparatively evaluate the physical and mechanical properties of rubber materials under static and dynamic compression, which is necessary for the calculation and design of vibration and seismic isolators, as well as for the identification of phenomenological models of the material. Four materials were studied: IRP-1346 and IRP-1347 rubber materials, TMKSh rubber material, and a composite based on rubber crumb (RC) bonded with a polymer binder. The tests were performed on a pulsator under static loading (displacement control) and under harmonic action with frequencies of 5, 10, and 20 Hz. Based on the results, the specific load and relative deformation, static elastic modulus, dynamic stiffness, complex elastic modulus and its components (E' and E''), phase shift, loss tangent, and energy indicators per cycle were determined. It was found that TMKSh demonstrates maximum stiffness in statics and dynamics, IRP-1347 occupies an intermediate position, IRP-1346 is characterized by lower stiffness at comparable deformations, and the crumb-based material has the lowest stiffness and increased variability of parameters. A pronounced effect of deformation amplitude on E' , E'' and $\tan \delta$ is shown, corresponding to the nonlinear behavior of filled elastomers; With increasing

frequency and deformation, the loss factor for some materials increases, which can be used to improve damping in vibration and seismic protection, provided that temperature and long-term effects are controlled.

Keywords: dynamic characteristics, elastic modulus, loss factor, rubber, elastomers, viscoelastic materials

For citation: Smirnov V.A. Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Rubber Materials under Dynamic Loads. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2025; 4:83-92. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.4.83-92 (rus.).

Введение

Развитие городской инфраструктуры предусматривает использование транспортных потоков для передвижения людей и доставки всего необходимого для человека — продуктов, предметов быта, одежды и прочего. В условиях плотной застройки транспортные магистрали — линии метрополитена, автомобильные дороги, железнодорожные и трамвайные линии пронизывают наши города. Создаваемые ими вибрационные воздействия негативно влияют на человека, состояние его здоровья, сон и настроение. Поэтому достаточно остро стоит проблема защиты от вибрационных воздействий жилых, офисных и других общественных зданий с целью обеспечения благоприятной и комфортной среды обитания человека. Данные проблемы решаются при использовании различных конструкций виброизоляторов и различных виброизоляционных материалов. От их физико-механических характеристик при статическом и динамическом сжатии зависит качество защиты от вибраций и создание комфортных условий для жизни человека.

Современные вибро- и сейсмоизоляторы широко применяют элементы из резины и эластомеров для защиты зданий, сооружений, машин и оборудования от вибраций и ударных нагрузок [1–4]. Резиновые демпферы способны одновременно снижать передачу вибрации благодаря своей упругости и рассеивать часть энергии колебаний за счет внутреннего трения (гистерезисных потерь в материале) [5–7]. Поэтому для проектирования эффективных виброизоляторов (и сейсмоизоляторов) необходимо знать физико-механические характеристики резин как в статических условиях, так и при динамическом нагружении [1–3, 7]. Требования к определенным указанным характеристикам регламентированы, в том числе ГОСТ 59940–2021 [8].

Статические характеристики (например, модуль упругости при сжатии) важны для оценки несущей способности и начальной жесткости элемента [2, 6, 7]. Однако при реальной эксплуатации резиновые элементы работают в условиях переменных нагрузок — малых колебаний вокруг некоторого статического смещения [6, 9]. В этих условиях проявляются вязкоупругие свойства: резина обладает комплексным модулем, включающим упругую и диссипативную составляющие, что проявляется при испытаниях в виде фазового сдвига между нагрузкой и деформацией [5–7, 9]. В результате динами-

ческая жесткость резины обычно отличается от статической, а часть энергии колебаний рассеивается в виде тепла [6, 7, 10]. Для точных расчетов необходимо учитывать эти эффекты. Существуют стандартизованные методы динамических испытаний резины, позволяющие определить динамический модуль и коэффициент механических потерь (тангенс угла δ) материала [11, 12]. На основе таких данных исследователи разрабатывают феноменологические модели (модели наследственности, многопараметрические модели Максвелла и др.), пригодные для прогнозирования работы резиновых элементов при различных амплитудах и частотах нагружения [9, 10, 13].

Динамическое поведение резины во многом определяется ее структурой и рецептурой. Известно, что наполненные резины проявляют нелинейное амплитудное поведение (эффект Пейна [12–15]): при малых амплитудах колебаний их мгновенная жесткость высока из-за ограничения подвижности каучука сажевым наполнителем, но с ростом амплитуды модуль снижается до некоторого постоянного уровня [14, 16–18]. Кроме того, нагружение резины приводит к частичному разупрочнению (эффект Маллинса [19, 20]), что выражается в уменьшении кривой «напряжение – деформация» при повторном нагружении [15, 18]. Частотная зависимость динамического модуля в области невысоких частот (до десятков Гц) для обычных резин обычно выражена слабо: их динамический модуль и коэффициент потерь мало меняются при изменении частоты нагружения [6, 10, 18]. Тем не менее при более высоких частотах или при особом строении материала (например, пористые или композиционные резины) возможно существенное изменение свойств. В целом предыдущие работы [5, 6, 9, 14] отмечают, что для точного учета свойств резины необходимо экспериментально определять их поведение в диапазоне рабочих амплитуд и частот нагружения.

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка статических и динамических характеристик четырех типов резин: ИРП-1346, ИРП-1347, резины с крошкой (рециклированная дробленая резина на полиуретановом связующем) и промышленной резины марки ТМКШ. Схожие материалы, выполненные на ином сырье, исследованы в работах [4, 21–23]. Представлены состав и области применения этих материалов, проведены испытания образцов на сжатие в статическом

режиме и при гармонических колебаниях (частоты 5, 10 и 20 Гц). Проанализированы модуль упругости при статическом сжатии, динамическая жесткость (коэффициент упругости) при колебаниях, комплексный динамический модуль ($E^* = E' + iE''$) и его составляющие — упругий модуль E' и модуль потерь E'' , а также фазовый сдвиг и тангенс угла механических потерь $\tan \delta = E''/E'$. Выявлены характерные особенности деформирования и энергопоглощающей способности испытанных резин, а также сделаны выводы об их пригодности для применения в виброизоляторах.

