

## Методология предварительной оценки морозостойкости эластомерных материалов для транспортных объектов: теоретический подход и анализ результатов

Д. Р. Арутюнян, Е. Г. Курзина, В. Д. Кудрявцева, А. М. Курзина,

С. Д. Герасимова

Российский университет транспорта РУТ (МИИТ)

**Аннотация:** В связи с активным освоением Северных и Арктических регионов к современным демпфирующим материалам транспортной и строительной инфраструктуры предъявляют повышенные требования в части работоспособности при пониженных температурах окружающей среды. Теоретически показано, что ограничение сегментальной подвижности и холодная кристаллизация полимеров приводят к росту жёсткости и снижению демпфирующей и герметизирующей функций. Эволюция рецептур идет через управляемую комбинацию базовых полимеров, введение «умных» наполнителей, технологически активных добавок и гибридизацию эластомерных матриц. Оценку низкотемпературной работоспособности эластомеров проводят по результатам нормативных эксплуатационных испытаний, имитирующих предельные режимы реальной работы изделия, и термоаналитических/вязкоупругих методов, выявляющих физическую природу перехода к стеклованию. Однако, данные методы нередко приводят к несопоставимым результатам, достаточно сложны и требуют специальной высокоточной аппаратуры. В связи с чем, предложена методика экспресс-оценки низкотемпературной работоспособности эластомеров по температурной зависимости твёрдости Шор А с выделением критерия  $T^*$ hard (перелом HRA(T)), коррелирующего с температурой стеклования  $T_g$ , температурой хрупкости и коэффициентом морозостойкости. Апробация проведена на шести полимерных композициях разной природы, которая показала, что резиновые эластомеры (ТПРК/ТПРК-Д) сохраняют высокоэластическое состояние до минус 60 °C (без плато HRA(T)), тогда как термоэластопласти демонстрируют резкий подъём твёрдости с насыщением от  $\approx$  минус 20 °C, что указывает на стеклование и ограничение применения при более низких температурах. Статистическая согласованность ( $\sigma \leq 3,6$  ед. Шор А) подтверждает надёжность метода. Предложенный метод технологичен, чувствителен к рецептуре и пригоден для первичного ранжирования морозостойкости материалов уплотнений и демпферов.

**Ключевые слова:** эластомеры, низкотемпературная работоспособность, температура стеклования, температурный предел хрупкости, коэффициент морозостойкости, экспресс-оценка низкотемпературной работоспособности эластомеров по температурной зависимости твёрдости Шор А, термоэластопласти, резиновые композиты.

Во многих регионах России объекты транспортной и строительной инфраструктуры эксплуатируются при отрицательных температурах, что предъявляет повышенные требования к демпфирующим и уплотнительным полимерным материалам. Понижение температуры ограничивает

сегментальную подвижность полимерных цепей, смещает материал в область стеклования и сопровождается холодной кристаллизацией, в результате чего возрастает жёсткость, снижается демпфирование и нарушается герметизирующая функция узлов. Так, в работах отечественных ученых подчёркивается, что выбор базового каучука и рецептура (включая полярность, тип сшивки и наполнители) резины критически влияют на границы работоспособности при холода, которая определяется не только по прочностным показателям, но и по низкотемпературным критериям - температурному пределу хрупкости и коэффициенту морозостойкости (КМ) [1].

Для оценки склонности к стеклованию образцов полимерных материалов применяют термический и механический анализ: дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК), основанную на измерении разности теплового потока испытуемого и эталонного образца как функции температуры и времени, а также динамико-механический анализ (DMA), определяющий температуру стеклования  $T_g$  по значительному падению динамического модуля упругости  $E'(T)$  в результате колебаний с изгибом и пикового значения тангенса угла механических потерь  $\tan\delta(T)$ .

На практике рецептурные приёмы (введение пластификаторов, подбор каучуков и наполняющих систем) позволяют целенаправленно смещать  $T_g$  и улучшать КМ. Так, для нитрильных резин добавка 20 мас. ч. пластификаторов смещает начало стеклования по ДСК к  $\sim$  минус 40°C при сохранении нормативного КМ  $\geq 0,2$  при минус 40°C, что демонстрирует прямую увязку рецептуры с инженерным критерием пригодности в холода [2].

Параллельно открытые российские исследования 2020-2025 гг. показывают, что рациональный выбор полимерной основы (ЭПДМ, СКПО, ЭХГ, НБР/ГБНК и т. д.) даёт ощутимый выигрыш по низкотемпературным

---

показателям. В прикладных работах ученых НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ подчёркнуто, что проектирование уплотнительных резин «под холод» должно учитывать не только прочность, но и температурный предел хрупкости (Т<sub>РХ</sub>) и коэффициент морозостойкости. В качестве основ для морозо- и озоностойких резин обоснована применимость ЭПДМ/СКПО и экспериментально подобраны оптимальные рецептуры [1].

Для обоснования целевых диапазонов важна корректная интерпретация T<sub>g</sub> по ДСК/DMA. Методически известно, что численное значение температуры стеклования чувствительно к критерию обработки кривой и режиму испытаний (скорости, предыстории), а сопоставимые серии измерений для набора широко применяемых каучуков (HNBR, FKM, NBR, EPM/EPDM, ECH и др.) показывают разброс T<sub>g</sub> и подтверждают различия в низкотемпературной пригодности семейств эластомеров. Эти данные одновременно задают так называемый «паспорт» материалов для подбора в условиях холода [3].

Эксплуатационные факторы (уплотнения, подвижные/неподвижные контакты, воздействие окружающей среды) требуют учитывать температурные зависимости модулей и триботехнических характеристик: игнорирование влияния температуры на упругость и трение в расчётах узлов приводит к утечкам и преждевременным отказам. В ходе экспериментальных исследований ряда отечественных авторов получены температурные зависимости статического модуля изгиба и коэффициента трения для нескольких составов HNBR в диапазоне от -70 до +100°C, которые предложено использовать в качестве входных данных для расчётов и выбора материалов [4].

