

# Разработка морозостойких уплотнительных колец для обеспечения противопожарной безопасности в Арктических регионах РФ

Игорь Сергеевич Макаров<sup>1</sup>✉, Афанасий Алексеевич Дьяконов<sup>1, 2</sup>,  
Надежда Николаевна Лазарева<sup>1</sup>, Алексей Александрович Синяков<sup>3</sup>,  
Евгений Геннадьевич Паренко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup> Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия

<sup>3</sup> Федеральная противопожарная служба Государственной противопожарной службы Главное управление МЧС России по Республике Саха (Якутия), г. Якутск, Россия

<sup>4</sup> АО «Водоканал», г. Якутск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В условиях активного освоения Арктики вопрос обеспечения пожарной безопасности становится стратегической задачей. В настоящее время существует проблема затвердевания и поломки уплотнительных колец при наступлении температуры  $-40^{\circ}\text{C}$ , при заявленных рабочих температурах  $-60^{\circ}\text{C}$ , согласно категории климатических исполнений УХЛ-1, что может привести к трудностям и нештатным ситуациям во время тушения пожаров. Поэтому актуальной задачей становится разработка морозостойких уплотнительных колец. Для увеличения их срока эксплуатации и стойкости к старению необходимо использовать в рецептуре резиновой смеси противостарители.

**Цель исследования.** Подбор противостарителей для создания рецептуры морозостойких уплотнительных колец на основе бутадиенового каучука марки СКД-В, предназначенных для использования в пожарных рукавах и гидрантах.

**Задачи:**

1. Определение влияния противостарителей на свойства резиновой смеси на основе бутадиенового каучука СКД-В.
2. Исследование физико-механических и структурных свойств эластомеров.
3. Испытание изготовленных уплотнительных колец на основе разработанной рецептуры в реальных условиях эксплуатации на базе МЧС по Республике Саха (Якутия) и АО «Водоканал».

**Объекты и методы исследования.** В ходе работы изучали упруго-прочностные свойства, износостойкость, стойкость образцов к воде, твердость, остаточное деформационное сжатие, стойкость к термическому старению и структурные свойства разработанных эластомеров на основе каучука СКД-В.

**Результаты и их обсуждение.** Противостарители повысили упруго-прочностные свойства, предположительно, за счет стабилизации полимерной сетки, однако при применении IPPD происходит его вымывание и окрашивание воды в желтый цвет. Термическое старение снизило эластичность образцов на 32–56 %, комбинированные системы противостарителей продемонстрировали меньшую деградацию, подтвердив их эффективность. Лабораторные и натурные испытания подтвердили работоспособность разработанных уплотнительных колец в арктических условиях в соответствии с категорией климатических исполнений УХЛ-1.

**Заключение.** В ходе работы была разработана морозостойкая резиновая смесь. Выбрана комбинация противостарителей нафтам-2 и ацетонамила.

**Ключевые слова:** Якутия; безопасность; рукавная линия; пожарные гидранты; тушение пожаров; УХЛ-1

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации НИР по ГЗ № FSRG-2023-0026.

**Для цитирования:** Макаров И.С., Дьяконов А.А., Лазарева Н.Н., Синяков А.А., Паренко Е.Г. Разработка морозостойких уплотнительных колец для обеспечения противопожарной безопасности в Арктических регионах РФ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 40–49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.40-49

✉ Макаров Игорь Сергеевич, e-mail: misergeevich@mail.ru

# Development of Frost-Resistant Sealing Rings for Fire Safety in the Arctic Regions of the Russian Federation

Igor S. Makarov<sup>1</sup>✉, Afanasiy A. Dyakonov<sup>1, 2</sup>, Nadezhda N. Lazareva<sup>1</sup>, Alexey A. Sinyakov<sup>3</sup>, Evgeny G. Parenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Federal Fire Service of the State Fire Service Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

<sup>4</sup> JSC "Vodokanal", Yakutsk, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** In the context of active Arctic development, ensuring fire safety has become a strategic task. Currently, there is a problem of hardening and breaking of sealing rings when the temperature drops to  $-40^{\circ}\text{C}$ , despite the declared operating temperature of  $-60^{\circ}\text{C}$ , according to the UHL-1 climate category. This can lead to difficulties and emergency situations during firefighting. Therefore, the development of frost-resistant sealing rings is a pressing issue. To extend their service life and improve aging resistance, it is necessary to incorporate anti-aging agents into the rubber compound formulation.

**The aim** of the research is to identify a suitable anti-aging agent for the formulation of frost-resistant sealing rings made from SKD-V butadiene rubber, designed for use in fire hoses and hydrants.

### Objectives:

1. Determination of the effect of anti-aging agents on the properties of rubber compounds based on SKD-V butadiene rubber.
2. Investigation of the physico-mechanical and structural properties of elastomers.
3. Testing of the manufactured sealing rings based on the developed formulation under real operating conditions at the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Sakha (Yakutia) and JSC "Vodokanal".

**Objects and methods of research.** The study examined the elastic-strength properties, wear resistance, water resistance of the specimens, hardness, residual compressive deformation, thermal aging resistance and structural properties.

**Results and their discussion.** Antioxidants improved the elastic-strength properties, presumably due to the stabilization of the polymer network. However, when using IPPD, leaching and water discoloration were observed. Thermal aging reduced the elasticity of the specimens by 32–56 %, while combined systems demonstrated lower degradation, confirming their effectiveness. Laboratory and field tests verified the performance of the developed sealing rings in Arctic conditions in accordance with the UHL-1 climate category.