Объекты и методика исследования

В работе рассмотрены четыре типа резиновых композиций: две специализированные резины серии ИРП (например, по ТУ 38.0051166–98 [24]), одна рециклированная резина на основе резиновой крошки и техническая резина марки ТМКЩ. Кратко опишем их состав и назначение:

- ИРП-1346. Это резиновая смесь на основе синтетических каучуков СКИ-3 (полиизопрен) и СКД (бутадиеновый каучук). ИРП-1346 относится к мягким морозостойким резинам (твердость ~40–50 ед. Шор А) с высоким относительным удлинением (до 600 %). Она разработана для изготовления резино-металлических амортизаторов и виброизоляторов, эксплуатируемых в воздухе при температурах от –50 до +80 °С. Благодаря комбинации изопренового и бутадиенового каучуков эта смесь обладает высокой эластичностью при низких температурах и хорошей стойкостью к многократным деформациям;

- ИРП-1347. Резиновая смесь, близкая по составу к ИРП-1346 (также основана на изопреновом и бутадиеновом каучуках), но с другими соотношениями компонентов. Марка ИРП-1347 предназначена для тех же условий: она применяется в резиновых амортизаторах и упругих элементах, работающих в среде воздуха, воды, слабых растворов кислот и щелочей. Твердость ИРП-1347 находится в диапазоне ~50–60 ед. Шор А, то есть несколько выше, чем у ИРП-1346. Эта резина сохраняет работоспособность в интервале температур –60...+70 °С и обладает повышенной прочностью связи с металлом и сопротивлением раздиру (необходимыми для надежной работы резинометаллических узлов). Ожидается, что ИРП-1347 будет более жесткой и демпфирующей по сравнению с ИРП-1346 за счет повышенного содержания наполнителя или иных модифицирующих добавок;

- резина с крошкой (РК). Под этим названием подразумевается рециклированный резиновый композиционный материал, полученный методом склеивания дробленой резиновой крошки полиуретановым связующим. Исходным сырьем обычно

служат переработанные отходы шин или технических резин, измельченные до гранул размером 1–5 мм. При смешивании гранул с полиуретановым преполимером и последующем отверждении образуется упругое пористое полотно с гидрофобными свойствами. Подобные материалы широко применяют как ударопоглощающие травмобезопасные покрытия для спортивных и детских площадок, беговых дорожек, зон вокруг бассейнов и т.д. Они обладают высокой упругостью, устойчивостью к атмосферным воздействиям (в пределах небольшого срока) и способностью гасить ударные нагрузки (за счет комбинированного сжатия гранул и сдвига связующего в порах). Следует отметить, что механические свойства резины с крошкой заметно зависят от соотношения гранулята и связующего, а также от размера и твердости исходной крошки. В целом такой материал обычно менее прочен, чем цельновулканизованные резины, но имеет достаточную демпфирующую способность и дешевизну, что делает его привлекательным для второстепенных и неотвечественных виброизолирующих применений;

- марка ТМКЩ расшифровывается как тепло-, морозо-, кислотощелочестойкая техническая резина. Выпускается в виде листовых техпластин и формовых изделий по ГОСТ 7338–90 [25]. Состав ТМКЩ обычно включает смесь каучуков общего назначения (например, натуральный и бутадиен-стирольный каучук), усиленную наполнителем (сажей), с добавками для повышения озоностойкости и термостойкости. Область применения ТМКЩ — уплотнительные и прокладочные элементы, работающие в агрессивных средах (азот, инертные газы, кислоты и щелочи до 20 % концентрации) при давлении до 0,1–0,4 МПа. Техпластины ТМКЩ используют для изоляции и амортизации в тяжелых условиях: из них вырезают прокладки фланцев трубопроводов, настилы на полы и лестницы, амортизирующие вкладыши в опоры оборудования и т.п. ТМКЩ изготавливается различной твердости: мягкая (40–55 ед. Шор А), средняя (55–70) и твердая (70–90). В нашем исследовании испытана пластина средней твердости (ТМКЩ-С), обладающая значительной жесткостью и умеренной способностью к энергорассеянию.

Сводные характеристики исследованных резин по имеющимся данным приведены в табл. 1.

Образцы перечисленных материалов были изготовлены в виде плиток размером около 100 × 100 мм. Для ИРП-1346 и ИРП-1347 использованы вулканизованные листовые образцы толщиной ~15 мм; резина с крошкой представляла собой фрагмент покрытия толщиной ~20 мм; образец ТМКЩ вырезан из техпластины толщиной 10 мм. Статические испытания проведены в режиме монотонного

Таблица 1. Сводные характеристики резин

Наименование пластины	Температура эксплуатации, °С	Плотность (твердость) единицы Шора А (от 0 до 100)	Прочность при растяжении не менее, МПа	Удлинение при разрыве, не менее %
ИРП-1346	от –60 до +80	40–50	16,7	600
ИРП-1347	от –60 до +70	47–57	16,7	550
ТМКЩ-М	от –45 до +80	35–50	4	300
ТМКЩ-С	от –30 до +80	50–65	5	250
ТМКЩ-Т	от –30 до +80	65–85	6,5	200