Решение проблемы низкотемпературной работоспособности эластомерных уплотнений сегодня строится на сочетании трех взаимодополняющих подходов: целевой селекции полимерной основы,

---

рационального подбора рецептурных компонентов (вулканизующих систем, наполнителей, пластификаторов, сополимеров) и испытаний, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Выбор базового каучука и архитектуры сополимеров позволяет управлять температурой стеклования и склонностью к хрупкому разрушению, а рецептурные и технологические приемы — «доводить» баланс свойств под конкретную среду и термомеханический режим. Наконец, валидировать решения можно только в программах испытаний, в которых сочетаются низкие температуры, рабочие среды и циклические воздействия. Такой трехконтурный подход проявляется себя в ряде отечественных исследований последних лет.

Во-первых, эффективно работает стратегия смешения каучуков с разной полярностью и кристаллизуемостью. Для хлоропреновых резин добавление бутадиенового (СКД) и бутадиен-стирольного (ДССК) каучуков приводит к резкому снижению температуры хрупкости и  $T_g$ , одновременно повышая коэффициент морозостойкости при растяжении. Показательно, что при введении 16,0 мас.ч. СКД и 4,0 мас.ч. ДССК температура хрупкости падает с минус 33°C до минус 59°C, а при 13,3/6,7 мас.ч. - до минус 61°C, при этом  $T_g$  снижается до ~ минус 42°C; рост морозостойкости объясняется высокой низкотемпературной эластичностью СКД и подавлением кристаллизации за счет ДССК. Эти данные напрямую демонстрируют, что грамотное компаундирование способно «сдвигать» границы эксплуатации хлоропреновых резин в сторону арктических температур без критического ущерба другим показателям [5].

Во-вторых, существенный ресурс скрыт в выборе полярных каучуков с изначально низкой  $T_g$  и устойчивостью к углеводородным средам. Эпихлоргидриновый каучук (ECO/CO) сочетает  $T_g$  порядка минус 60°C с бензомаслостойкостью, что делает его естественной платформой для северных условий и нефтегазового оборудования; впервые для таких резин

---

показана долговременная климатическая стойкость в реальной нефти (Талакан) при естественно низких температурах Якутии в течение года - с мониторингом прочности, относительного удлинения, остаточной деформации, набухания и коэффициента морозостойкости. Эта постановка задачи принципиальна: старение в рабочей среде и холодае существенно отличается от традиционных воздушных климатических испытаний, а потому именно «натурная» программа дает достоверный прогноз работоспособности [6, 7].

В-третьих, необходима рецептурная тонкая настройка через выбор вулканизующей системы, наполнителей и пластификаторов. Для бутадиен-нитрильных резин (БНК/СКН) морозостойкость падает с ростом содержания акрилонитрила из-за снижения сегментальной подвижности, однако негативный тренд частично компенсируется выбором серной вулканизации (более подвижные сульфидные связи) либо пероксидной системы в сочетании с триаллилизоциануратом; кроме того, целенаправленное пластификация улучшает эластичность при отрицательных температурах. Для российских марок лучшими по морозостойкости признаны СКН-18 и БНКС-18, которые являются важными ориентирами при выборе базы под холдоустойчивые компаунды [8].

К наполнительной стратегии есть два принципиально разных подхода. С одной стороны, «классический» высокоактивный технический углерод (например, N330) в умеренных дозах позволяет балансировать прочность/эластичность без существенного ухудшения морозостойкости; именно такой дизайн использован в сравнительных сериях для полярных и неполярных каучуков при оценке  $T_g$  методом ДСК. Характерно, что  $T_g$  самих каучуков варьирует от минус 34 - минус 49°C у HNBR/NBR до минус 57°C у Hydrin T6000 и минус 64,7°C у специфического DP-5240 (пропиленоксид+аллилглицидиловый эфир); подбор основы и углеродного

---

наполнителя по реологическим ограничениям дает работающий технологический коридор при отрицательных температурах [3].

С другой стороны, малонаполненные наноструктурированные системы (углеродные нанотрубки 1–2 мас.ч. в ECO) обеспечивают сочетание износостойкости с сохранением низкой  $T_g$  (минус 57 - минус 58°C) и достаточного коэффициента морозостойкости при минус 50°C (0,41–0,48), что критично для уплотнений, работающих одновременно в абразивном и криогенном режимах. Это подтверждает, что «легкая» нанонаполненность может быть эффективной альтернативой традиционным сажам, если приоритетом является низкотемпературная гибкость [9].

Еще одна линия решений - гибридизация эластомерных матриц. Для EPDM-резин, традиционно ценных озоностойкостью и теплостойкостью, продемонстрированы возможности смесей с метилфенилсилоксановым каучуком и вариативным наполнением (N330, аэросил A-300): при  $T_g$  EPDM порядка минус 53 °C и склонности силиконов к кристаллизации на сверхнизких температурах рецептурная комбинация и выбор системы вулканизации (пероксидная/пероксид-сера) позволяют расширять температурный диапазон без провала в прочностных показателях. Этот подход уместен там, где к морозостойкости добавляется требование озоностойкости и атмосферостойкости [10].

Современные научные исследования подтверждают: эволюция рецептур идет именно через управляемую комбинацию базовых полимеров, «умных» наполнителей и технологически активных добавок, причем ключевыми остаются именно каучуки и наполнители как наиболее «массовые» детерминанты свойств и экономичности [8, 11].

Оценка низкотемпературной работоспособности эластомеров базируется на двух комплементарных блоках методов: нормативные эксплуатационные испытания, имитирующие предельные режимы реальной

---

работы изделия, и термоаналитические/вязкоупругие методы, выявляющие физическую природу перехода к стеклованию.

К физическим методам относят измерение температуры стеклования ( $T_g$ ): дифференциальную сканирующую калориметрию по ГОСТ Р 56724-2015 (ИСО 11357-3:2011) и динамико-механический анализ по ГОСТ Р 57739-2017. К эксплуатационным методам относят, прежде всего, определение температуры хрупкости по изгибу при охлаждении (ГОСТ 7912-74), а также коэффициент морозостойкости (ГОСТ 13808-79), позволяющему оценить морозостойкость по упругому восстановлению после сжатия.

