

Обзорная статья

УДК 621.315.616.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-103-117

ФТОРКАУЧУКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМАХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

Г.Р. Аляутдинова¹, А.А. Евдокимов¹, В.Д. Ворончихин¹, М.А. Венедиктова¹, А.В. Сергеев¹

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

Аннотация. Приведен обзор научно-технической литературы в области фторкаучуков, наиболее перспективных для изготовления резиновых смесей, которые используются в топливных системах авиационной техники, эксплуатируемых при повышенных температурах в контакте с топливами и маслами. Выявлено, что наиболее термостойким типом каучуков является перфторкаучук, температура эксплуатации которого может достигать 315 °С. Установлено, что в РФ наиболее перспективны марки фторкаучуков производства АО «ГалоПолимер» и ФГУП «НИИСК».

Ключевые слова: фторкаучук, резиновая смесь, топливная система, авиационная техника, гетероцепные фторкаучуки, карбоцепные фторкаучуки, перфторкаучук

Для цитирования: Аляутдинова Г.Р., Евдокимов А.А., Ворончихин В.Д., Венедиктова М.А., Сергеев А.В. Фторкаучуки, используемые для разработки резиновых смесей, применяемых в топливных системах авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 103–117. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-103-117.

Review article

FLUOROELASTOMERS USED FOR THE DEVELOPMENT OF RUBBER COMPOUNDS APPLIED IN AIRCRAFT FUEL SYSTEMS (review)

G.R. Alyautdinova¹, A.A. Evdokimov¹, V.D. Voronchikhin¹, M.A. Venediktova¹, A.V. Sergeev¹

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

Abstract. The paper provides a review of scientific and technical literature on fluoroelastomers that are most promising for manufacturing rubber compounds used in aircraft fuel systems operated at elevated temperatures in contact with fuels and oils. It has been revealed that perfluoroelastomers are the most heat-resistant type of rubber, the service temperature of which can reach 315 °C. It has been established that in the Russian Federation, the most promising grades of fluoroelastomers are produced by JSC «HaloPolymer» and FSUE «Research Institute of Synthetic Rubber» (FSUE «SRIIRS»).

Keywords: fluoroelastomer, rubber compound, fuel system, aviation equipment, heterochain fluoroelastomers, carbochain fluoroelastomers, perfluoroelastomer

For citation: Alyautdinova G.R., Evdokimov A.A., Voronchikhin V.D., Venediktova M.A., Sergeev A.V. Fluoroelastomers used for the development of rubber compounds applied in aircraft fuel systems (review). *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 103–117. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-103-117.

Введение

За последние годы требования к резинам, используемым при изготовлении различных силовых установок, возросли [1, 2]. Бурное развитие высокоскоростной авиации, ракетной техники, ядерной энергетики и других отраслей промышленности привело к широкому использованию в качестве смазок, теплоносителей и компонентов топлив высокоагрессивных масел (диэфирных, силоксановых), сильных окислителей (дымящая азотная кислота, высококонцентрированная перекись водорода и др.). Все эти химические соединения быстро, особенно при высоких температурах, разрушают резины авиационного назначения, что приводит к преждевременному выходу из строя изделий из них, сокращению срока эксплуатации и длительности межремонтного интервала.

Одним из способов повышения стойкости резин в указанных условиях эксплуатации является применение в качестве полимерной основы фторкаучуков, выдерживающих воздействие высоких температур и агрессивных сред.

Фторкаучуками принято называть каучуки с главной цепью, состоящей из углерода, в макромолекуле которой присутствует существенная доля атомов фтора. Как правило, фторкаучуки являются сополимерами винилиденфторида с другими фторолефинами [3–5].

Фторкаучуки применяются для разработки различных материалов функционального назначения: эластомерных композиций [6], герметизирующих материалов, в том числе выполняющих вспомогательную функцию при изготовлении ответственных изделий [7], огнезащитных материалов авиационного назначения [8], гидрофобизирующих добавок [9], гидрофобных [10] и других материалов [11].