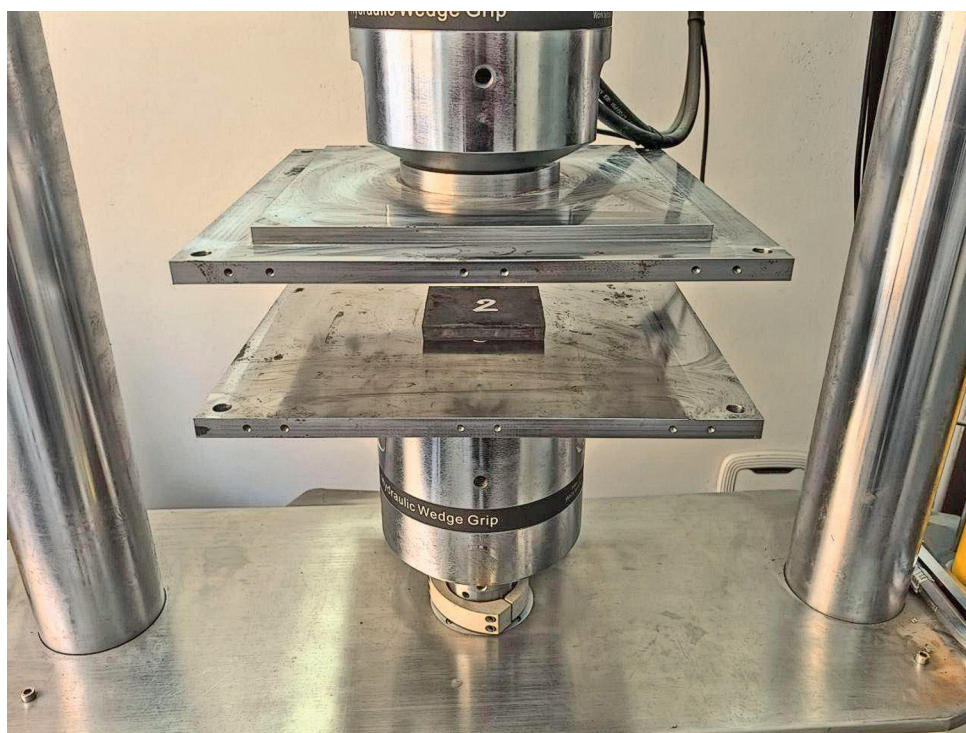


Рис. 1. Фотофиксация образца на испытательной машине

сжатия на стенде с управлением по перемещению (квазистатическое нагружение). Каждое испытание выполнялось до определенной величины деформации (порядка 20–30 % сжатия) непрерывно; при этом регистрировались текущая нагрузка F и сжатие Δh . По этим данным построены кривые $\sigma - \varepsilon$ (напряжение – деформация) сжатия, где условное напряжение σ рассчитывали как силу, отнесенную к начальному сечению образца:

$$\sigma(t) = F(t)/A; \quad \varepsilon(t) = \Delta h/h_0. \quad (1)$$

Статический модуль упругости при сжатии E_{stat} оценивали на третьем шаге приложения нагрузки как секущий модуль на заданном уровне деформации ε :

$$E_{stat}^{sec}(\varepsilon) = \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon}, \quad (2)$$

или касательный (инкрементальный) модуль на интервале $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$:

$$E_{stat}^{tan} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\sigma(\varepsilon_2) - \sigma(\varepsilon_1)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (3)$$

Динамические испытания проводили на универсальной сервогидравлической машине Метротест УИМ-100-1-5-0,5-0,5-0,5, обеспечивающей статические и динамические испытания на разрыв и сжатие материалов и изделий в частотном диапазоне до 50 Гц. Фотофиксация образца между плоскими пластинами испытательной машины приведена на рис. 1.

Каждый образец устанавливался между жесткими плитами машины и первоначально сжимался до некоторого среднего смещения h_0 (преднаят, как правило, 0,5–2 % относительной деформации) для обеспечения контакта. Далее накладывалась гармоническая нагрузка малой амплитуды, образец возбуждался синусоидальными колебаниями смещения относительно среднего положения:

$$x(t) = \bar{x} + x_0 \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $\bar{x}$ — среднее статическое поджатие;
 x_0 — амплитуда гармоника, $\omega = 2\pi f$.

Испытания проводили при трех частотах f : 5, 10 и 20 Гц. Амплитуду нагрузки x_0 подбирали с учетом требований ГОСТ 59940 [8]. Такое нагружение позволяет определить динамическую жесткость $k_{dyn} = \Delta F / \Delta h$ на различных степенях сжатия, а также динамический модуль: $E^* = k_{dyn}(h_0/A)$ (приведенный к текущей толщине образца). Одновременно измеряли фазовый сдвиг ϕ между сигналом перемещения и силы; по нему вычислен $\tan \delta$. Данные обрабатывались с помощью специализированного ПО, рассчитывавшего комплексные модули и энергетические показатели цикла.

Результаты и их обсуждение

Статические свойства. На рис. 2 представлены полученные статические диаграммы сжатия четырех исследованных материалов. Видно, что все образцы проявляют нелинейное упругое поведение: модуль упругости E_{stat} возрастает с ростом деформации (кривые напряжение – деформация имеют восходящую кривизну). При малых деформациях (~1–5 %) резины мягкие, а при укорочении более 10–15 % их сопротивление существенно увеличивается. Это объясняется геометрической компактизацией материала (уменьшение высоты образца повышает его жесткость) и внутренней физической нелинейностью полимера (выпрямление цепей макромолекул при сжатии, рост вклада наполнителя и т.д.).