В терминах эксплуатации именно  $T_g$  и связанный с ним резкий рост модуля/жесткости при охлаждении задают «физическую» границу пригодности материала, в то время как хрупкость и морозостойкость - её «инженерные» проявления в конкретной схеме нагружения.

Таким образом, актуальность задачи обеспечения надёжности демпфирующих и уплотнительных полимерных материалов в условиях низких температур обусловлена как фундаментальными причинами (стеклование/кристаллизация, вязкоупругость), так и эксплуатационными рисками (хрупкость, герметичность, износ).

Современная практика решений включает:

- подбор полимерных смесей с более низкой  $T_g$  или меньшей чувствительностью к кристаллизации;
- рецептурные модификации (пластификаторы, наполнители);
- сопоставление  $T_g$  (ДСК/DMA) с нормативными критериями ТПХ и КМ.

Однако, определенная по методам ДСК и DMA температура стеклования одного и того же испытуемого образца может отличаться, что оговорено в нормативных документах. Также,  $T_g$  чувствительна к скорости и частоте испытаний, что оказывает существенное влияние на итоговый

---

результат. Кроме того, данные методы достаточно сложны и требуют специальной высокоточной аппаратуры.

В связи с чем, представляется целесообразным в качестве первичной оценки эластомерного материала проводить экспресс-оценку склонности к стеклованию по температурной зависимости твёрдости (Шор А) при ступенчатом снижении температуры по критерию  $T^*_{hard}$  (перелом HRA(T)). Данный метод напрямую связан с ростом жёсткости при приближении к  $T_g$ , достаточно технологичен (стандартный твердомер) и легко соотносится с порогами КМ/ТПХ.

Для экспериментальной проверки предложенного подхода исследованы шесть композиционных эластомеров, различающихся природой полимерной матрицы и долей жёсткой фазы: два морозостойких резиновых эластомера: образец 1 - ТПРК (модифицирован высокомолекулярной добавкой - сэвиленом) и образец 2 - ТПРК-Д (аналог сэвилен-модифицированного материала повышенной долговечности); а также четыре термоэластопласта: образцы 3 и 4 - смеси полиэфирных блоксополимеров с поливинилхлоридным пластикатом с повышенным содержанием жёсткой фазы (ТЭП2вж-1 и ТЭП2вж-2, при этом во втором образце доля жёсткой фазы несколько выше); образец 5 - композиция с пониженным содержанием жёсткой фазы (ТЭП2нж); образец 6 - термопластичный эластомер промышленного производства (ТЭПА).

Склонность материалов к стеклованию оценивали по резкому изменению твёрдости при охлаждении. Измерения проводили методом вдавливания индентора типа А (Шор А) в диапазоне температур от +20 до  $-60$  °С с шагом 10 °С. На каждой ступени образцы выдерживали 30 мин до установления теплового равновесия. Твёрдость рассматривалась как величина, обратно пропорциональная глубине проникновения индентора и зависящая от упругих и вязкоупругих характеристик материала. Считывание

---

показаний выполняли: для резиновых композитов (образцы 1, 2) - через 3 с после прижатия индентора в соответствии с ГОСТ 263-75; для термоэластопластов (образцы 3-6) - через  $15 \pm 1$  с в соответствии с ГОСТ 24621-2015. Испытания осуществляли в климатической камере с использованием твердомера по Шору А; температурное выдерживание и измерения выполнялись без извлечения образцов из камеры, что исключало влияние дополнительного термоциклирования и обеспечивало сопоставимость серий.

Экспериментальное исследование проводилось с использованием климатической камеры (рис. 1) и твердомера по Шору А (рис. 2).



Рис. 1. – Климатическая камера с образцами для испытаний

Образцы изготавливались в виде плоских пластин с параллельными опорной и измерительной поверхностями. Разметку точек выполняли так, чтобы расстояние между соседними точками было не менее 10 мм, а расстояние от точки до кромки образца - не менее 15 мм; это исключало влияние краевых эффектов и взаимного наложения отпечатков.

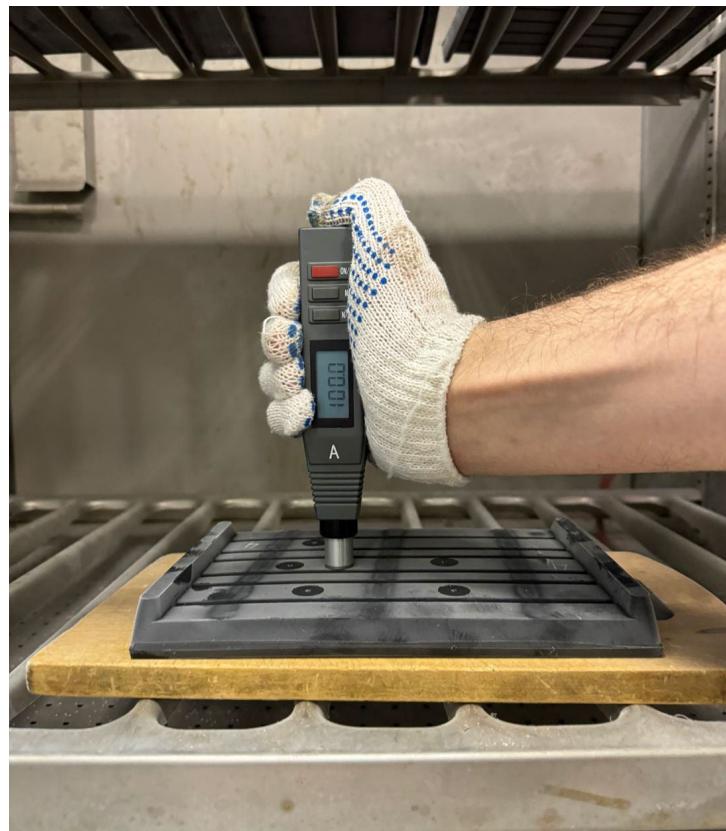


Рис. 2. – Измерение твердости образцов

На каждой температурной ступени выполняли не менее десяти независимых определений твёрдости, не извлекая образцы из климатической камеры, что обеспечивало сохранение теплового равновесия и сопоставимость серий. Итоговым значением принимали среднее арифметическое всех измерений, округлённое до целого. Сводные результаты представлены в таблице № 1 и на рис. 3-8.

