

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. Оценка 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 °С (без плато $HRA(T)$), тогда как термоэластопласты демонстрируют резкий подъём твёрдости с насыщением от \approx минус 20 °С, 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, термоэластопласты, 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 холоде, 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 ~ минус 40°C при сохранении нормативного $KM \geq 0,2$ при минус 40°C, что демонстрирует прямую увязку рецептуры с инженерным критерием пригодности в холоде [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 (ТПХ) 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_g 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_g 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 $+100^{\circ}\text{C}$, 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 (вулканизирующих 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 проявляет 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 \sim 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 (ЕСО/СО) 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 холоде 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 вулканизирующей 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 пластифицирование 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 холодоустойчивые 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 А-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): дифференциально-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 ± 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.

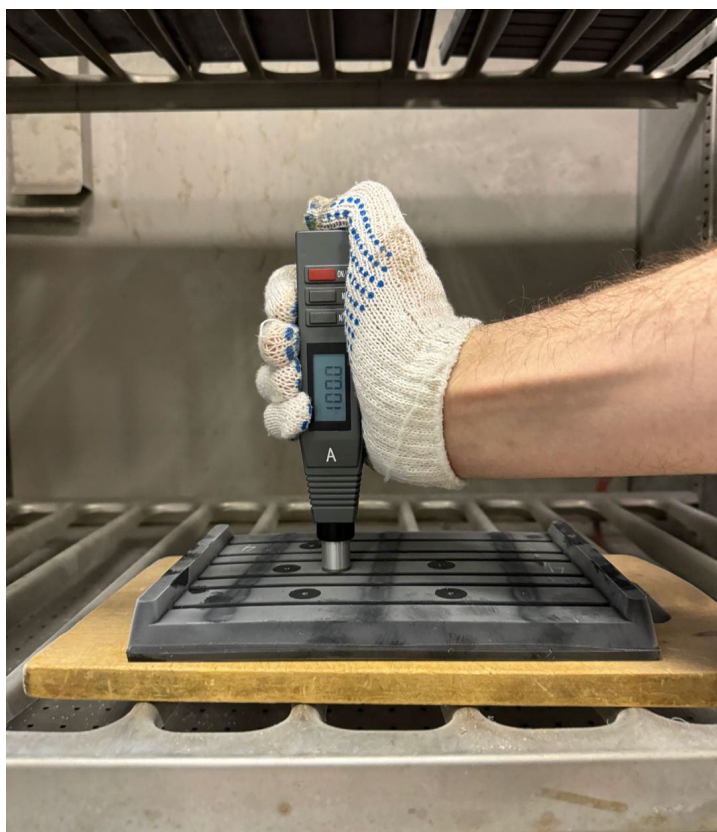


Рис. 2. – Измерение твердости образцов

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	Температура, °C	Твердость, ед. Шор А	Температура, °C	Твердость, ед. Шор А	Температура, °C	Твердость, ед. Шор А	Температура, °C	Твердость, ед. Шор А	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 (σ), характеризующее устойчивость измерений: чем меньше его значение, тем выше точность эксперимента и тем надёжнее полученные зависимости.

В данном исследовании расчёт M , D и σ 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 °C	Образец 1			Образец 2			Образец 3		
	M	D	σ	M	D	σ	M	D	σ
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 °C	Образец 4			Образец 5			Образец 6		
	M	D	σ	M	D	σ	M	D	σ
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.