**Conclusions.** A frost-resistant rubber compound was developed in the course of the study. A combination of anti-aging agents, Naftam-2 and Acetonanil, was selected.

**Keywords:** Yakutia; safety; frost-resistant sealing rings; hose line; fire hydrants; firefighting

**Acknowledgments.** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and was carried out under state contracts No. FSRG-2023-0026.

**For citation:** Makarov I.S., Dyakonov A.A., Lazareva N.N., Sinyakov A.A., Parenko E.G. Development of Frost-Resistant Sealing Rings for Fire Safety in the Arctic Regions of the Russian Federation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):40-49. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.40-49 (rus).

✉ Igor Sergeevich Makarov, e-mail: misergeevich@mail.ru

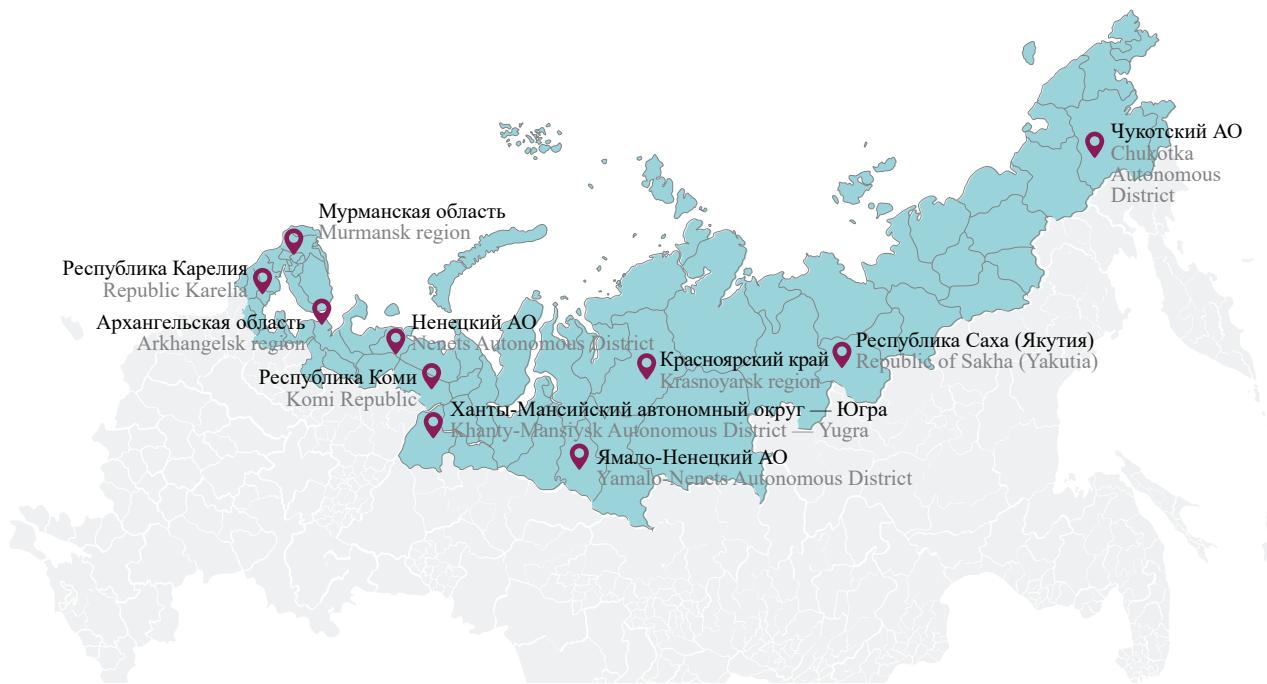
## Введение

В условиях быстрымениющихся климатических условий и возрастающей активности промышленного освоения Арктики вопрос обеспечения пожарной безопасности приобретает особую актуальность. Одними из ключевых элементов, способствующих безопасности и быстрой сборке пожарных линий в экстремально низких температурах, являются уплотнительные кольца. Традиционные материалы, используемые для изготовления этих элементов, часто не справляются с воздействием суровых арктических условий, что приводит к снижению их эксплуатационных характеристик, утечкам и даже аварийным ситуациям.

Разработка морозостойких уплотнительных колец становится необходимой мерой для повышения без-

опасности объектов, функционирующих в Арктических регионах РФ (рис. 1). Эти специализированные компоненты должны не только сохранять эластичность и герметичность при экстремально низких температурах, но и противостоять постоянным механическим нагрузкам. Новые материалы и технологические решения, направленные на улучшение характеристик уплотнений, открывают перспективы для создания оборудования, способного функционировать в условиях длительной эксплуатации в Арктике без потери качества и надежности [1]. Актуальность темы обусловлена не только сложностью климатических условий, но и стратегическим значением Арктики

<sup>1</sup> Арктическая зона Российской Федерации. URL: <https://erdc.ru/about-azrf/>



**Рис. 1. Арктическая зона Российской Федерации<sup>1</sup>**  
**Fig. 1. The Arctic Zone of the Russian Federation<sup>1</sup>**

для энергетической и транспортной инфраструктуры России [2]. Так, в настоящее время ведется активная разработка морозостойких уплотнительных резин российскими [3, 4] и зарубежными учеными [5–7].