Статистическая обработка результатов измерений является ключевым этапом количественного анализа экспериментальных данных. Её основная цель заключается в минимизации случайных и систематических ошибок и в обеспечении достоверного представления истинных значений измеряемых величин. При обработке данных исключались переменные составляющие систематической погрешности, обусловленные внешними факторами или

особенностями оборудования, чтобы повысить точность и воспроизводимость результатов.

Таблица № 1

Результаты измерения твердости эластомерных образцов при разных температурах

| Образец 1       |                      | Образец 2       |                      | Образец 3       |                      | Образец 4       |                      | Образец 5       |                      | Образец 6       |                      |
|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| Температура, °C | Твердость, ед. Шор А |
| 20              | 82,8                 | 20              | 83,4                 | 20              | 89,2                 | 20              | 88,3                 | 20              | 87,6                 | 20              | 90,2                 |
| 0               | 83,8                 | 0               | 84,5                 | 0               | 95,6                 | 0               | 94,5                 | 0               | 94,9                 | 0               | 96,1                 |
| -10             | 86,2                 | -10             | 86,1                 | -10             | 97,8                 | -10             | 97,0                 | -10             | 97,2                 | -10             | 98,0                 |
| -20             | 88,3                 | -20             | 88,8                 | -20             | 99,9                 | -20             | 100,0                | -20             | 99,9                 | -20             | 99,9                 |
| -30             | 91,0                 | -30             | 90,5                 | -30             | 100,0                | -30             | 100,0                | -30             | 100,0                | -30             | 100,0                |
| -40             | 93,4                 | -40             | 92,7                 | -40             | 100,0                | -40             | 100,0                | -40             | 100,0                | -40             | 100,0                |
| -50             | 95,4                 | -50             | 94,5                 | -50             | 100,0                | -50             | 100,0                | -50             | 100,0                | -50             | 100,0                |
| -60             | 97,8                 | -60             | 97,2                 | -60             | 100,0                | -60             | 100,0                | -60             | 100,0                | -60             | 100,0                |

Центральной характеристикой выборки является математическое ожидание ( $M$ ) – усреднённое значение случайной величины, отражающее «центр тяжести» распределения. Для оценки степени разброса данных относительно среднего значения использовалась дисперсия ( $D$ ).

Так как величины измеряемой твёрдости могут отклоняться от среднего значения как в большую, так и в меньшую сторону, суммарная абсолютная погрешность не отражает истинный разброс данных, поскольку при сложении положительных и отрицательных отклонений возможна их взаимная компенсация. Поэтому для количественной оценки рассеяния результатов применялось среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ), характеризующее устойчивость измерений: чем меньше его значение, тем выше точность эксперимента и тем надёжнее полученные зависимости.

В данном исследовании расчёт  $M$ ,  $D$  и  $\sigma$  позволил оценить достоверность серий измерений твёрдости по Шору А для каждого образца при различных температурах и подтвердил их статистическую согласованность.

Результаты статистической обработки представлены в таблице № 2.

Таблица № 2

Результаты статистической обработки

| Температура<br>°C | Образец 1 |        |          | Образец 2 |       |          | Образец 3 |       |          |
|-------------------|-----------|--------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|----------|
|                   | M         | D      | $\sigma$ | M         | D     | $\sigma$ | M         | D     | $\sigma$ |
| 20                | 82,760    | 1,484  | 1,218    | 83,366    | 3,867 | 1,967    | 89,150    | 2,265 | 1,505    |
| 0                 | 83,750    | 6,485  | 2,547    | 84,460    | 8,524 | 2,920    | 95,640    | 4,344 | 2,084    |
| -10               | 86,180    | 0,136  | 0,369    | 86,130    | 1,421 | 1,192    | 97,830    | 6,241 | 2,498    |
| -20               | 88,340    | 12,604 | 3,550    | 88,810    | 3,489 | 1,868    | 99,940    | 0,164 | 0,405    |
| -30               | 91,010    | 7,909  | 2,812    | 90,540    | 8,044 | 2,836    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -40               | 93,430    | 5,261  | 2,294    | 92,730    | 2,401 | 1,550    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -50               | 95,440    | 3,604  | 1,898    | 94,470    | 6,401 | 2,530    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -60               | 97,830    | 1,961  | 1,400    | 97,220    | 4,176 | 2,044    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| Температура<br>°C | Образец 4 |        |          | Образец 5 |       |          | Образец 6 |       |          |
|                   | M         | D      | $\sigma$ | M         | D     | $\sigma$ | M         | D     | $\sigma$ |
| 20                | 88,310    | 0,909  | 0,953    | 87,550    | 5,685 | 2,384    | 90,240    | 4,444 | 2,108    |
| 0                 | 94,490    | 1,329  | 1,153    | 94,900    | 2,860 | 1,691    | 96,090    | 1,669 | 1,292    |
| -10               | 96,980    | 4,556  | 2,134    | 97,210    | 1,789 | 1,338    | 97,960    | 0,424 | 0,651    |
| -20               | 99,970    | 0,081  | 0,285    | 99,890    | 0,489 | 0,699    | 99,900    | 0,420 | 0,648    |
| -30               | 100,000   | 0,000  | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -40               | 100,000   | 0,000  | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -50               | 100,000   | 0,000  | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |
| -60               | 100,000   | 0,000  | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    | 100,000   | 0,000 | 0,000    |

Анализ экспериментальных данных показал, что температурные зависимости твёрдости исследованных материалов отражают различную природу фазовых превращений в резиновых и термопластичных эластомерах. Для резиновых композитов (образцы 1 и 2) наблюдается плавное увеличение твёрдости при понижении температуры до минус 60 °C без выхода кривых на область насыщения, характерную для стеклования.