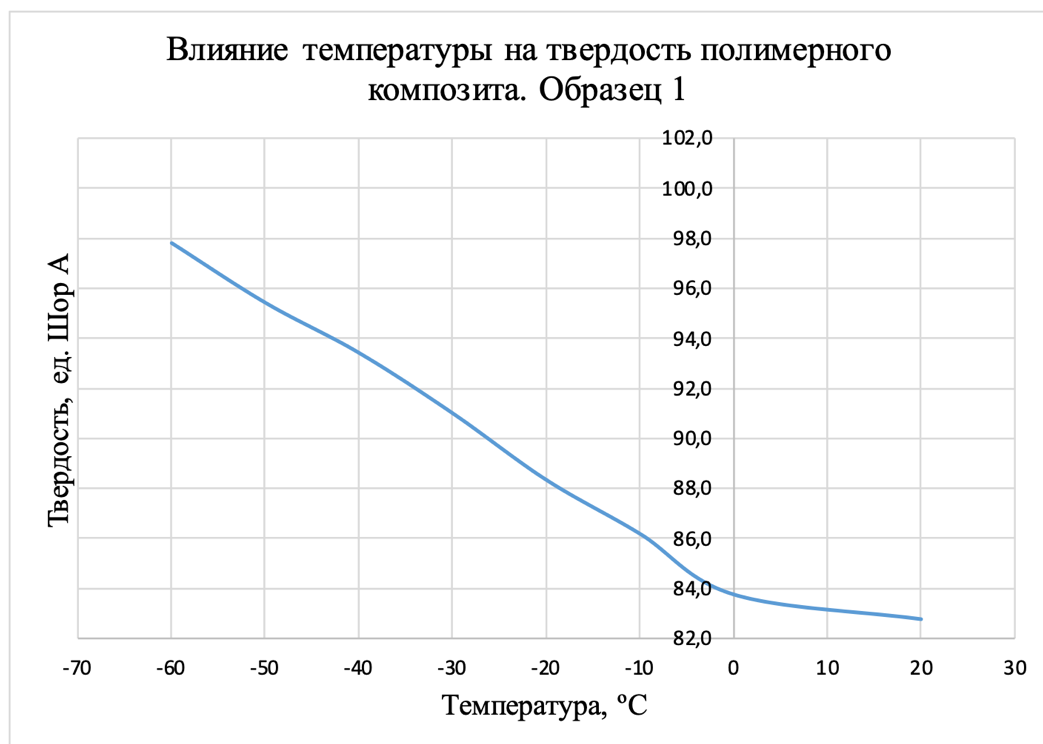


Рис. 3. – Влияние температуры на твердость резинового эластомера ТПРК

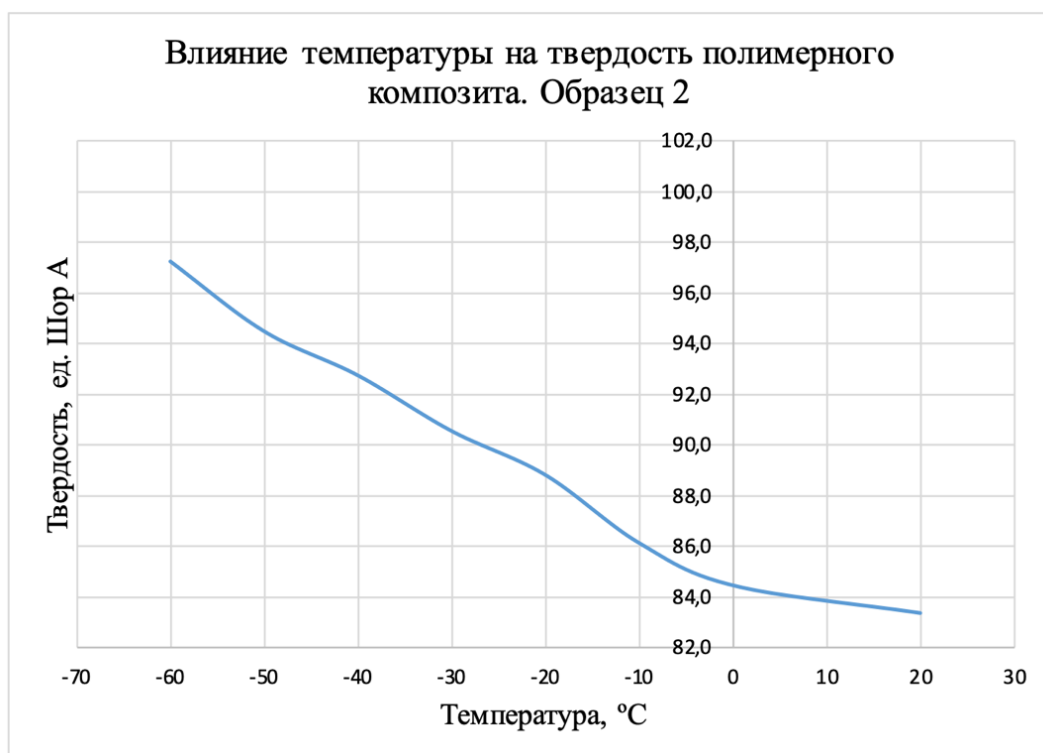


Рис. 4. – Влияние температуры на твердость резинового эластомера ТПРК-Д

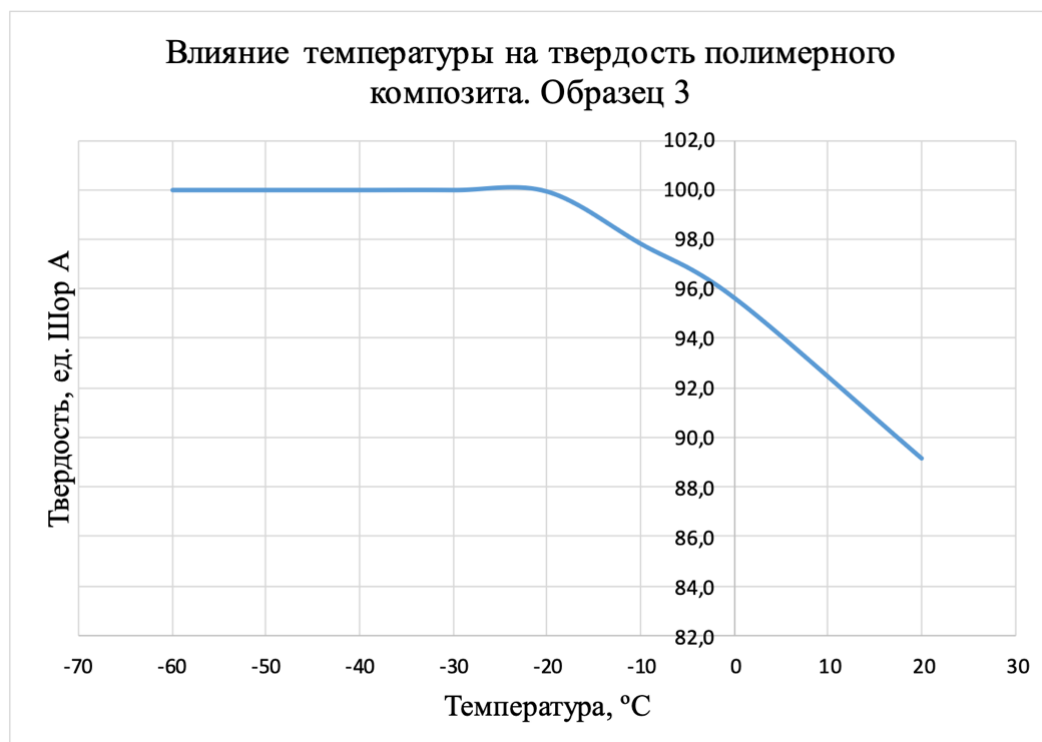


Рис. 5 – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2вж-1