Присутствие значительного количества фтора в молекуле таких каучуков придает им особые свойства, такие как термо- и агрессивностойкость, а в ряде случаев негорючесть [12–15]. Фтор – самый химически активный из всех галогенов элемент, во всех соединениях является электроотрицательным. Высокая электроотрицательность приводит к большой плотности электронов в его атомах, что обуславливает высокую химическую стойкость соединений с углеродом. Помимо этого, атомы фтора, имея малый атомный радиус (0,064 нм) по сравнению с радиусами атомов других галогенов, могут компактно располагаться (до четырех атомов) у углерода, экранируя его в соединениях от различного воздействия [6, 16]. Эти факторы делают связь C–F энергетически прочной, причем прочность повышается с увеличением количества присоединенных атомов фтора. Энергия связи внутримолекулярных сил между атомами C и F (от 394 до 504 кДж/моль) [17, 18] существенно выше энергии связи C–C (~336 кДж/моль) в углеводородах [19].

В данной работе подробно рассмотрены виды фторкаучуков, наиболее применимые для изготовления резиновых смесей, которые используются в топливных системах авиационной техники, эксплуатируемых при повышенных температурах в контакте с топливами и маслами.

Результаты и обсуждение

Отличительной особенностью фторкаучуков от других типов каучуков является прежде всего большее разнообразие химического строения. По строению основной цепи фторкаучуки можно разделить на гетероцепные, основная молекулярная цепь которых состоит из атомов различной природы, и карбоцепные, содержащие в основной молекулярной цепи преимущественно атомы углерода [20, 21].

Среди *гетероцепных фторкаучуков* следует выделить прежде всего фторсилоксановые, фторфосфазеновые, нитрозокаучуки, фтортриазиновые и фторсодержащие полиуретаны [22].

Молекулы *фторсилоксановых каучуков* состоят из фторсодержащих звеньев, обеспечивающих устойчивость к углеводородным средам, и диметилсилоксановых звеньев, придающих морозостойкость. Благодаря наличию винильных групп каучук способен эффективно вулканизоваться органическими пероксидами. Увеличение в каучуке фторсилоксановых звеньев повышает устойчивость резин на их основе к углеводородам. Резины из фторсилоксановых каучуков устойчивы к неполярным окислителям (кислород, озон). Однако резины из них, как и из всех других силоксановых каучуков, разрушаются при контакте с полярными реагентами – кислотами, основаниями. По теплостойкости фторсилоксановые каучуки уступают как карбоцепным фторкаучукам, так и обычным силоксанам. Их применение обосновано, когда к материалу предъявляют совместные требования по высокой морозо- и топливостойкости [23]. Температурный интервал эксплуатации – от -60 до $+200$ °C. Структурная формула фторсилоксановых каучуков представлена на рис. 1.

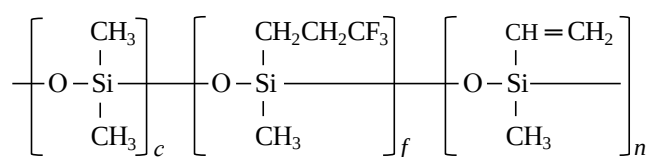


Рис. 1. Фторсилоксановые каучуки

Фторфосфазеновые (фторфосфонитрильные) каучуки используют для изготовления вулканизатов, к которым предъявляют повышенные требования по стойкости к действию кислот, оснований, растворителей и сильных окислителей. Морозостойкость таких каучуков доходит до -60 °C и ниже, а теплостойкость – до $200\text{--}250$ °C. Структурная формула фторфосфазеновых каучуков представлена на рис. 2.

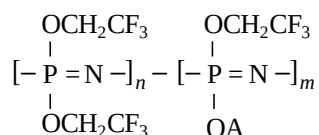


Рис. 2. Фторфосфазеновые каучуки

Как и в случае с фторсилоксановыми каучуками, в структуру фторфосфазеновых каучуков вводят двойные связи для придания способности к вулканизации. Саму стадию вулканизации проводят с использованием органических пероксидов при температуре до 160 °C [24].

Несмотря на то что фторфосфазеновые каучуки обладают уникальным сочетанием морозо-, тепло- и агрессивностойкости и безусловно представляют собой перспективный материал, их синтез является сложным и энергозатратным процессом, в связи с чем их широкое использование при изготовлении резинотехнических изделий (РТИ) затруднено [3–5].