Четко прослеживаются различия между материалами. Резина с крошкой оказалась наиболее мягкой: даже при 4 % сжатия напряжение в ней не превысило 0,05 МПа. Секущий модуль (отношение напряжения 0,047 МПа к деформации 4,2 %) составил всего около 1,1 МПа — почти на порядок ниже, чем у остальных образцов. настолько низкая жесткость объясняется неомогенной структурой материала: под нагрузкой частицы резины могут перераспределяться (в том числе разрываться), а полиуретан-

новый клей деформируется в основном сдвигом в тонких прослойках между гранулами. ИРП-1346 продемонстрировала умеренную жесткость: при 10 % сжатия напряжение достигло ~0,8 МПа, а при максимальной деформации ~32 % — около 3,0 МПа. Секущий модуль в диапазоне 0–10 % возрос от ~3 до ~8 МПа, а при 30 % деформации составил порядка 12–13 МПа. ИРП-1347 оказалась значительно жестче: уже при 6 % сжатия напряжение было ~0,75 МПа, а при 24 % — около 3,4 МПа. Ее начальный модуль выше, чем у 1346, что согласуется с большей твердостью этой смеси. Модуль E_{stat} для ИРП-1347 слегка снизился с ~17 МПа (на малых деформациях) до ~15 МПа (на больших деформациях); такое поведение может указывать на проявление эффекта Маллинса: материал слегка размягчается после начала пластического течения наполнителя или разрушения связей. ТМКЩ ожидало продемонстрировала максимальную жесткость: при 5,5 % деформации напряжение ~0,84 МПа, а при 8,2 % — 2,06 МПа. По трем точкам можно оценить рост секущего модуля: от ~15 МПа (0–3 % деформации) до ~42 МПа (от 3 до 5,5 %) и ~49 МПа (5,5–8,2 %). Таким образом, даже при умеренных сжатиях ТМКЩ обладает модулем упругости порядка 40–50 МПа, что втрое превышает значения у ИРП-1346 и в десятки раз — у резины с крошкой. Это связано с высокой степенью наполнения технической резины и, возможно, с меньшей начальной толщиной образца (геометрический фактор).

Как видно, резины при сжатии обладают выраженным нелинейным поведением, более того, при малых нагрузках разница в величинах модуля особенно велика (между крайними — РК и ТМКЩ — на порядок), что нужно учитывать при выборе материала под заданную несущую способность узла.

Для анализа динамических характеристик рассмотрим результаты при частоте 5 Гц. В табл. 2 приведены сравнения некоторых показателей четырех резин при

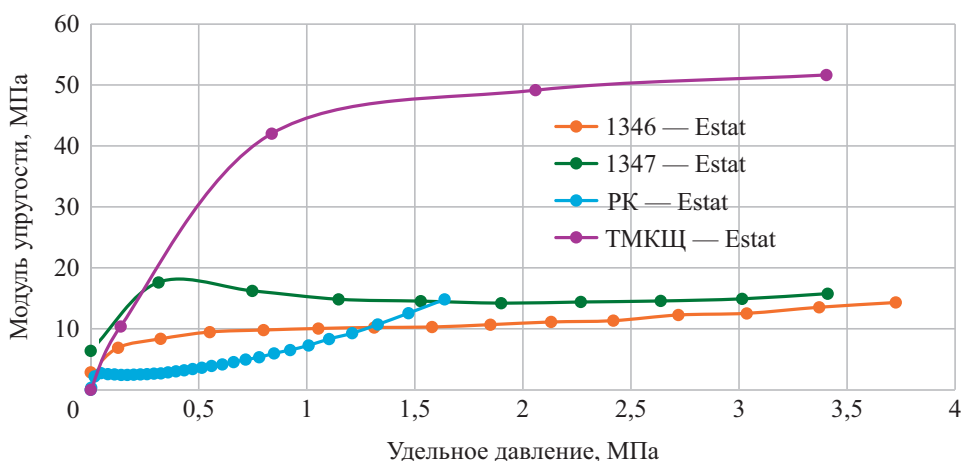


Рис. 2. Статические кривые сжатия образцов резин: ИРП-1346 (оранжевый), ИРП-1347 (зеленый), резина с крошкой (бирюзовый), ТМКЩ (фиолетовый)

Таблица 2. Сравнение динамических упругих характеристик резин при 5 Гц

Материал	Динамический модуль E^* , МПа	Упругий модуль E' , МПа	Модуль потерь E'' , МПа	$\tan \delta$
РК	$\approx 1,0-1,2$	0,99	0,07	0,07
ИРП-1346	≈ 17	15,9	1,3	0,08
ИРП-1347	≈ 37	33,5	4,9	0,15
ТМКЩ	≈ 76	69,6	9,7	0,14

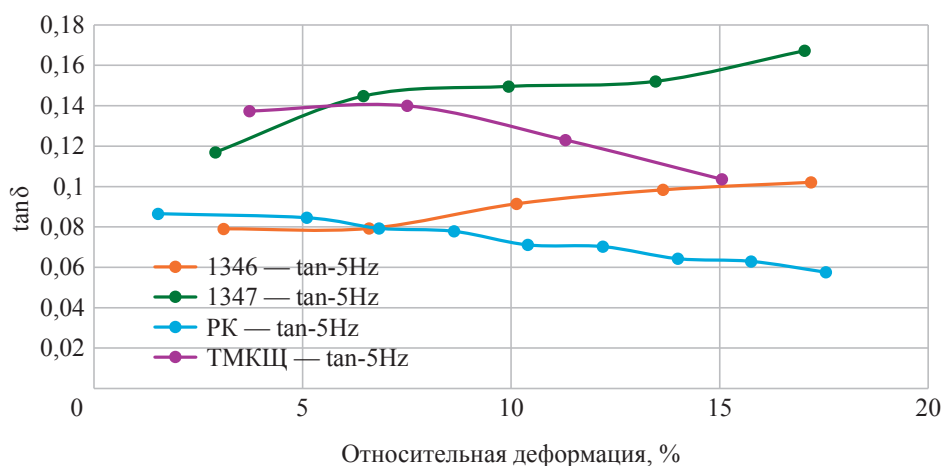


Рис. 3. Характеристики тангенса потерь для образцов резин: ИРП-1346 (оранжевый), ИРП-1347 (зеленый), резина с крошкой (бирюзовый), ТМКЩ (фиолетовый)

примерно 10%-ном статическом сжатии (т.е. в условиях, когда образец несет значительную нагрузку, и на него наложены малые вибрации).