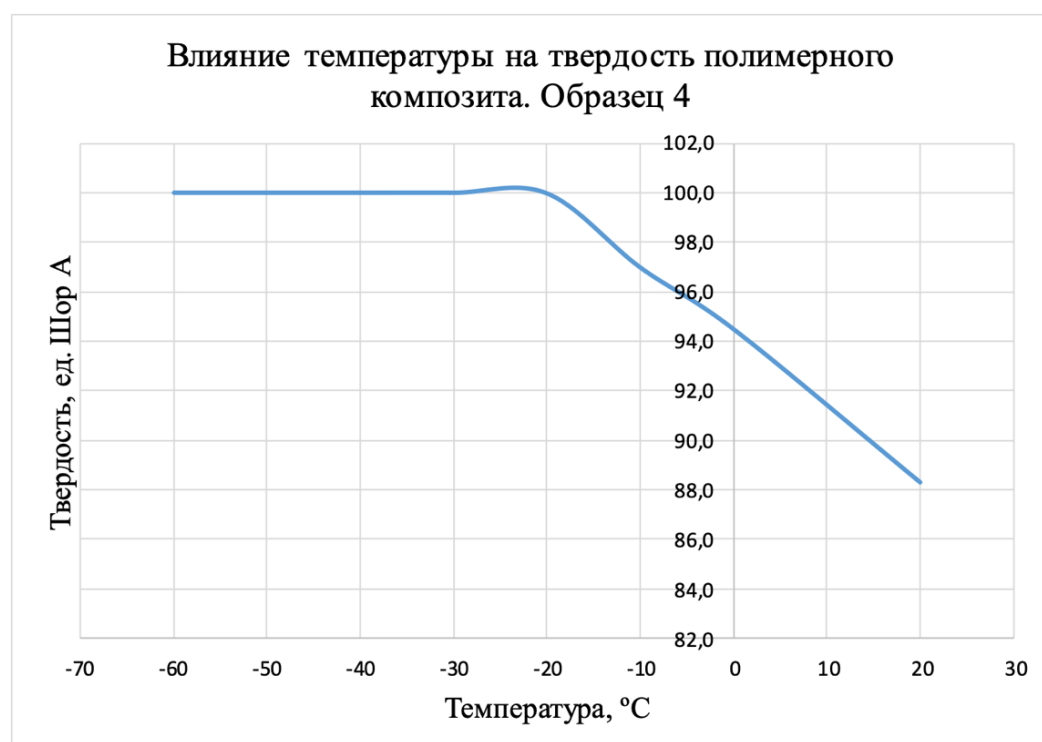


Рис. 6. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2вж-2

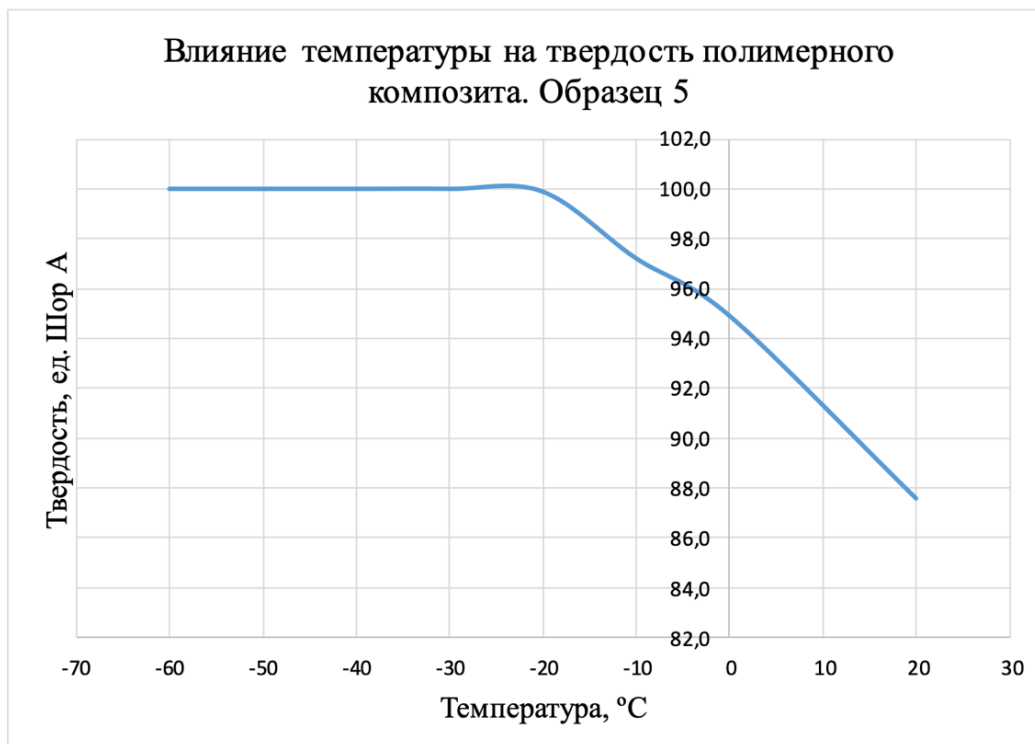


Рис. 7. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭП2нж

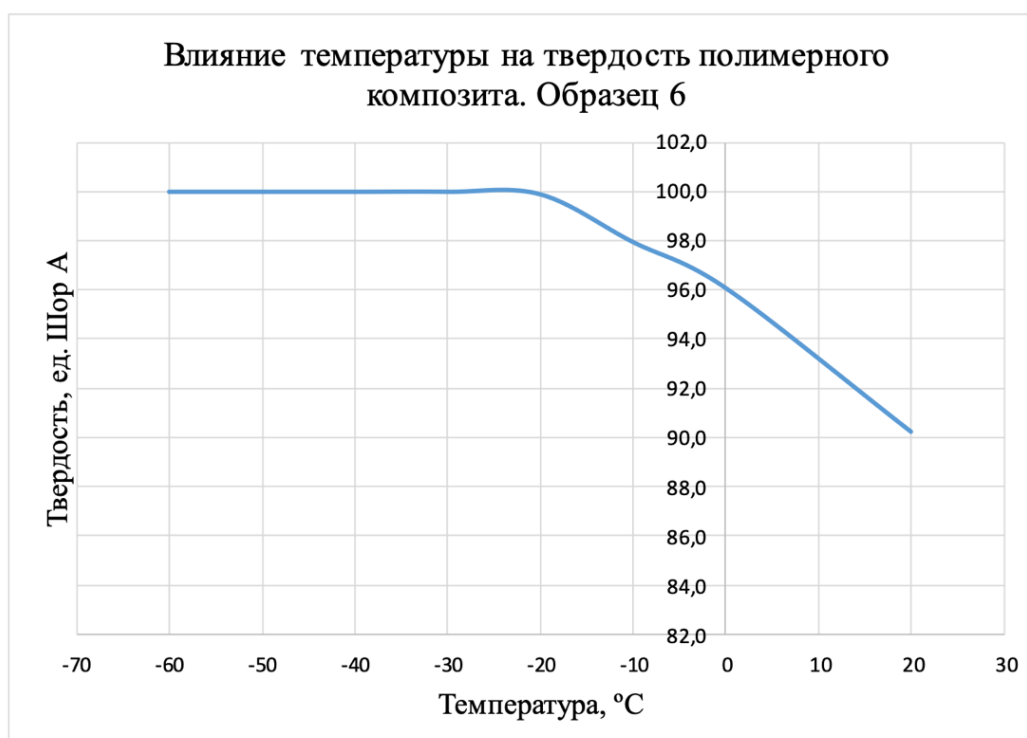


Рис. 8. – Влияние температуры на твердость термоэластопласта ТЭПА

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(T) 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(T) фиксируется резкое возрастание твёрдости с последующим выходом на плато при температурах минус 20 °C. Это свидетельствует о достижении состояния структурного насыщения, обусловленного переходом материала в стеклообразное состояние. Таким образом, для термоэластопластов температура стеклования T_g составляет минус 20 °C. 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 σ 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. Ашейчик 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., Шадрин 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: Mezhhregional'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