Нитрозокаучуки вследствие высокой химической устойчивости не вулканизируются никакими реагентами. Для обеспечения возможности вулканизации в их полимерные цепи вводят звенья, содержащие карбоксильную группу. Наиболее эффективны группы $-\text{COOH}$, присоединенные к атому азота основной цепи через перфторалкиленовую группу. Для получения такой структуры в качестве третьего мономера используют хлорангидрид нитрозодифторуксусной кислоты ClCOCF_2NO , а в полученном каучуке

хлорангидридные группы гидролизуют до карбоксильных. Однако термическая устойчивость такого каучука низкая и ограничивается температурой $\sim 150^\circ\text{C}$ [3–5].

Наиболее приемлемы нитрозокаучуки, получаемые с использованием в качестве третьего мономера γ -нитрозоперфтормасляной кислоты (рис. 3).

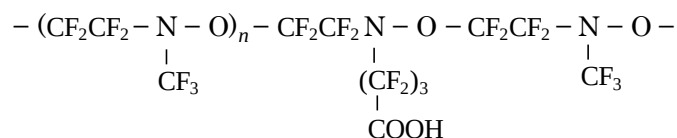


Рис. 3. γ -нитрозоперфтормасляная кислота

Каучуки такого типа вулканизируются трифторацетатом хрома $(\text{CF}_3\text{COO})_3\text{Cr}$ путем обменной реакции. Полученные таким образом резины обладают высокой стойкостью к действию различных агрессивных жидких и газовых сред, повышенной огнестойкостью и работоспособностью в температурном интервале от -50 до $+150^\circ\text{C}$. Однако соединения, образующиеся при вулканизации трифторуксусной кислоты, вызывают коррозию пресс-форм и контактирующих с резинами металлических деталей. Использование вместо трифторацетата хрома других агентов вулканизации, при применении которых не выделяются агрессивные вещества (например, эпоксидные смолы, олигобутидиен с концевыми изоцианатными группами, аминокислоты), нецелесообразно, поскольку полученные резины обладают значительно худшими свойствами.

Таким образом, нитрозокаучуки являются неперспективным материалом, и разработка составов эластомерных материалов с их применением в настоящее время прекращена [3–5]. Реакция получения нитрозокаучуков представлена на рис. 4.

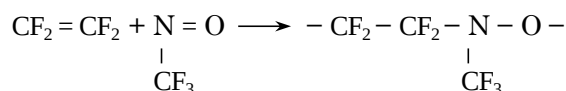


Рис. 4. Получение нитрозокаучуков сополимеризацией тетрафторэтилена с трифторнитрозометаном

Фтортриазиновые каучуки стойки к действию сильных кислот – азотной, серной, соляной, но разрушаются под действием воды и оснований, включая аммиак. Верхний температурный предел эксплуатации данного типа каучука может превышать 350°C . Минимальная температура сохранения эластичности зависит от химического строения группы R_{OF} и может достигать -50°C , если эта группа содержит не менее двух атомов кислорода, соединенных цепочками из не менее чем трех-четырех групп CF_2 . Если в качестве группы R_{OF} выступает перфторалкилен, содержащий менее пяти атомов углерода, то триазиновый полимер представляет собой жесткий пластик. Структурная формула фтортриазиновых каучуков представлена на рис. 5.

Получение таких каучуков связано со сложным многостадийным синтезом, поэтому их практическое применение в ближайшем будущем маловероятно [3–5].

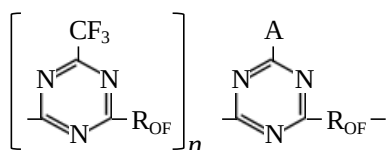


Рис. 5. Фтортриазиновые каучуки

Фторсодержащие полиуретаны обладают широким температурным интервалом эксплуатации – морозостойкостью до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и теплостойкостью до $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]. В процессе полимеризации, например, оксетанов под действием комплексного борфторидного катализатора получают олигомер фторсодержащего полиуретана (рис. 6).