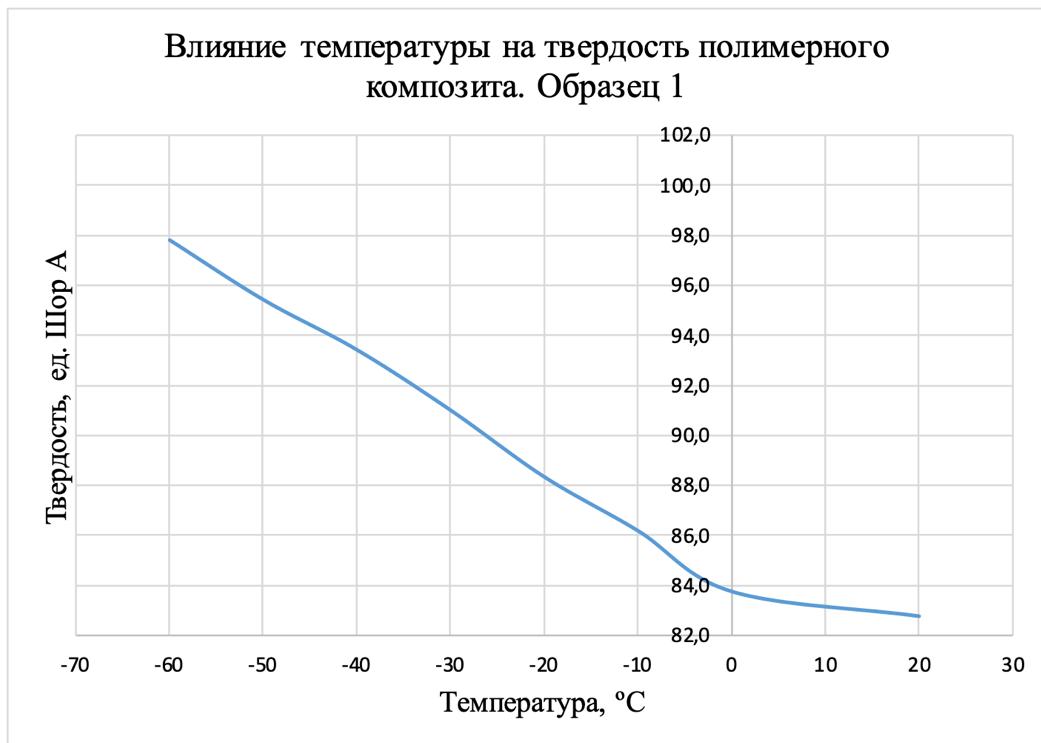


Рис. 3. – Влияние температуры на твердость резинового эластомера ТПРК

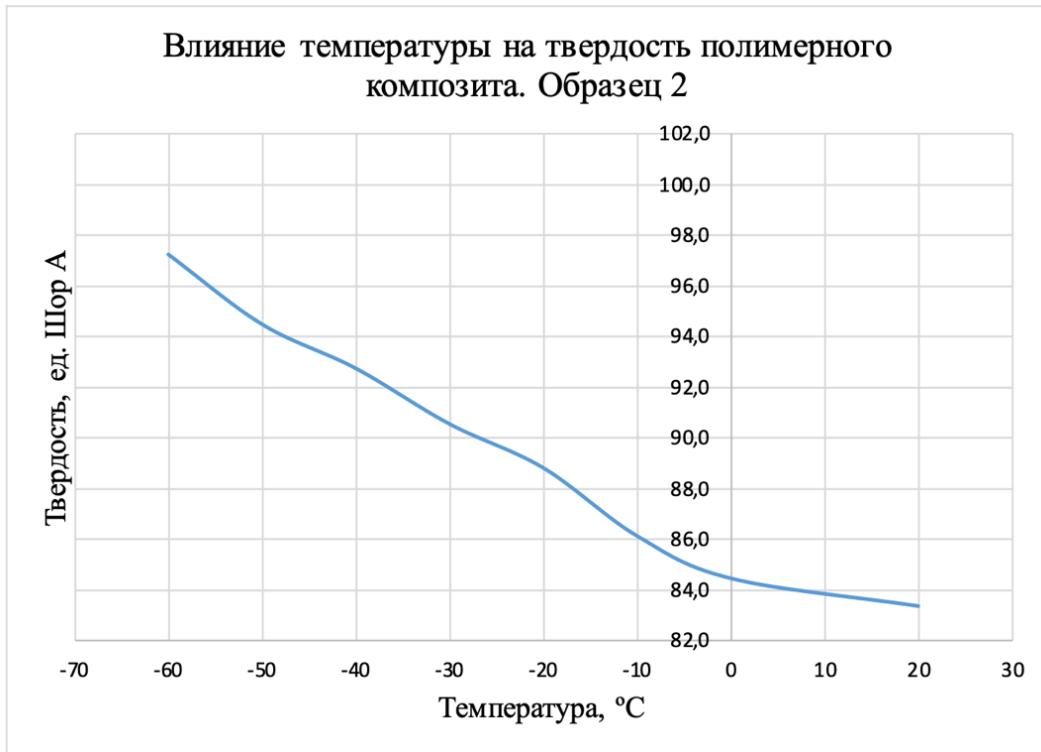


Рис. 4. – Влияние температуры на твердость резинового эластомера ТПРК-Д

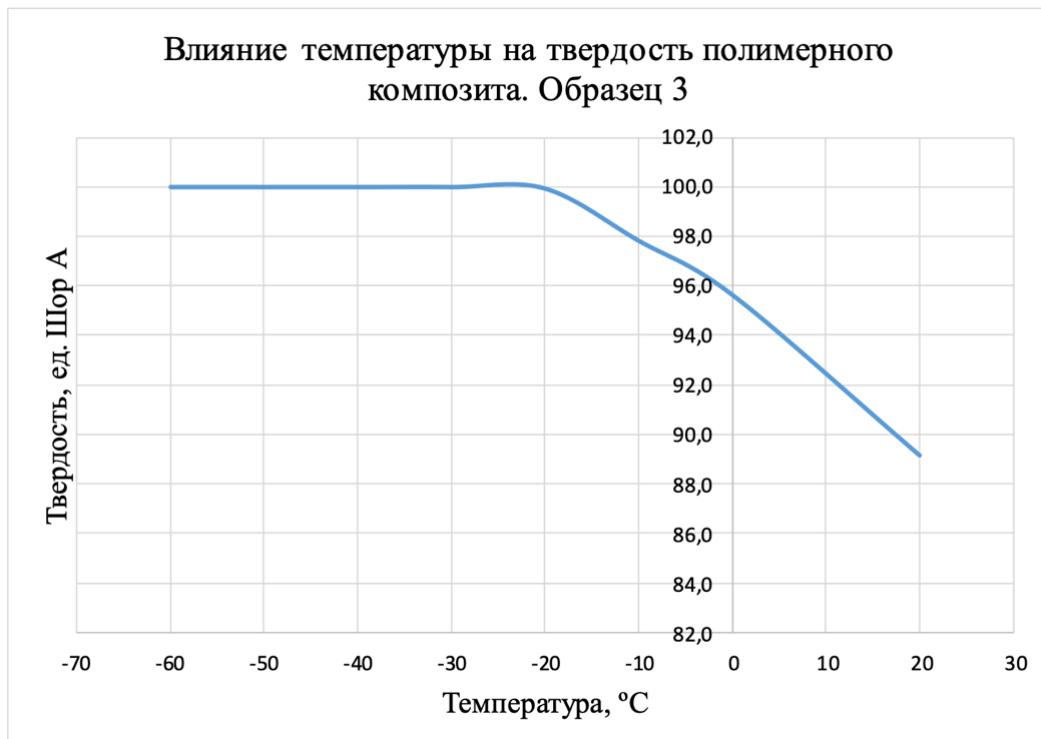


Рис. 5 – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2вж-1

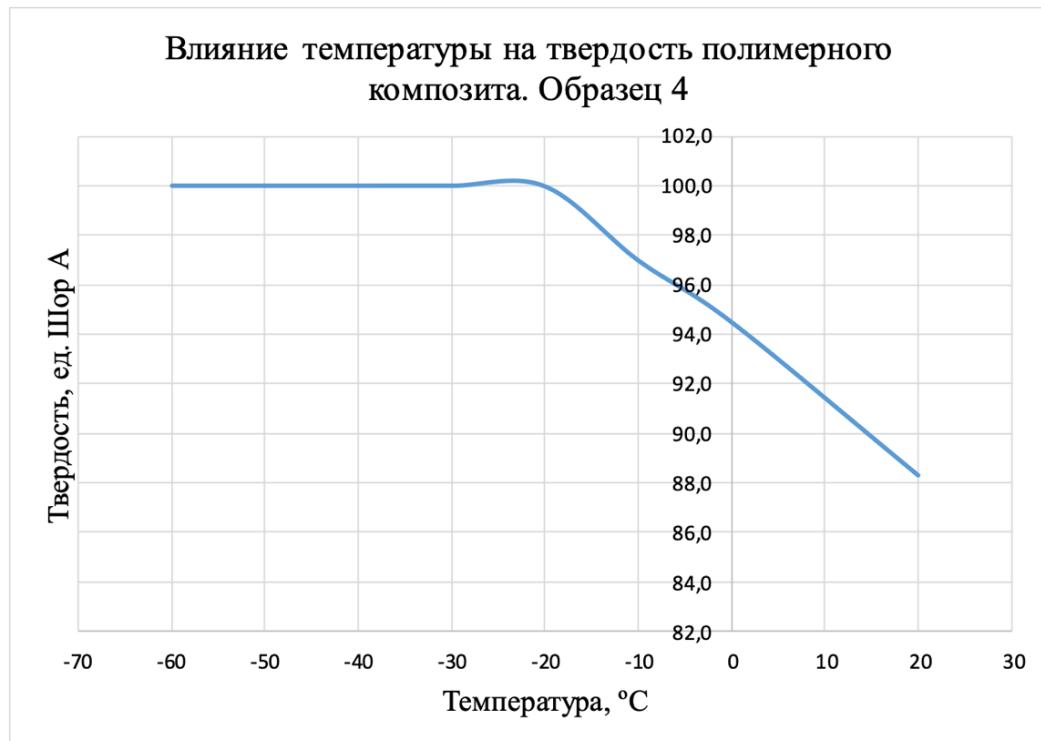


Рис. 6. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2вж-2

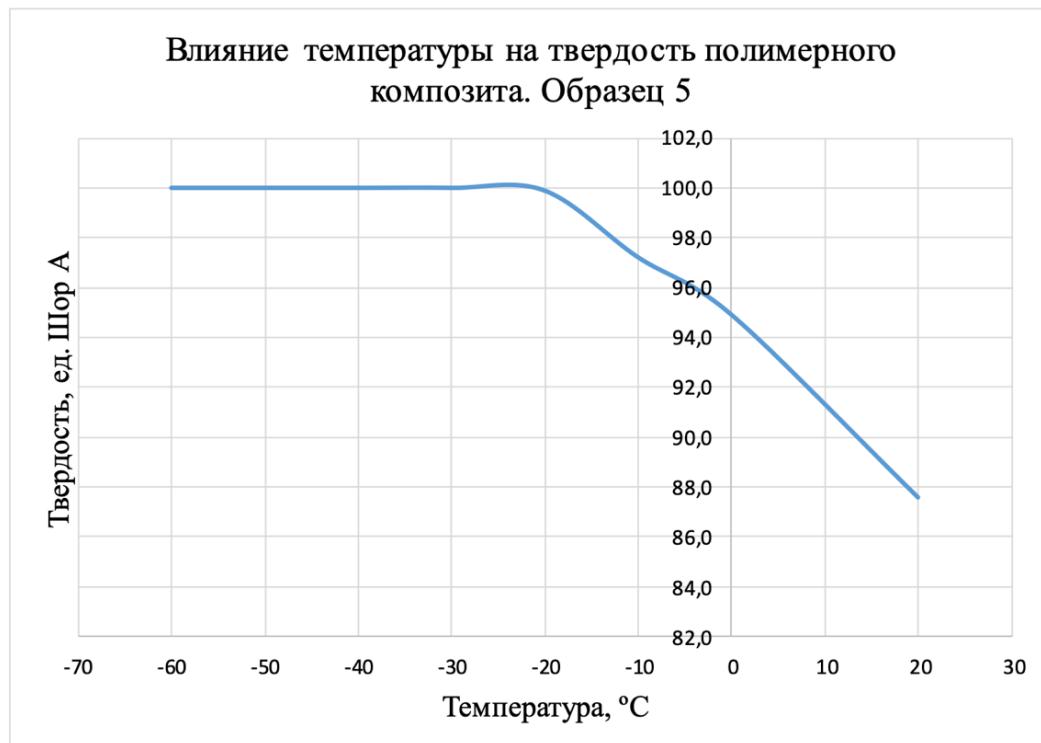


Рис. 7. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2нж

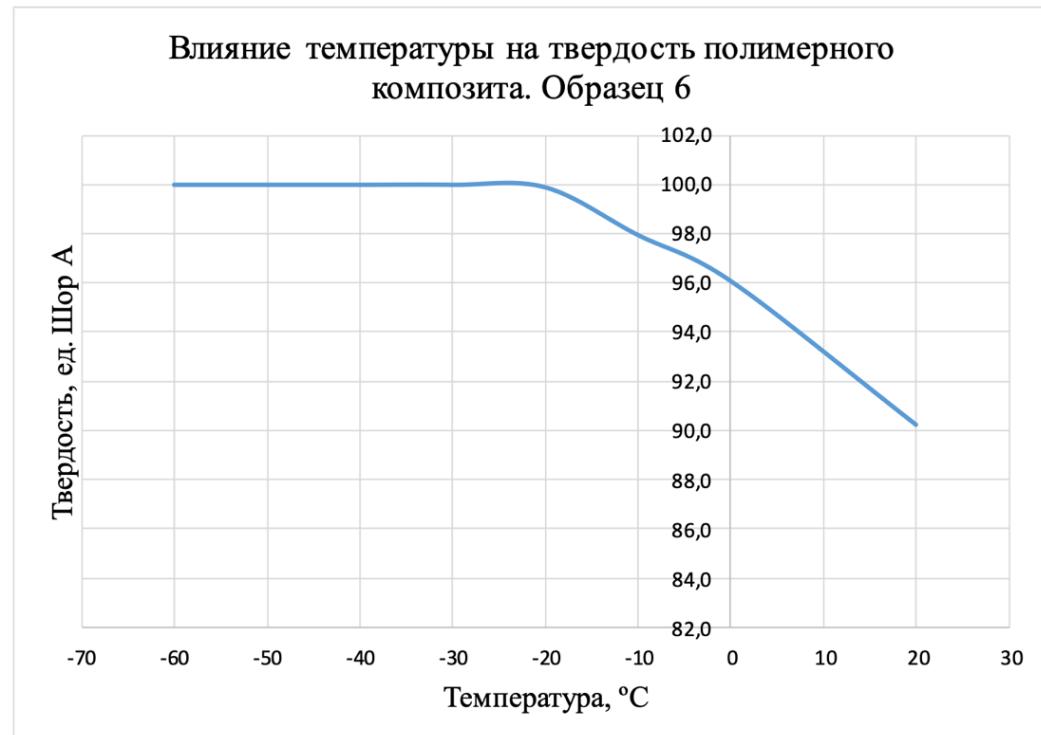


Рис. 8. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭПА

Повышение твёрдости на 2-3 ед. Шор А при охлаждении связано с зарождением кристаллизационных процессов в эластомерной матрице, однако эти процессы не приводят к полной потере подвижности макромолекул. Отсутствие горизонтального участка на зависимостях HRA(Т) подтверждает сохранение высокоэластического состояния материала даже при минимальных температурах. Температура стеклования для данных резиновых эластомеров в статических условиях оценивается как  $T_g \approx$  минус 60 – минус 65°C.