На территории Якутии и других арктических регионов<sup>2</sup> зимний пожароопасный период сопровождается сложностями в эксплуатации пожарных систем [8]. По данным МЧС Якутии<sup>3</sup>, только с начала 2025 г. в республике зарегистрировано 136 техногенных пожаров, при которых погибло 8 человек. Из общего количества пожаров 90 произошли в жилом секторе. За зимний период (ноябрь, декабрь 2023 г. и январь 2024 г.) в жилых помещениях якутян произошло 230 пожаров<sup>4</sup>.

При установлении сильных морозов пожарные сталкиваются с трудностями при разборке рукавных линий, поскольку некоторые стандартные уплотнительные кольца теряют гибкость и растрескиваются. Это приводит к утечке воды, снижению давления в системе и увеличению времени тушения пожара [9, 10]. Для обеспечения надежности работы пожар-

ного оборудования в арктических условиях необходимы уплотнители, способные сохранять свою эластичность и работоспособность вплоть до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Для решения проблемы несоответствия заявленных эксплуатационных характеристик уплотнительных колец авторами разработана рецептура морозостойкой резиновой смеси на основе бутадиенового каучука, содержащей активный наполнитель [11, 12] и противостарители [13, 14]. В данном исследовании рассматривается влияние разных комбинаций противостарителей.

## Объекты и методы исследования

Объектами исследования в работе являются: морозостойкий бутадиеновый каучук марки СКД-В [15–17], противостарители нафтам-2, ацетонанил, IPPD.

Исследуемые смеси изготавливали в резиномесителе закрытого типа Plastograph EC Plus (Brabender, Германия) при следующих параметрах смешения: начальная температура  $-40^{\circ}\text{C}$ , время смешения — 20 мин [11].

Рецептуры исследуемых резиновых смесей приведены в табл. 1.

В рамках работы для оценки физико-механических и температурных свойств исследуемых образцов использовали следующие методы исследования: упруго-прочностные свойства анализировали на универсальной разрывной установке Autograph AGS-JSTD (Shimadzu, Япония) в соот-

<sup>2</sup> О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : Указ Президента РФ от 02.05.2014 № 296 (ред. от 13.05.2019) // Собрание законодательства РФ. 05.05.2014. № 18 (часть I). Ст. 2136.

<sup>3</sup> 8 якутян погибли на пожарах в этом году. URL: <https://yakutia-daily.ru/s-nachala-zimy-v-yakutii-na-pozharah-pogibli-desyat-chelovek/>

<sup>4</sup> С начала зимы в Якутии на пожарах погибли десять человек. URL: <https://yakutia-daily.ru/s-nachala-zimy-v-yakutii-na-pozharah-pogibli-desyat-chelovek/>

**Таблица 1.** Рецептура резиновой смеси на основе бутадиенового каучука СКД-В с различными противостарителями  
**Table 1.** Formulation of the rubber compound based on SKD-V butadiene.rubber with various

Ингредиенты Ingredients	Мас. ч. Phr							
	1	2	3	4	5	6	7	8
СКД-В SKD-V	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Стеариновая кислота Stearic acid	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Сульфенамид Ц Sulfenamide C	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Оксид цинка Zinc oxide	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Сера Sulfur	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Технический углерод П803 Carbon Black P803	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Ацетонанил Acetonanil	—	0,5	—	—	0,5	0,5	—	0,5
Нафтам-2 Naftam-2	—	—	0,5	—	0,5	—	0,5	0,5
IPPD	—	—	—	0,5	—	0,5	0,5	0,5

ветствии с ISO 37–2020<sup>5</sup>. Износстойкость материалов определяли на испытательной машине МИ-2 («Полимермаш Групп», Россия) в соответствии с ISO 4649–1985<sup>6</sup>. Для оценки устойчивости к воде образцы выдерживали в ней при комнатной температуре в течение 72 ч, твердость по Шору А измеряли согласно ISO 7619-1–2009<sup>7</sup>, остаточную деформацию сжатия в соответствии с ISO 815-1–2017<sup>8</sup>. Термическое старение проводили в лабораторной сушильной камере при 100 °C в течение 72 ч (ISO 188–2013). Температурные исследования включали определение: температуры стеклования с использованием дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия), температурного предела хрупкости тестером хрупкости UWP-091 (UPWELL, Китай). Температурные фазовые переходы образцов изучали на термомеханическом анализаторе TMA-60/60H (Shimadzu, Япония). Микроструктуру низкотемпературных

сколов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония).

## Результаты и их обсуждение

Результаты полученных физико-механических свойств представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при добавлении противостарителей незначительно увеличиваются упругопрочностные свойства эластомеров относительно исходной смеси. Наибольшими показателями относительного удлинения при разрыве обладают образцы с комбинацией противостарителей нафтам-2 + IPPD и ацетонанил + нафтам-2 + IPPD — 189 %. Также увеличивается условная прочность при разрыве на 11 % относительно исходной смеси, она находится в диапазоне от 11,1 до 11,5 МПа. Введение противостарителей практически не влияет на твердость по Шору А, плотность, износстойкость.

В результате испытаний установлено, что все противостарители, кроме ацетонанила, увеличивают степень набухания резин в водной среде. Зарегистрировано, что введение IPPD (рис. 2) как самостоятельно, так и в комбинации с другими противостарителями приводит к окрашиванию воды в желтый цвет. Окрашивание воды при использовании IPPD указывает на миграцию противостарителя из эластомера. Это явление возникает, предположительно, из-за недостаточной совместимости IPPD с полимерной матрицей, что приводит к его вымыванию [18]. Данный эффект критичен для изделий, применяемых в контакте

<sup>5</sup> ГОСТ ISO 37–2020. Резина и термоэластопласти. Определение упругопрочностных свойств при растяжении.