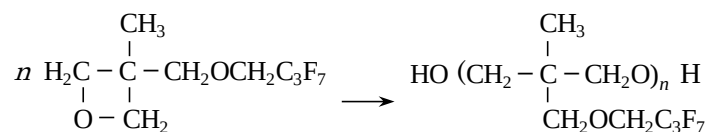


Рис. 6. Получение олигомера фторсодержащего полиуретана

В результате взаимодействия с метилendi(4-циклогексил)диизоцианатом, многоатомным спиртом в качестве сшивающего агента и дилауринатом дибутилолова в качестве катализатора получается мягкий полиуретановый каучук с температурой стеклования $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, не разлагающийся при температуре до $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ (начало разложения при $275\text{ }^{\circ}\text{C}$), устойчивый к воде, метанолу, толуолу, бензину, 20%-ному раствору гидроксида натрия, диметилформамиду, набухающий в тетрагидрофуране или фреоне-113 [3–5]. Недостатками данного типа каучуков являются сложность синтеза и, как следствие, высокая стоимость получаемых продуктов.

Карбоцепные фторкаучуки имеют практически монопольное положение на рынке фторсодержащих каучуков [20]. Все разнообразие карбоцепных фторкаучуков получают сополимеризацией двух или более основных мономеров, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Классификация мономеров, используемых при получении карбоцепных фторкаучуков [3–5]

Мономер	Структурная формула
Винилиденфторид	$\text{CF}_2=\text{CH}_2$
Гексафторпропилен	$\text{CF}_3-\text{CF}=\text{CF}_2$
Тетрафторэтилен	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$
Перфторметилвиниловый эфир	$\text{CF}_3-\text{O}-\text{CF}=\text{CF}_2$
Перфторалкоксиалкилвиниловые эфиры	$\text{F}(\text{CF}_2)_n\text{OR}-\text{O}-\text{CF}=\text{CF}_2$
Пропилен	$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2$
Этилен	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
Трифторхлорэтилен	$\text{CFCl}=\text{CF}_2$

Классификация карбоцепных фторкаучуков представлена в табл. 2.

По способности к вулканизации карбоцепные фторкаучуки можно разделить на три вида:

- для аминной или диольной вулканизации, не содержащие специальных атомов или групп, но включающие группировку $-\text{CF}_2-\text{CH}_2-\text{CF}(\text{CF}_3)-\text{CF}_2-$;
- для пероксидной вулканизации, содержащие атомы хлора, брома или йода;
- содержащие циангруппы CN , вулканизованные тетрафенилолом или 1,1,1,3,3,3-гексафторпропаном.

Сополимеры винилиденфторида, как и все карбоцепные фторкаучуки, практически не растворяются в алифатических и ароматических углеводородах, спиртах, высших органических кислотах, высших кетонах и высших сложных эфирах, что обусловлено внутри- и межмолекулярным взаимодействием и особой природой атома фтора.

Устойчивость карбоцепных фторкаучуков к действию серной, соляной и азотной кислот сохраняется при температурах до 80–100 °С. При более высоких температурах концентрированные серная и азотная кислоты могут окислять фторкаучуки. Резины из карбоцепных фторкаучуков с увеличенным (до 69–71 %) содержанием фтора более устойчивы к действию высокой температуры и агрессивных сред.