Результаты показывают, что динамическая жесткость резин существенно превосходит их статическую жесткость. Например, для ИРП-1346 при ~10 % сжатия статический секущий модуль равен ~8 МПа, тогда как динамический модуль $E^* \approx 17$ МПа (т.е. более чем в 2 раза выше). У ИРП-1347 разница еще сильнее: $E^* \approx 37$ МПа против ~14–15 МПа статического модуля. Даже у достаточно мягкой РК наблюдается, что малые высокочастотные колебания воспринимаются ею несколько жестче, чем статическое нагружение (1,0–1,2 МПа против ~0,7 МПа секущего статического модуля на близкой деформации). Главная причина этого — нелинейность резины: при динамическом испытании образец уже «включен» в работу предварительным сжатием и малые колебания происходят по касательной ветви диаграммы $\sigma - \varepsilon$, наклон которой значительно выше, чем у исходной неподверженной нагрузке резины. Иными словами, динамический модуль соответствует локальной (дифференциальной) жесткости материала при данном уровне деформации, тогда как статический (секущий) модуль усредняется от нуля.

С другой стороны, из табл. 2 и рис. 3 видно, что способность к диссипации энергии заметно различается для разных резин. Коэффициент механических потерь $\tan \delta$ колеблется от ~0,07 у резины с крошкой до ~0,15 у ИРП-1347. Модуль потерь E'' (про-

порционален рассеиваемой энергии) у ИРП-1347 достигает ~5 МПа, что в несколько раз выше, чем у ИРП-1346 ($E'' \approx 1,3$ МПа) и в десятки раз выше, чем у РК ($E'' \approx 0,07$ МПа). Таким образом, ИРП-1347 обладает наибольшим внутренним трением, способным рассеивать значительную долю энергии колебаний, тогда как в РК демпфирование минимально (видимо, из-за относительно малых внутренних потерь в полиуретановом связующем при таких частотах). ТМКЩ имеет промежуточные характеристики: $\tan \delta \approx 0,14$ и $E'' \approx 9,7$ МПа — это означает, что, несмотря на очень высокую жесткость, данная резина обеспечивает примерно такой же относительный уровень гашения, как и ИРП-1347. Для большинства практических задач (например, сейсмоизоляции) оптимальным является материал, сочетающий высокий E'' (для поглощения энергии) с достаточной упругостью E' (для восприятия нагрузки). В этом смысле ИРП-1347 выглядит предпочтительно: при умеренной жесткости она имеет наибольший модуль потерь. Если же критична минимальная передача вибраций (т.е. нужен низкий E' при допустимом E''), то наоборот — лучше подойдет ИРП 1346.

Дополнительную информацию дает анализ изменения динамических параметров при разных уровнях деформации (предварительного нагружения). Отметим несколько характерных тенденций. Для ИРП-1346 и ИРП-1347 наблюдается увеличение потерь с ростом статического сжатия. Например, у ИРП-1347 при 3 % деформации $\tan \delta \approx 0,12$, а при

17 % — около 0,17 (рис. 3). Видимо, при возрастании нагрузки в резине активируются дополнительные механизмы диссипации, — например, обратимое скольжение цепей, трение наполнителя, — что приводит к росту E'' . Одновременно у этих материалов упругий модуль E' выходит на плато: выше определенной деформации ($\approx 10\text{--}15\%$) дальнейшее сжатие почти не увеличивает E' . Это соответствует упоминавшемуся эффекту Пейна для заполненных резин: при достаточно больших амплитудах/деформациях прежние межфазные связи в материале разрушены, и модуль стабилизируется на некотором уровне. В наших испытаниях для ИРП-1347 такой уровень ~ 40 МПа (достигался уже при $\sim 14\%$ сжатия). У ТМКЩ схожим образом E' выходит на плато (~ 80 МПа) уже при $\sim 10\%$ деформации, однако коэффициент потерь снижается с 0,14 до 0,10 по мере сжатия. Это означает, что при малых деформациях в ТМКЩ действуют какие-то механизмы гистерезиса (возможно, микропористость или внутренние напряжения смеси), которые затем «вырабатываются». В результате материал становится более упругим и менее вязким при сильном сжатии. Интересное поведение показала РК: $\tan\delta$ слегка уменьшается с $\sim 0,086$ до $\sim 0,058$ при росте сжатия от 1,5 до 17,5 % (рис. 3), т.е. относительные потери падают, вероятно, из-за уплотнения структуры: частицы резины входят в более жесткий контакт друг с другом и остается меньше подвижных элементов, способных поглощать энергию. При этом, однако, абсолютное значение E'' у крошки весьма мало на всем интервале (например, E'' снизился с 0,082 до 0,057 МПа, что почти в 100 раз меньше, чем у ИРП-1347).

Поведение образцов при 10 и 20 Гц качественно было аналогичным описанному, однако количественно отмечены некоторые отклонения. В частности, для ИРП-1346 и ИРП-1347 измеренные E' при 20 Гц оказались немного ниже, чем при 5–10 Гц. Для РК, напротив, рост частоты с 5 до 20 Гц сопровождался значительным увеличением динамического модуля: так, при $\sim 10\%$ сжатия E^* вырос с ~ 1 МПа (5 Гц) до ~ 6 МПа (20 Гц). Это указывает на существенную зависимость свойств композиции от скорости деформации, вероятно, полиуретановое связующее обладает собственным временем релаксации и на высоких частотах переходит в более жесткое (менее вязкое) состояние. Отметим, что такой материал лучше гасит ударные одноразовые нагрузки, чем вибрацию: при быстро изменяющемся напряжении он «закрывается» и сопротивляется почти упруго (с высокой жесткостью, но малыми потерями).