<sup>6</sup> ISO 4649:1985. Резина. Определение стойкости к истиранию с использованием врачающегося цилиндрического барабанного устройства.

<sup>7</sup> ГОСТ Р ИСО 7619-1–2009. Резина вулканизованная или термо-пластичная. Определение твердости при вдавливании. Часть 1. Метод с применением дюрометра (твердость по Шору).

<sup>8</sup> ГОСТ Р ИСО 815-1–2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Резина и термоэластопласти. Определение остаточной деформации при сжатии. Часть 1. Испытания при стандартной или повышенной температурах.

**Таблица 2.** Физико-механические свойства эластомеров на основе каучука СКД-В в зависимости от применяемого противостарителя

Table 2. Physico-mechanical properties of elastomers based on SKD-.rubber depending on the applied antioxidants

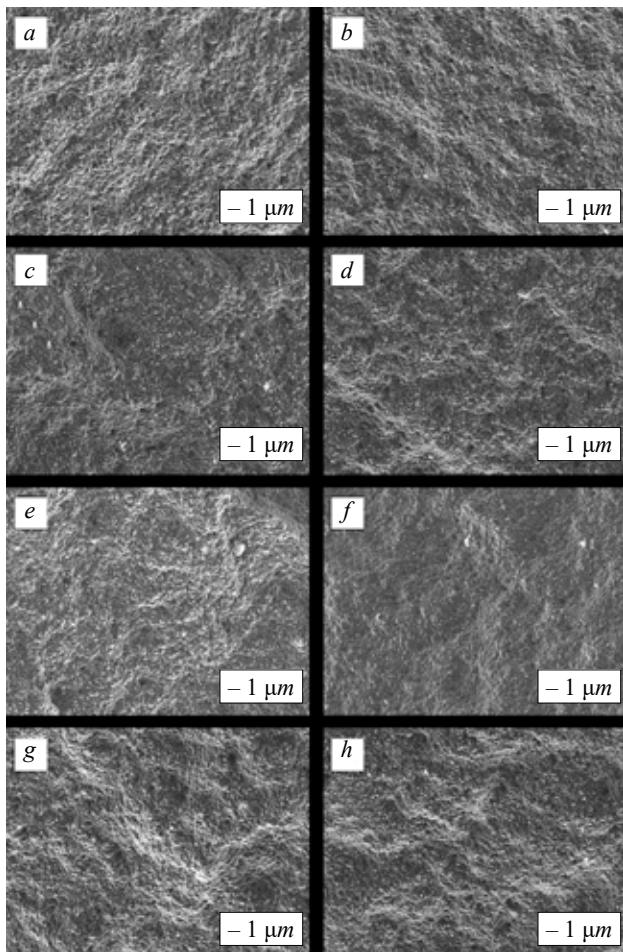
Свойства Properties	Рецептуры Formulations							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Свойства вулканизатов Vulcanize properties							
$\varepsilon p$ , %	169	182	174	171	179	181	189	189
$f_p$ , МПа $f_p$ , MPa	10,3	11,2	11,4	11,2	11,5	11,1	11,3	11,1
$f_{100\%}$ , МПа $f_{100\%}$ , MPa	7,1	7,3	7,8	7,8	7,8	7,4	7,4	7,3
$H$ , Шор А $H$ , Shore A	82	83	82	82	81	82	81	81
$\rho$ , г/см <sup>3</sup> $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,27	1,27	1,26
$\Delta Q$ (вода), % $\Delta Q$ (water), %	0,84	0,56	1,16	1,41	1,01	1,00	1,09	0,96
$\Delta V$ , см <sup>3</sup> $\Delta V$ , cm <sup>3</sup>	0,13	0,10	0,09	0,10	0,15	0,15	0,14	0,18
<i>После термической обработки</i> <i>After heat treatment</i>								
$\varepsilon p$ , %	84	79	99	95	111	123	122	113
$f_p$ , МПа $f_p$ , MPa	10,1	9,4	10,0	10,4	10,7	11,3	11,2	10,3
$f_{100\%}$ , МПа $f_{100\%}$ , MPa	—	—	—	—	10,1	9,9	9,8	9,5
$H$ , Шор А $H$ , Shore A	86	86	85,2	87	86	86	87	86
$\rho$ , г/см <sup>3</sup> $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
ОДС, % CS, %	75,24	64,44	66,45	81,91	66,5	66,61	64,42	68,24

Примечание:  $\varepsilon p$  — относительное удлинение при разрыве, %;  $f_p$  — условная прочность при разрыве, МПа;  $f_{100\%}$  — условное напряжение при удлинении на 100%, МПа;  $H$  — твердость по Шору А, Шор А;  $\rho$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  $\Delta Q$  (вода) — степень набухания в воде, %;  $\Delta V$  — объемное истирание, см<sup>3</sup>; ОДС — остаточное деформационное сжатие, %.

Note:  $\varepsilon p$  — relative elongation at break, %;  $f_p$  — tensile strength, MPa;  $f_{100\%}$  — tensile stress at 100% elongation, MPa;  $H$  — Shore A hardness, Shore A;  $\rho$  — density, g/cm<sup>3</sup>;  $\Delta Q$  (water) — degree of swelling in water, %;  $\Delta V$  — volume abrasion, cm<sup>3</sup>; CS — compression set, %.