Таблица 2

Классификация карбоцепных фторкаучуков

Тип	Группа	Номер группы	Характерные свойства	Примеры
Сополимеры ВФ	Двойные сополимеры (диполимеры) ВФ и ГФП	1	Рабочая температура от –20 до +250 °С; устойчивы к кислотам, окислителям и углеводородам; неустойчивы к органическим и неорганическим основаниям	СКФ-26, Viton A, Tecnoflon NM
	Диполимеры ВФ и ГФП с мономером для пероксидной вулканизации	1В	Те же, но более устойчивы к кислотам и перегретому пару	СКФ-26В, Viton E
	Тройные сополимеры (триполимеры) ВФ, ГФП и ТФЭ	2	Те же, но обладают повышенной теплоустойчивостью и стойкостью к углеводородам	СКФ-264, Viton B, Viton F
	Триполимеры ВФ, ГФП и ТФЭ с мономером для пероксидной вулканизации $\text{CF}=\text{CF}(\text{CF}_2)_2\text{Br}$, $\text{CF}_2=\text{CFBr}$, $\text{CF}_2=\text{CHBr}$, йодсодержащим и др.	2В	Те же, но обладают повышенной устойчивостью к органическим кислотам и перегретому пару	СКФ-264В, Viton GF
	Сополимеры ВФ и ТФХЭ	3	Рабочая температура от –20 до +180 °С; устойчивы к углеводородам и растворам щелочей; неустойчивы к органическим основаниям	СКФ-32
	Сополимеры ВФ и ПФАВЭ	4	Рабочая температура от –50 до +250 °С; устойчивы к кислотам, окислителям и углеводородам; неустойчивы к основаниям и кетонам	СКФ-260В, Viton GLT
Перфторкаучуки	Сополимеры ТФЭ, ПФМВЭ (могут содержать другие ПФАВЭ) и мономера для вулканизации	5	Рабочая температура от –10 до +315 °С; устойчивы практически ко всем химическим средам	Karles, Неофтон
Сополимеры перфторалкена и углеводородного мономера	Сополимеры ТФЭ с пропиленом (или с ВФ в качестве третьего мономера). Сополимеры этилена и ГФП	6	Рабочая температура от –10 до +230 °С; устойчивы к пару, кислотам, ароматическим аминам и окислителям; менее устойчивы к углеводородам; неустойчивы к кетонам и эфирам; обладают высокими диэлектрическими характеристиками	Aflas, Viton TBR
	Сополимеры этилена с ТФЭ и ПФАВЭ	7	Те же, но обладают улучшенной морозостойкостью	Viton ETP
Примечание. ВФ – винилиденфторид; ГФП – гексафторпропилен; ТФЭ – тетрафторэтилен; ТФХЭ – трифторхлорэтилен; ПФАВЭ – перфторалкоксилалкилвиниловые эфиры; ПФМВЭ – перфторметилвиниловый эфир.				

Особенностью карбоцепных фторкаучуков группы 1 является химическая реактивность к действию органических и неорганических оснований и других нуклеофильных реагентов. При действии аммиака, аминов, щелочей, меркаптанов (тиолов), сероводорода резины из них меняют структуру с потерей присущих им положительных качеств, а при длительном воздействии – разрушаются и полностью теряют эластические свойства. Это связано со специфической реакционной способностью карбоцепных фторкаучуков, включающих группы CH_2 в окружении фторсодержащих групп.

Сополимеры винилиденфторида с гексафторпропиленом и трифторхлорэтиленом растворяются в низших кетонах (ацетоне, метилэтилкетоне, метилизобутилкетоне), низших сложных эфирах (этилацетате) и некоторых низших простых эфирах (тетрагидрофуране, диоксане, диглиме, метил-трет-бутиловом эфире).

Следствием меньшего содержания атомов водорода в тройных карбоцепных фторкаучуках (группа 2) в сравнении с двойными сополимерами является пониженная ионная реакционная способность, что снижает эффективность гетеролитической вулканизации. Эта же причина приводит к повышению стойкости резин из них к агрессивным средам. Накопление остаточной деформации резинами из них выше, чем резинами из двойного сополимера.

В промышленности выпускаются фторкаучуки группы 1 с широким диапазоном вязкости по Муни: от 10 до 160 усл. ед. при 100°C . Каучуки с вязкостью 10–30 усл. ед. используют главным образом в качестве добавок для регулирования вязкости резиновых смесей из высокомолекулярных фторкаучуков. Низковязкие каучуки легко формуются, шприцуются, но при смешивании на вальцах могут прилипать к валкам. Высоковязкие фторкаучуки имеют значительно меньшую текучесть при формовании, особенно при шприцевании, но резины из них обладают более высокой прочностью, сопротивлением накоплению остаточной деформации в напряженном состоянии при высоких температурах, выдавливанию [3–5]. Структурные формулы представителей карбоцепных фторкаучуков приведены на рис. 7–10.