Таким образом, проведенные исследования позволили количественно сравнить физико-механические показатели различных резиновых материалов

и выявить их пригодность для задач виброизоляции. ИРП-1347 сочетает высокую энергоемкость с достаточно высокой упругостью и может применяться в ответственных виброизолирующих опорах и демпферах, где важна долговечность и эффективность гашения. ИРП-1346 более мягкая и менее демпфирующая, она подойдет для узлов, требующих пониженной жесткости, например, в приборных виброизоляторах средней нагрузки или в уплотнительных прокладках, где чрезмерное усилие нежелательно. Резина ТМКЩ обеспечивает чрезвычайно большую несущую способность при умеренных виброизолирующих свойствах; она может использоваться в тяжело нагруженных конструкциях (фундаментах, опорах оборудования), где виброизолятор должен выдерживать большие статические силы, хотя эффективность гашения вибраций у нее ограничена ($\tan\delta \sim 0,1\text{--}0,14$). Что касается РК, она проявила себя как экстремально мягкий материал с малым модулем — это выгодно для изоляции высокочастотных вибраций небольшой амплитуды (за счет низкой передаваемой жесткости). Однако характеристики материала существенно отличаются от образца, что не позволяет обеспечить стабильность свойств (и соответственно — стабильное поведение виброзащитной системы).

Заключение

Выполнено комплексное исследование динамических характеристик четырех различных резин: ИРП-1346, ИРП-1347, композиции на основе резиновой крошки и техпластины ТМКЩ. Получены кривые статического сжатия и определены модули упругости, а также проведены динамические испытания при переменных нагрузках (5–20 Гц) с измерением комплексного модуля и механических потерь. Основные выводы работы:

- статическая жесткость материалов возрастает в порядке: РК (самая мягкая, $E_{stat} \sim 1\text{--}2$ МПа) < ИРП-1346 (мягкая морозостойкая резина, $E_{stat} \sim 5\text{--}10$ МПа) < ИРП-1347 (умеренно жесткая резина, $E_{stat} \sim 15$ МПа) < ТМКЩ (жесткая техническая резина, $E_{stat} \sim 40\text{--}50$ МПа);
- динамическая жесткость (E') у всех материалов выше статической секущей жесткости, особенно при малых деформациях. Так, при $\sim 5\text{--}10\%$ сжатия динамический модуль ИРП-1347 ($\sim 30\text{--}40$ МПа) в 2–3 раза превышает ее статический модуль, а у ИРП-1346 и ТМКЩ это превышение составляет ~ 2 раза. Это говорит о том, что расчет виброизоляторов по статической жесткости может недооценивать действительную жесткость узла при вибрации — следует пользоваться динамическими характеристиками, измеренными при малых колебаниях вокруг рабочей точки;

• демпфирующие свойства значительно различаются: наибольшим коэффициентом потерь обладает ИРП-1347 ($\tan\delta$ до $\sim 0,17$, что свидетельствует о высоком внутреннем трении и способности гасить до $\sim 17\%$ энергии за цикл), за ней следует ТМКЩ ($\tan\delta \sim 0,10\text{--}0,14$). У ИРП-1346 потери умеренные ($\tan\delta \sim 0,08\text{--}0,10$), а у РК — низкие ($\tan\delta \sim 0,06\text{--}0,08$). Это означает, что ИРП-1347 предпочтительна для демпфирования вибраций;

• нелинейность поведения: для всех материалов с увеличением статического сжатия (преднагрузки) возрастает их динамическая жесткость, но по-разному меняется коэффициент потерь. У ИРП-1346/1347 наблюдается рост $\tan\delta$ (материал рассеивает больше энергии при больших деформациях), тогда как у ТМКЩ и особенно у РК — снижение $\tan\delta$ (материалы становятся более упругими и менее гистерезисными при уплотнении). У наполненных резин (ИРП, ТМКЩ) при больших деформациях динамический модуль выходит на плато, что согласуется с известным эффектом Пейна. У РК отмечена сильная зависимость от частоты: при 20 Гц ее динамический модуль вырос в 5–6 раз по сравнению с 5 Гц, хотя потери снизились; это указывает на свойства полиуретанового связующего (более жесткое и упругое отклик на высоких скоростях деформации).

В заключение подчеркнем, что экспериментальная оценка динамических характеристик (модулей и демпфирования) необходима для правильного

выбора и моделирования резиновых элементов в виброзащитных системах и сейсмоизоляторах. Полученные данные могут быть использованы для идентификации параметров моделей материала, например расчета эквивалентных параметров моделей Кельвина–Фойгта или стандартного линейного тела, которые воспроизводят наблюдаемые частотно-деформационные зависимости. Кроме того, результаты напрямую применимы при инженерных расчетах: так, для грубой оценки можно принять, что в рабочем диапазоне деформаций (5–15 %) упругая поддерживающая сила резинового элемента рассчитывается с использованием динамического модуля E' , а доля гасимой энергии — по коэффициенту потерь $\tan\delta$. Настоящее исследование подтвердило, что даже близкие по составу резины (ИРП-1346 и 1347) могут различаться по жесткости и демпфированию, а потому выбор материала должен быть обоснован целевыми показателями системы. Полученные экспериментальные зависимости послужат основой для дальнейшего математического моделирования и оптимизации виброизоляторов и сейсмоизоляторов с использованием этих материалов.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить физико-механические свойства 4 видов резин, которые будут использоваться при расчетах систем виброизоляции, что позволит защитить человека от негативного вибрационного воздействия и сделать среду его обитания более комфортной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. EN 15129:2018. Anti-seismic devices. URL: <https://iteh-standards.uc.r.appspot.com/catalog/standards/cen/78c174c4-d9ec-422e-ae7c-88fab162c80e/en-15129-2018/>
2. Warn G.P., Ryan K.L. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs // Buildings. 2012. No. 2 (3). Pp. 300–325. DOI: 10.3390/buildings2030300
3. Aghaeidoost V., Billah A.H.M.M. An advanced rate-dependent analytical model for lead rubber bearings // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2024. No. 53 (6). Pp. 1961–1981. DOI: 10.1002/eqe.4100. EDN WXZVFS
4. Akhtar A.Ya., Tsang h.Ho. Dynamic properties of recycled polyurethane-coated rubber-soil mixtures // Case Studies in Construction Materials. 2023. No. 18. P. e01859. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01859. EDN ASHTWR.
5. Sun X., Thompson D. Measurement, Modeling, and Analysis of the Dynamic Properties of Resilient Elements Used for Vibration Isolation // Journal of Vibration and Acoustics, Transaction of the ASME. 2023. No. 145 (6). P. 060801. DOI: 10.1115/1.4064541. EDN DDESUT.
6. Kari L. On the dynamic stiffness of preloaded vibration isolators in the audible frequency range: Modeling and experiments // Journal of the Acoustical Society of America. 2003. No. 113 (4). Pp. 1909–1921. DOI: 10.1121/1.1557214. EDN LRQUZZ.
7. Kari L. Dynamic Stiffness Matrix of a Long Rubber Bush Mounting // Rubber Chemistry and Technology. 2002. No. 75 (4). Pp. 747–770. DOI: 10.5254/1.3545000
8. ГОСТ 59940–2021. Системы виброизоляции зданий и сооружений. Методы испытаний вибродемпфирующих материалов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182116>
9. Cortazar-Noguerol Ju., Cortés F., Sarria I., Elejabarrieta M.J. Preload Influence on the Dynamic Properties of a Polyurethane Elastomeric Foam // Polymers. 2024. No. 13. P. 1844. DOI: 10.3390/polym16131844. EDN ZVGLFO.