Рис. 2. Образцы после выдержки в воде  
Fig. 2. Specimens after soaking in water



**Рис. 3.** Микрофотографии поверхности низкотемпературного скола эластомеров в зависимости от противостарителей: *a* — исходный; *b* — ацетонанил; *c* — нафтам-2; *d* — IPPD; *e* — ацетонанил + нафтам-2; *f* — ацетонанил + IPPD; *g* — нафтам-2 + IPPD; *h* — ацетонанил + IPPD + нафтам-2

**Fig. 3.** Microphotographs of the low-temperature fracture surface of the studied elastomers depending on the antioxidants: *a* — without antioxidants; *b* — acetonanil; *c* — naftam-2; *d* — IPPD; *e* — acetonanil + naftam-2; *f* — acetonanil + IPPD; *g* — naftam-2 + IPPD; *h* — acetonanil + IPPD + naftam-2

**Таблица 3.** Температурные свойства исследуемых эластомеров  
Table 3. Thermal properties of the studied elastomers

Свойства Properties	Рецептуры Formulations							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{\text{тек}}, ^\circ\text{C}$ $T_{g,t}, ^\circ\text{C}$	-82,8	-82,7	-87,3	-86,2	-87,7	-87,7	-86,9	-90,6
$T_{\text{ф.п.}}, ^\circ\text{C}$ $T_{f,t}, ^\circ\text{C}$	-80,6	-73,6	-76,1	-76,1	-73,9	-77,4	-77,1	-83,4
$T_{\text{п.х.}}, ^\circ\text{C}$ $T_{b,p}, ^\circ\text{C}$	<-70	<-70	<-70	<-70	<-70	<-70	<-70	<-70

Примечание:  $T_{\text{тек}}$  — температура стеклования,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{ф.п.}}$  — температура фазового перехода,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{п.х.}}$  — температурный предел хрупкости,  $^\circ\text{C}$ .

Note:  $T_{g,t}$  — glass transition temperature,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{f,t}$  — phase transition temperature,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{b,t}$  — brittleness temperature limit,  $^\circ\text{C}$ .

с водой, так как это может снижать долговечность за счет вымывания противостарителя из материала.

Исследования свойств эластомеров после термического старения показали снижение относительного удлинения у образцов на 32–56 % в зависимости от используемых противостарителей, у исходного образца снижение составило 50 %. При добавлении противостарителей по отдельности стойкость к старению уменьшается, однако при добавлении их комбинаций происходит ее увеличение. Это указывает на более эффективную защиту эластомеров. Твердость стала выше на 3–6 Шор А, плотность после старения осталась без изменений. Условное напряжение при удлинении на 100 % после старения зафиксировалось только при использовании комбинации противостарителей (рецептуры 5–8). Снижение свойств после старения связано с деструктивными процессами в полимерной матрице, вызванными термоокислительной деградацией [19]. Однако комбинация противостарителей продемонстрировала более высокую стойкость к старению по сравнению с их отдельным применением, предположительно, за счет их синергетического эффекта, что минимизирует потерю эластичности и прочности при термическом старении.

На рис. 3 представлены микрофотографии структуры низкотемпературного скола исследуемых эластомеров на основе СКД-В с содержанием различных комбинаций противостарителей.

Как видно из полученных микроснимков, противостарители не влияют на структуру поверхности эластомера. Во всех исследуемых образцах наблюдается общее равномерное распределение ингредиентов в объеме матрицы, что говорит о том, что введение противостарителей не нарушает гомогенность эластомерной матрицы [20]. Единичные агломерации наблюдаются на рисунках *c*, *e*, *f*, которые, предположительно, являются оксидом цинка.



**Рис. 4.** Внедрение уплотнительных колец  
Fig. 4. Implementation of sealing rings

Отсутствие видимых дефектов на поверхности сколов согласуется с близкими значениями твердости по Шору A и условного напряжения, так как макроструктура материала сохраняет свою целостность.

В табл. 3 приведены температурные свойства исследуемых эластомеров в зависимости от введенных противостарителей.

На основании полученных данных из табл. 3 видно, что при введении противостарителей происходит снижение температуры стеклования относительно исходного образца, это может быть связано с увеличением подвижности полимерных цепей за счет введения дополнительного компонента (противостарителя).

Температура фазового перехода находится в диапазоне от  $-83,4^{\circ}\text{C}$  до  $-73,6^{\circ}\text{C}$ , таким образом материал способен сохранять способность к обратимой деформации и эластичность даже в условиях экстремального холода ( $-70^{\circ}\text{C}$ ), что критически важно для эксплуатации в арктических и субарктических регионах. Данные свойства обеспечивают надежность уплотнительных элементов и сохранение герметичности соединений в условиях Арктики.

Температурный предел хрупкости для всех образцов ниже  $-70^{\circ}\text{C}$ , это значит, что данные резиновые смеси соответствуют требованиям климатического исполнения УХЛ-1 и способны работать при температурах до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Также авторами были проведены натурные испытания, образцы вынесли на улицу в январе 2025 г. в г. Якутске при температуре окружающей среды  $-51^{\circ}\text{C}$  и оставили на 2 ч. В ходе эксперимента установлено, что образцы полностью сохраняют эластичность при данной температуре, что подтверждает их

способность обеспечивать герметичность соединения в условиях экстремальных температур.