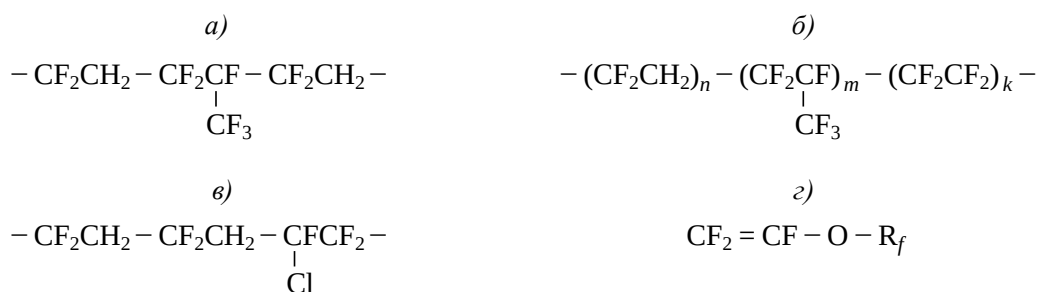


Рис. 7. Сополимеры винилиденфторида с гексафторпропиленом (а), гексафторпропиленом и тетрафторэтиленом (б), трифторхлорэтиленом (в) и перфторалкилвиниловым эфиром (г)

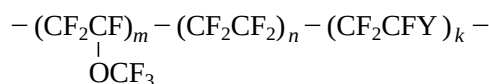


Рис. 8. Сополимеры тетрафторэтилена, перфторметилвинилового эфира и мономера для вулканизации

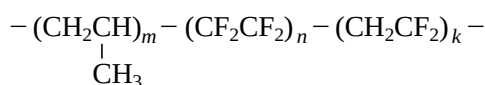


Рис. 9. Сополимеры тетрафторэтилена с пропиленом (или винилиденфторидом в качестве третьего мономера)

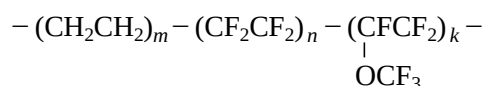


Рис. 10. Сополимеры этилена с тетрафторэтиленом и перфторалкоксиалкилвиниловым эфиром

Для осуществления пероксидной вулканизации сополимеров перфторалкоксиалкилвинилового эфира необходимо присутствие в полимерной молекуле 0,5–1,5 % брома или йода.

Температура стеклования сополимеров винилиденфторида и гексафторпропилена (содержание фтора 65 %) находится на уровне -20°C . С увеличением содержания фтора в каучуке температура стеклования повышается. Температура стеклования тройных сополимеров винилиденфторида, гексафторпропилена и тетрафторэтилена, содержащих 67 % фтора, составляет -17°C . Это обуславливается прежде всего сильным межмолекулярным взаимодействием за счет связей $\text{H}-\text{F}$ (типа водородных), а также высоким энергетическим барьером вращения относительно связи $\text{C}-\text{C}$ (из-за большого размера атомов фтора по сравнению с атомами водорода и водородных связей).

Перфторкаучуки относятся к классу соединений, в которых у атомов углерода в основной цепи в качестве заместителей содержатся только атомы фтора (не считая связей с другими атомами C и O в перфторалкоксигруппах). Перфторкаучуки (рис. 11) представляют собой сополимеры тетрафторэтилена с перфторированными винилалкиловыми эфирами.

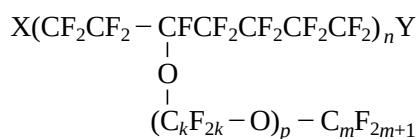


Рис. 11. Перфторкаучуки

Перфторкаучуки обладают уникальной устойчивостью к химическим воздействиям. Они нерастворимы и не набухают практически во всех растворителях (спиртах, простых и сложных эфирах, кетонах, ароматических аминах, фосфорных эфирах и др.). Исключение составляют некоторые фреоны. По этой причине резины на основе перфторкаучуков используются в изделиях, в которых необходима экстремально высокая химическая устойчивость. Отличительной особенностью перфторкаучуков от карбоцепных фторкаучуков других групп является самая высокая теплостойкость. Рабочая температура их вулканизатов составляет от -10 до $+315^\circ\text{C}$. В то же время, несмотря на очевидные преимущества, основным сдерживающим фактором их широкого использования при изготовлении РТИ является их высокая стоимость [26].