10. Li G., Wu L., Zhang Sh., Liu F. Frequency dependence prediction and parameter identification of rubber bushing // *Scientific Reports*. 2022. No. 12 (1). P. 863. DOI: 10.1038/s41598-022-04839-2. EDN IVQCWM.
11. Tsang H.Ho., Tran D.Ph., Hung W.Yi., Gad E.F. Geotechnical seismic isolation based on high-damping polyurethane: centrifuge modelling // *Bull Earthquake Engineering*. 2024. No. 22 (4). Pp. 2001–2023. DOI: 10.1007/s10518-023-01842-4. EDN POQMIV.
12. Yin B., Jiao X., Wen H., Li Ya., Li M. Effect of Prestrain on Payne Effect and Hysteresis Loss of Carbon-Black-Filled Rubber Vulcanizates: Measurements and Modeling // *Polymers*. 2024. No. 16 (3). P. 436. DOI: 10.3390/polym16030436. EDN IPPMVO.
13. Jalocha D. Payne effect: A Constitutive model based on a dynamic strain amplitude dependent spectrum of relaxation time // *Mechanics of Materials*. 2020. Vol. 148. P. 103526. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103526
14. Hentschke R. The Payne effect revisited // *eXPRESS Polymer Letters*. 2017. No. 11 (4). Pp. 278–292. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.28. EDN YWUUYT.
15. Song Y., Xu Zh., Zheng Q., Wang W. Payne effect of carbon black filled natural rubber nanocomposites: Influences of extraction, crosslinking, and swelling // *Journal of Rheology*. 2021. No. 65 (5). Pp. 807–820. DOI: 10.1122/8.0000270. EDN HWFFNM.
16. Robertson C.G., Hardman B.J. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber. Perspective on the Original Polymer Nanocomposite // *Polymers*. 2021. No. 13 (4). P. 538. DOI: 10.3390/polym13040538. EDN KECSNR.
17. Hao D., Li D., Liao Y. A finite viscoelastic constitutive model for filled rubber-like materials // *International Journal of Solids and Structures*. 2015. No. 64, 65. Pp. 232–245. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.04.002
18. Wollscheid D., Lion A. Predeformation- and frequency-dependent material behaviour of filler-reinforced rubber: Experiments, constitutive modelling and parameter identification // *International Journal of Solids and Structures*. 2013. No. 50 (9). Pp. 1217–1225. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.12.015
19. Diani J., Fayolle B., Gilormini P. A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*. 2009. No. 45 (3). Pp. 601–612. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017. EDN KPBXQT.
20. Bokobza L. Elastomer Nanocomposites: Effect of Filler-Matrix and Filler-Filler Interactions // *Polymers*. 2023. No. 15 (13). P. 2900. DOI: 10.3390/polym15132900. EDN VPJOAH.
21. Revelo C.F., Correa M., Agular C., Colorado H.A. Composite materials made of waste tires and polyurethane resin: A case study of flexible tiles successfully applied in industry // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. No. 15. P. e00681. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00681. EDN CNCSAG.
22. Meza-Muñoz A.O., Rivas-Ordoñez F.S., Madera-Sierra I.E., Rojas-Manzano M.A., Patino-Reyes E.D., Salmerón-Becerra M.I. et al. Development of a Matrix for Seismic Isolators Using Recycled Rubber from Vehicle Tires // *Polymers*. 2024. No. 16 (21). P. 2977. DOI: 10.3390/polym16212977. EDN HPFGWM.
23. Yun J., Mazumder M., Na Il.Ho., Lee M.S., Kim H.H. Evaluation of Effect of Thermoplastic Polyurethane (TPU) on Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Binder // *Materials*. 2022. No. 15 (11). P. 3824. DOI: 10.3390/ma15113824. EDN WQYEYG.
24. ТУ 38.0051166–98. Смеси резиновые для резинотехнических изделий авиационной техники.
25. ГОСТ 7338–90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия : утв. постановлением Госстандарта СССР от 13 июня 1990 г. № 1528.

Об авторе: **Владимир Александрович Смирнов** — канд. техн. наук, доцент кафедры СиТМ; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ведущий научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; ORCID: 0000-0001-5679-9542, ResearcherID: N-6846-2016; e-mail: belohvost@list.ru.