На основе разработанной рецептуры резиновой смеси были изготовлены уплотнительные кольца (рис. 4). Опытные образцы колец КН-50, КН-70 и КН-80 были переданы в декабре 2021 г. в части МЧС по Республике Саха (Якутия) и в АО «Водоканал» для испытаний в реальных условиях эксплуатации. По итогам испытаний были получены положительные отзывы от 5 ПСО ФПС ГПС МЧС России по РС(Я) и АО «Водоканал» в 2022 г.

### Заключение

В ходе проведенного исследования разработана рецептура морозостойких уплотнительных колец на основе бутадиенового каучука СКД-В, в качестве противостарителей была выбрана комбинация противостарителей ацетонанил и нафтам-2. Анализ физико-механических, термических и эксплуатационных свойств полученных эластомеров позволил определить оптимальный состав резиновой смеси для использования в качестве уплотнителей для пожарных рукавов и гидрантов.

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

- добавление противостарителей улучшает эластичность и прочностные характеристики резины, снижая температуру стеклования и повышая устойчивость к механическим нагрузкам при низких температурах;
- при добавлении IPPD в резиновую смесь происходит его вымывание из матрицы, о чем свидетельствует окрашивание воды в желтый цвет;
- все исследуемые образцы продемонстрировали температурный предел хрупкости ниже  $-70^{\circ}\text{C}$ , что подтверждает их соответствие требованиям климатического исполнения УХЛ-1 и возможность эксплуатации в арктических регионах;
- физико-механические и температурные свойства показали, что комбинации противостарителей (ацетонанил + нафтам-2) обеспечивают наилучшие прочностные характеристики и минимальную миграцию компонентов;
- натурные испытания при температуре  $-51^{\circ}\text{C}$  подтвердили сохранение эластичности образцов, что свидетельствует об их высокой работоспособности в реальных условиях эксплуатации;
- опытные образцы уплотнительных колец успешно протестированы в подразделениях МЧС Якутии, получены положительные отзывы о надежности изделий;
- осуществлен трансфер научноемкой технологии по разработке уплотнительных колец до практического испытания на базе МЧС по Республике Саха (Якутия) и АО «Водоканал».

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Kuzmina E.S. Problems of operation of elastomer materials in the arctic region // KnE Materials Science. 2016. No. 1 (1). Pp. 129–134. DOI: 10.18502/kms.v1i1.574
2. Ищенко А.Д., Таранцев А.А., Шидловский А.Л. Об особенностях действий по тушению пожара в условиях Арктики // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 3 (55). С. 16–20. EDN KJIGOH.
3. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Shim E.L., Cho J-H. Preparation and improved physical characteristics of propylene oxid.rubber composites // Molecules. 2018. No. 23 (9). P. 2150. DOI: 10.3390/molecules23092150
4. Mukhin V.V., Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedorov A.L., Baisheva A.V. Investigation of the plasticizer content effects on the operability of the epichlorohydrin.rubber based elastomeric material during full-scale test under cold climate conditions and hydrocarbon medium influence // Materials Science Forum. 2019. No. 945. Pp. 417–421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.417
5. Wu S., Xiao F., Chen Q., Liu Y., Guo B. Low temperature sealing behavior evaluation of elastomers in aircraft hydraulic systems // Rubber Chemistry and Technology. 2024. No. 97 (1). Pp. 44–58. DOI: 10.5254/rct.23.76992
6. Wu L., Liao S., Wang Y. Cold-Resistant Rubbers Based on Flexible Polymer Chains // Chinese Journal of Chemistry. 2023. No. 41 (17). Pp. 2197–2205. DOI: 10.1002/cjoc.202300078
7. Wang X., Zhang Y., Ren Sh., Xu Z., Li K., Hao X. et al. Effect of zinc oxide/layered double hydroxide on the mechanics of silicon.rubber at low temperature // European Polymer Journal. 2023. No. 200. P. 112478. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112478
8. Алецков М.В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2013. № 22 (5). С. 59–64. EDN QIYYVL.
9. Караманчук Е.А., Коноваленко П.Н., Багажков И.В. Разворачивание сил и средств в условиях низких температур // Совершенствование форм и методов проведения мероприятий, направленных на защиту населения и территорий от возможных ЧС природного и техногенного характера в Арктической зоне Республики Коми : сб. мат. Всеросс. круглого стола. Усинск : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 23–25. EDN MHAFRZ.
10. Пивкин А.С. Обзор пожарного автомобиля для условий Крайнего Севера АЦ-СОР 2,0-20 на базе шасси КамАЗ «Гефест» и его аналога // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2022. № 1 (5). С. 12–16. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.83.91.002
11. Макаров И.С., Дьяконов А.А., Спиридов А.М., Стручкова Т.С., Охлопкова А.А., Петрова Н.Н. и др. Влияние содержания технического углерода на свойства бутадиенового эластомера // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. № 16 (8). С. 977–985. EDN INBBYP.
12. Kaliyathan A.V., Rane A.V., Huskic M., Kunaver M., Kalarikkal N., Rouxel D. et al. Carbon black distribution in natura.rubber/butadien.rubber blend composites: Distribution driven by morphology // Composites Science and Technology. 2020. No. 200. P. 108484. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108484
13. Макаров И.С. Исследование влияния противостарителей на свойства бутадиенового эластомера // Аммосов-2023 : сб. мат. общеунивер. науч. конф. студентов и магистрантов. Якутск, 2023. С. 719–722. EDN GXXAER.
14. Zhao W., He J., Yu P., Jiang X., Zhang L. Recent progress in the rubber antioxidants : a review // Polymer Degradation and Stability. 2023. No. 207. P. 110223. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110223
15. Золотарев В.Л., Ковалева Л.А. «Титановый» каучук СКД: 1964–2014 // Промышленное производство и использование эластомеров. 2014. № 4. С. 3–4. EDN TILLJL.
16. Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М., Соколова М.Д., Попов С.Н. Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата // Перспективные материалы. 2015. № 11. С. 5–18. EDN UXFYSJ.
17. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // Труды ВИАМ. 2013. № 12. С. 4. EDN RPZGNN.
18. Пучков А.Ф., Спиридонова М.П., Лапин С.В., Куба А.А. Особенности абразивного износа резин, содержащих комплексный противостаритель ПРС-1Н // Каучук и резина. 2016. № 4. С. 16–19. EDN WJXSXT.
19. Мухутдинов Э.А., Дьяконов Г.С. Физико-химические основы ослабления старения резин на примере комплексных ингибиторов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 10. С. 483–504. EDN NBOQYB.
20. Ериков Д.В., Редькин В.Е., Иваненко А.А., Науменко Л.С., Лапковская Е.Ю., Ткачев А.Г. Получение и исследование свойств эластомеров, модифицированных ультрадисперсными (nano) частицами // Каучук и резина. 2011. № 4. С. 19–22. EDN SAXRSX.