Для термопластичных эластомеров (образцы 3-6) характерна иная динамика. На зависимостях HRA(Т) фиксируется резкое возрастание твёрдости с последующим выходом на плато при температурах минус 20 °С. Это свидетельствует о достижении состояния структурного насыщения, обусловленного переходом материала в стеклообразное состояние. Таким образом, для термоэластопластов температура стеклования  $T_g$  составляет минус 20 °С. При этом изменение содержания жёсткой фазы практически не влияет на морозостойкость материалов, что указывает на доминирующую роль химического строения полимерной основы в формировании низкотемпературных свойств.

Статистическая обработка данных подтверждает достоверность экспериментальных результатов. Распределения величин твёрдости по Шору А на каждой температурной ступени сгруппированы вокруг среднего значения с малым разбросом. Среднеквадратические отклонения составили: для образца 1-3,55 ед.; для образца 2-2,92 ед.; для термоэластопластов 3-6 - в пределах 2,11-2,50 ед. Низкие значения  $\sigma$  свидетельствуют о высокой воспроизводимости результатов и корректности методики измерений.

Интерпретация полученных зависимостей показывает, что для резиновых эластомеров (ТПРК, ТПРК-Д) при понижении температуры наблюдается упорядочение структурных элементов, не приводящее к

---

стеклованию, что объясняет их повышенную морозостойкость. Для термоэластопластов (ТЭП-серии и ТЭПА) стеклование наступает значительно раньше, при минус 20°C, что ограничивает их эксплуатацию в условиях экстремально низких температур.

По результатам экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Проведённые испытания подтвердили информативность и воспроизводимость метода оценки склонности к стеклованию по температурной зависимости твёрдости по Шору А эластомерных композитов различной природы.

2. Установлено, что резиновые эластомеры сохраняют высокоэластическое состояние до минус 60 °C, не достигая области стеклования, в то время как термопластичные эластомеры переходят в стеклообразное состояние уже при минус 20 °C.

3. Результаты статистического анализа ( $\sigma \leq 3,6$  ед.) подтверждают стабильность и достоверность полученных данных.

4. Получена хорошая сходимость результатов испытаний с ранее проведенными исследованиями динамических модулей упругости представленных эластомерных композитов.