REFERENCES

1. EN 15129:2018. Anti-seismic devices. URL: <https://iteh-standards.uc.r.appspot.com/catalog/standards/cen/78c174c4-d9ec-422e-ae7c-88fab162c80e/en-15129-2018/>
2. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings*. 2012; 2(3):300-325. DOI: 10.3390/buildings2030300
3. Aghaeidoost V., Billah A.H.M.M. An advanced rate-dependent analytical model for lead rubber bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2024; 53(6): 1961-1981. DOI: 10.1002/eqe.4100. EDN WXZVFS
4. Akhtar A.Ya., Tsang h.Ho. Dynamic properties of recycled polyurethane-coated rubber-soil mixtures. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 18:e01859. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01859. EDN ASHTWR.
5. Sun X., Thompson D. Measurement, Modeling, and Analysis of the Dynamic Properties of Resilient Elements Used for Vibration Isolation. *Journal of Vibration and Acoustics, Transaction of the ASME*. 2023; 145(6):060801. DOI: 10.1115/1.4064541. EDN DDESUT.

6. Kari L. On the dynamic stiffness of preloaded vibration isolators in the audible frequency range: Modeling and experiments. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2003; 113(4):1909-1921. DOI: 10.1121/1.1557214. EDN LRQUZZ.
7. Kari L. Dynamic Stiffness Matrix of a Long Rubber Bush Mounting. *Rubber Chemistry and Technology*. 2002; 75(4):747-770. DOI: 10.5254/1.3545000
8. GOST 59940–2021. Vibration isolation systems for buildings and structures. Test methods for vibration damping materials. Methods for determining the dynamic characteristics of rubber/rubber materials. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182116> (rus.).
9. Cortazar-Noguerol Ju., Cortés F., Sarriá I., Elejabarrieta MJ. Preload Influence on the Dynamic Properties of a Polyurethane Elastomeric Foam. *Polymers*. 2024; (13):1844. DOI: 10.3390/polym16131844. EDN ZVGLFO.
10. Li G., Wu L., Zhang Sh., Liu F. Frequency dependence prediction and parameter identification of rubber bushing. *Scientific Reports*. 2022; 12(1):863. DOI: 10.1038/s41598-022-04839-2. EDN IVQCWM.
11. Tsang H.Ho., Tran D.Ph., Hung W.Yi., Gad E.F. Geotechnical seismic isolation based on high-damping polyurethane: centrifuge modelling. *Bull Earthquake Engineering*. 2024; 22(4):2001-2023. DOI: 10.1007/s10518-023-01842-4. EDN POQMIV.
12. Yin B., Jiao X., Wen H., Li Ya., Li M. Effect of Prestrain on Payne Effect and Hysteresis Loss of Carbon-Black-Filled Rubber Vulcanizates: Measurements and Modeling. *Polymers*. 2024; 16(3):436. DOI: 10.3390/polym16030436. EDN IPPMVO.
13. Jalocha D. Payne effect: A Constitutive model based on a dynamic strain amplitude dependent spectrum of relaxation time. *Mechanics of Materials*. 2020; 148:103526. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103526
14. Hentschke R. The Payne effect revisited. *EXPRESS Polymer Letters*. 2017; 11(4):278-292. DOI: 10.3144/express-polymlett.2017.28. EDN YWUUYT.
15. Song Y., Xu Zh., Zheng Q., Wang W. Payne effect of carbon black filled natural rubber nanocomposites: Influences of extraction, crosslinking, and swelling. *Journal of Rheology*. 2021; 65(5):807-820. DOI: 10.1122/8.0000270. EDN HWFFNM.
16. Robertson C.G., Hardman B.J. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber. Perspective on the Original Polymer Nanocomposite. *Polymers*. 2021; 13(4):538. DOI: 10.3390/polym13040538. EDN KECSNR.
17. Hao D., Li D., Liao Y. A finite viscoelastic constitutive model for filled rubber-like materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2015; 64-65:232-245 DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.04.002
18. Wolscheid D., Lion A. Predeformation- and frequency-dependent material behaviour of filler-reinforced rubber: Experiments, constitutive modelling and parameter identification. *International Journal of Solids and Structures*. 2013; 50(9):1217-1225. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.12.015
19. Diani J., Fayolle B., Gilormini P. A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*. 2009; 45(3):601-612. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017. EDN KPBXQT.
20. Bokobza L. Elastomer Nanocomposites: Effect of Filler-Matrix and Filler-Filler Interactions. *Polymers*. 2023; 15(13):2900. DOI: 10.3390/polym15132900. EDN VPJOAH.
21. Revelo C.F., Correa M., Aguilar C., Colorado H.A. Composite materials made of waste tires and polyurethane resin: A case study of flexible tiles successfully applied in industry. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 15:e00681. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00681. EDN CNCSAG.
22. Meza-Muñoz A.O., Rivas-Ordoñez F.S., Madera-Sierra I.E., Rojas-Manzano M.A., Patino-Reyes E.D., Salmerón-Becerra M.I. et al. Development of a Matrix for Seismic Isolators Using Recycled Rubber from Vehicle Tires. *Polymers*. 2024; 16(21):2977. DOI: 10.3390/polym16212977. EDN HPFGWM.
23. Yun J., Mazumder M., Na Il.Ho., Lee M.S., Kim H.H. Evaluation of Effect of Thermoplastic Polyurethane (TPU) on Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Binder. *Materials*. 2022; 15(11):3824. DOI: 10.3390/ma15113824. EDN WQYEYG.
24. TU 38.0051166–98. Rubber mixtures for rubber products of aviation equipment. (rus.).
25. GOST 7338–90. Rubber and rubber-fabric plates. Technical conditions : approved by the Resolution of the USSR State Standard of June 13, 1990, No. 1528. (rus.).

About the author: **Vladimir A. Smirnov** — Candidate of technical sciences, associate professor of the Structural and Theoretical Mechanics Department; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Leading research fellow; **Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Locomotivniy passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5679-9542, ResearcherID: N-6846-2016; e-mail: belohvost@list.ru.