## REFERENCES

1. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Kyzmina E.S. Problems of operation of elastomer materials in the arctic region. *KnE Materials Science*. 2016; 1(1):129-134. DOI: 10.18502/kms.v1i1.574
2. Ishchenko A.D., Tarantsev A.A., Shidlovsky A.L. About the features of fire extinguishing actions in arctic conditions. *Problems of technosphere risk management*. 2020; 3(55):16-20. EDN KJIGOH. (rus).
3. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., Shim E.L., Cho J-H. Preparation and improved physical characteristics of propylene oxide rubber composites. *Molecules*. 2018; 23(9):2150. DOI: 10.3390/molecules23092150
4. Mukhin V.V., Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedorov A.L., Baisheva A.V. Investigation of the plasticizer content effects on the operability of the epichlorohydrin.rubber based elastomeric material during full-scale test under cold climate conditions and hydrocarbon medium influence. *Materials Science Forum*. 2019; 945:417-421. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.417
5. Wu S., Xiao F., Chen Q., Liu Y., Guo B. Low temperature sealing behavior evaluation of elastomers in aircraft hydraulic systems. *Rubber Chemistry and Technology*. 2024; 97(1):44-58. DOI: 10.5254/rct.23.76992
6. Wu L., Liao S., Wang Y. Cold-Resistant Rubbers Based on Flexible Polymer Chains. *Chinese Journal of Chemistry*. 2023; 41(17):2197-2205. DOI: 10.1002/cjoc.202300078
7. Wang X., Zhang Y., Ren Sh., Xu Z., Li K., Hao X. et al. Effect of zinc oxide/layered double hydroxide on the mechanics of silicon.rubber at low temperature. *European Polymer Journal*. 2023; 200:112478. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112478
8. Aleshkov M.V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory of the Russian Federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(5):59-64. EDN QIYYVL. (rus).
9. Karamanchuk E.A., Konovalenko P.N., Bagazhkov I.V. Deployment of forces and means under low temperature conditions. *Improving the forms and methods of carrying out events aimed at protecting the population and territories from possible natural and man-made emergencies in the Arctic zone of the Komi Republic : collection of materials from the All-Russian round table*. Usinsk, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023; 23-25. EDN MHAFRZ. (rus).
10. Pivkin A.S. Overview of a fire truck for the conditions of the Far North AC-SOR 2.0-20 based on the KAMAZ "Gefest" chassis and its analog. *Actual problems of safety in the technosphere*. 2022; 1(5):12-16. DOI: 10.34987/2712-9233.2022.83.91.002 (rus).
11. Makarov I.S., Dyakonov A.A., Spiridonov A.M., Struchkova T.S., Okhlopkova A.A., Petrova N.N. et al. Influence of carbon black content on the properties of butadiene. *Engineering & Technologies. Journal of Siberian Federal University*. 2023; 16(8):977-985. EDN INBBYP (rus).
12. Kaliyathan A.V., Rane A.V., Huskic M., Kunaver M., Kalarikkal N., Rouxel D. et al. Carbon black distribution in natura. rubber/butadien.rubber blend composites: Distribution driven by morphology. *Composites Science and Technology*. 2020; 200:108484. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108484
13. Makarov I.S. Study of the influence of antioxidants on the properties of butadiene elastomer. *Ammosov-2023 : collection of materials of the all-university scientific conference of students and masters*. Yakutsk, 2023; 719-722. EDN GXXAER (rus).
14. Zhao W., He J., Yu P., Jiang X., Zhang L. Recent progress in the rubber antioxidants : a review. *Polymer Degradation and Stability*. 2023; 207:110223. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110223
15. Zolotarev V.L., Kovaleva L.A. "Titanium" butadien.rubber: 1964–2014. *Industrial Production and Use of Elastomers*. 2014; 4:3-4. EDN TILLJL. (rus).
16. Eliseev O.A., Chaikun A.M., Buznik V.M., Sokolova M.D., Popov S.N. The basic principles of creation of formula cold-resistan.rubbers stock for the products maintained in the condition of the Arctic climate. *Prospective Materials*. 2015; 11:5-18. EDN UXFYSJ. (rus).
17. Chaikun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Features of cold-resistant curin.rubber compounds on the basis of different rubbers. *Proceeding of VIAM*. 2013; 12:4. EDN RPZGNN (rus).
18. Puchkov A.F., Spiridonova M.P., Lapin S.V., Kiba A.A. Some features of abrasive wear of rubbers containing complex antioxidant PRS-1N. *Rubber and Rubber Products*. 2016; 4:16-19. EDN WJXSXT. (rus).
19. Mukhutdinov E.A., Dyakonov G.S. Physicochemical principles of reducin.rubber aging using complex inhibitors as an example. *Herald of Technological University*. 2010; 10:483-504. EDN NBOQYB. (rus).
20. Ershov D.V., Redkin V.E., Ivanenko A.A., Naumenko L.S., Lapkovskaya E.Yu., Tkachev A.G. Obtaining and studying the properties of elastomers modified with ultra-dispersed (nano) particles. *Rubber and Rubber Products*. 2011; 4:19-22. EDN SAXRSX. (rus).