5. Для оценки морозостойкости эластомерных материалов предложено использовать критическую температуру, при которой наблюдается достижение твёрдости 100 ед. Шор А, что коррелирует с потерей демпфирующих свойств.

6. В практическом аспекте, среди исследованных материалов только резиновые эластомеры удовлетворяют эксплуатационным требованиям к работе в диапазоне температур до минус 50 – минус 60 °C. С учётом действующих динамических нагрузок температура стеклования таких

материалов может смещаться примерно на 10 °С в сторону более низких температур вследствие тепловыделения при диссипации энергии колебаний.

Таким образом, результаты апробации предложенной методики демонстрируют её эффективность для сравнительной оценки низкотемпературных свойств композиционных эластомеров, а также её применимость для выбора материалов демпфирующих и уплотнительных элементов транспортной инфраструктуры, эксплуатируемых в северных и арктических регионах.

## Литература

1. Чайкун А. М., Юмашев О. Б., Сергеев А. В. Особенности разработки рецептуры морозостойкой озоностойкой резины на основе этиленпропиленового каучука // Труды ВИАМ. – 2022. – №. 9 (115). – С. 58-67. – DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-9-58-67.
2. Павлова В. В., Соколова М. Д., Федорова А. Ф. Влияние содержания и природы пластификатора на свойства бутадиен-нитрильной резины // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 222-232. – DOI 10.17516/1999-494X-0303.
3. Третьякова Н. А., Нагорная М. Н. Влияние технического углерода на температуру стеклования резин на основе морозостойких каучуков нового поколения // Каучук и резина. – 2022. – Т. 81, № 4. – С. 184-187. – DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-4-184-187.
4. Ашайчик А. А., Полонский В. Л. Экспериментальное исследование свойств уплотнительных резин при высоких и низких температурах // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 656-664.
5. Белослюдцева Д. Я., Федорова А. Ф. Изучение влияния каучуков неполярной природы на морозостойкость хлоропреновых резин // Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сборник материалов и

докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. – С. 266-268. – DOI 10.24412/cl-37269-2024-1-266-268.

6. Мухин В. В., Петрова Н. Н. Климатическое старение резин на основе эпихлоргидринового каучука в нефти при низких температурах // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2017. – № 6(62). – С. 59-66. – DOI 10.25587/SVFU.2017.62.8448.

7. Федорова А. Ф., Давыдова М. Л., Шадринов Н. В. и др. Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2022. – Т. 27. – №. 2. – С. 316-326. – DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326.

8. Каблов В. Ф., Аксёнов В. И. Современные тенденции применения каучуков и наполнителей в рецептуре резин // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2018. – № 3. – С. 24-34. – DOI 10.24411/2071-8268-2018-10305.

9. Буковский П. О., Морозов А. В., Петрова Н. Н., Тимофеева Е. Н. Исследование влияния активированных углеродных нанотрубок на трибологические свойства морозостойкой резины // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2019. – №. 6. – С. 148-154. – DOI 10.1134/S0572329919060059.

10. Семенова С. Н., Сулейманов Р. Р., Чайкун А. М. Совместное использование этиленпропилендиенового и метилфенилсилоксанового каучуков в рецептуре морозостойкой и озоностойкой резины // Труды ВИАМ. – 2019. – №. 9 (81). – С. 64-72. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-9-64-72.

---

11. Kaiser S., Rabbani R., Ahmed R., Kaiser S. Temperature dependent mechanical properties of natural and synthetic rubber in practical structures // Acta Mechanica Slovaca. – 2021. – Vol. 25, No. 3. – pp. 6-14. – DOI 10.21496/ams.2021.031.

### References

1. Chaykun A. M., Yumashev O. B., Sergeyev A. V. Trudy VIAM. 2022. №. 9 (115). Pp. 58-67. DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-9-58-67.
2. Pavlova V. V., Sokolova M. D., Fedorova A. F. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya. Tekhnika i tekhnologii. 2021. T. 14, № 2. Pp. 222-232. DOI 10.17516/1999-494X-0303.
3. Tret'yakova N. A., Nagornaya M. N. Kauchuk i rezina. 2022. T. 81, № 4. Pp. 184-187. DOI 10.47664/0022-9466-2022-81-4-184-187.
4. Asheychik A. A., Polonskiy V. L. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva. 2016. T. 17, № 3. Pp. 656-664.
5. Beloslyudtseva D. YA., Fedorova A. F. Sbornik materialov i dokladov Vserossiyskoy konferentsii, priurochennoy k 75-letiyu YANTS SO RAN, Yakutsk, 19–23 sentyabrya 2024 goda. Kirov: Mezhregional'nyy tsentr innovatsionnykh tekhnologiy v obrazovanii, 2024. Pp. 266-268. DOI 10.24412/cl-37269-2024-1-266-268.
6. Mukhin V. V., Petrova N. N. Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. 2017. № 6(62). Pp. 59-66. DOI 10.25587/SVFU.2017.62.8448.
7. Fedorova A. F., Davydova M. L., Shadrinov N. V. i dr. Prirodnyye resursy Arktiki i Subarktiki. 2022. T. 27. №. 2. Pp. 316-326. DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326.
8. Kablov V. F., Aksënov V. I. Promyshlennoye proizvodstvo i ispol'zovaniye elastomerov. 2018. № 3. Pp. 24-34. DOI 10.24411/2071-8268-2018-10305.



9. Bukovskiy P. O., Morozov A. V., Petrova N. N., Timofeyeva E. N. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela. 2019. №. 6. Pp. 148-154. DOI 10.1134/S0572329919060059.

10. Semenova S. N., Suleymanov R. R., Chaykun A. M. Trudy VIAM. 2019. №. 9 (81). Pp. 64-72. DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-9-64-72.

11. Kaiser S., Rabbani R., Ahmed R., Kaiser S. Acta Mechanica Slovaca. 2021. Vol. 25, No. 3. Pp. 6-14. – DOI 10.21496/ams.2021.031.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 17.11.2025**

**Дата публикации: 26.12.2025**