*Поступила 27.03.2025, после доработки 13.05.2025;*

*принята к публикации 26.05.2025*

*Received March 27, 2025; Received in revised form May 13, 2025;*

*Accepted May 26, 2025*

**Информация об авторах**

**МАКАРОВ Игорь Сергеевич**, аспирант, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; ORCID: 0000-0002-2794-1164; e-mail: misergeevich@mail.ru

**ДЬЯКОНОВ Афанасий Алексеевич**, к.т.н., старший научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1; ResearcherID: LTF-2325-2024; AuthorID: 745234; ORCID: 0000-0002-6959-368X; e-mail: afonya71185@mail.ru

**ЛАЗАРЕВА Надежда Николаевна**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующая УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов» имени доцента С.А. Слепцовой, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677013, г. Якутск, ул. Белинского, 58; ResearcherID: E-5063-2014; AuthorID: 730168; ORCID: 0000-0001-5090-0793; e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

**СИНЯКОВ Алексей Александрович**, старший лейтенант внутренней службы, помощник начальника дежурной смены службы пожаротушения 5 пожарно-спасательного отряда, Федеральная противопожарная служба Государственной противопожарной службы Главного управления МЧС России по Республике Саха (Якутия), Россия, 677009, г. Якутск, ул. Дзержинского, 35а; ORCID: 0009-0007-5432-8166; e-mail: sinyakov87@mail.ru

**ПАРЕНКО Евгений Геннадьевич**, заместитель главного инженера, АО «Водоканал», Россия, 677001, г. Якутск, ул. Богдана Чижика, 19; ORCID: 0009-0000-0425-2377; e-mail: parenkoeg@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Макаров И.С.** — создание образцов для исследований; проведение опытов; участие в апробации полученных результатов; формирование выводов; написание исходного текста и доработка текста статьи.

**Дьяконов А.А.** — научное руководство; концепция исследования; участие в апробации полученных результатов; формирование выводов; доработка текста статьи.

**Лазарева Н.Н.** — научное консультирование; формирование выводов; доработка текста статьи.

**Синяков А.А.** — проведение опытных испытаний уплотнительных колец на базе 5-го пожарно-спасательного отряда ФПС ГПС Главного управления МЧС России по Республике Саха (Якутия); формирование выводов.

**Паренко Е.Г.** — проведение опытных испытаний уплотнительных колец на базе АО «Водоканал»; формирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about the authors**

**Igor S. MAKAROV**, Postgraduate student, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2794-1164; e-mail: misergeevich@mail.ru

**Afanasii A. DYAKONOV**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; Researcher, Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Oktyabrskaya St., 1, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ResearcherID: LTF-2325-2024; AuthorID: 745234; ORCID: 0000-0002-6959-368X; e-mail: afonya71185@mail.ru

**Nadezhda N. LAZAREVA**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Research and Educational Laboratory “Polymer Nanocomposite Technologies” named after Associate Professor S.A. Sleptsova, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova, Belinskogo St., 58, Yakutsk, 677013, Russian Federation; ResearcherID: E-5063-2014; AuthorID: 730168; ORCID: 0000-0001-5090-0793; e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

**Alexey A. SINYAKOV**, Senior Lieutenant of the Internal Service, Assistant Chief of the Duty Shift of the Firefighting Service, 5th Fire and Rescue Unit, Federal Fire Service of the State Fire Service Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia), Dzerzhinsky St., 35a, Yakutsk, 677000, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-5432-8166; e-mail: sinyakov87@mail.ru

**Evgeny G. PARENKO**, Deputy Chief Engineer, JSC “Vodokanal”, Bogdana Chizhika St., 19, Yakutsk, 677001, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-0425-2377; e-mail: parenkoeg@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Makarov I.S.** — creation of samples for research; conducting experiments; participation in the approbation of the results; formation of conclusions; writing the source text and finalizing the text of the article.

**Dyakonov A.A.** — scientific guidance; research concept; participation in the approbation of the results; formation of conclusions; revision of the text of the article.

**Lazareva N.N.** — scientific consulting; formation of conclusions; revision of the text of the article.

**Sinyakov A.A.** — conducting pilot tests of sealing rings on the basis of the 5th fire and rescue squad of the FPS GPS of the Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Republic of Sakha (Yakutia); formation of conclusions.

**Parenko E.G.** — conducting pilot tests of sealing rings on the basis of JSC Vodokanal; formation of conclusions. The authors declare no conflicts of interests.