Сополимеры тетрафторэтилена с пропиленом имеют температуру стеклования в интервале от -40 до -10°C . Но при этом они теряют эластичность при температурах, близких к 0°C . Увеличение содержания пропилена в составе каучука способствует снижению температуры стеклования, так как нарушается плотная упаковка полимерных цепей и облегчается их подвижность. Высокая температура стеклования перфторкаучуков, не содержащих атомов водорода из-за отсутствия водородных связей, является следствием плотной упаковки групп CF_2 за счет большого размера атомов фтора и высокого энергетического барьера вокруг связи $\text{C}-\text{C}$.

Температура стеклования фторкаучуков, содержащих в полимерной молекуле боковые перфторэфирные группы, может составлять от -60 до -30°C в зависимости от

количества атомов кислорода в таких группах. Увеличение содержания кислорода в составе макромолекулы полимера способствует снижению температуры стеклования.

Для всех видов гетероцепных и карбоцепных фторкаучуков при эксплуатации в условиях повышенных температур можно отметить, что при 150–180 °С никаких изменений не происходит. С повышением температуры от фторкаучуков, содержащих группы $-\text{CFX}-\text{CH}_2-$ (X – F, Cl или CF_3), начинает отщепляться фтороводород. Оксиды металлов, например MgO, эту реакцию катализируют [3–5]. В присутствии оксидов магния, кальция или свинца до температур ~300 °С фтороводород не выделяется в атмосферу, а связывается в прочные фториды металлов. От перфторкаучуков фтороводород не отщепляется, так как они не содержат атомов водорода.

При температурах ~(320–350) °С начинается более глубокое разложение всех фторкаучуков. Каучуки – сополимеры винилиденфторида – при длительном нагревании претерпевают дегидрофторирование и деструкцию с образованием летучих, жидких и твердых нелетучих продуктов, имеющих химическое строение фрагментов молекулы каучука. Соплимеры трифторхлорэтилена разлагаются более интенсивно, сополимеры тетрафторэтилена с пропиленом – менее активно. Перфторкаучуки начинают интенсивно разлагаться при температурах >(350–380) °С. В реакции разложения преобладает деполимеризация с выделением мономеров и олигомеров.

При температурах >450 °С, так же как и при горении на воздухе с внешним источником пламени (сами фторкаучуки горения не поддерживают), происходит разложение вулканизата с образованием набора токсичных продуктов, среди которых обнаружены фторфосген, фтороводород, трифторметан (фтороформ) [14, 15, 27]. Поэтому фторкаучуки следует оберегать от перегрева и попадания в открытое пламя.

Среди российских производителей фторкаучуков можно выделить такие компании, как АО «ГалоПолимер» (ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», АО «ГалоПолимер Пермь») и ФГУП «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева» (ФГУП «НИИСК»).

В настоящее время АО «ГалоПолимер» является одним из основных центров не только производства, но и разработок современных российских фторполимеров и фторированных сополимеров. Фторкаучуки, разработанные АО «ГалоПолимер», представлены в табл. 3. Переработка изделий из таких резин осуществляется методом прессования, экструзией и литьем под давлением.

Таблица 3

Фторкаучуки производства АО «ГалоПолимер» [28–39]

Каучук	Композиция	Содержание фтора, % (по массе)	Описание
СКФ-26	Сополимер ВФ и ГФП	66–67	Фторкаучук, применяемый в термо-, масло-, бензо-, озono-, кислородо-, атмосферно-, кислото-, износо- и химически стойких, высокопрочных, негорючих резинах, антикоррозионных, электроизоляционных изделиях, работающих в температурном диапазоне от –20 до +250 °С. Вулканизуется бисфенолами и аминами
СКФ-32	Сополимер ВФ и ТФХЭ	54–55	Фторкаучук, применяемый в термо-, масло-, бензо-, озono-, кислородо-, атмосферно-, кислото-, износо- и химически стойких, высокопрочных, негорючих резинах, антикоррозионных, электроизоляционных изделиях, работающих в температурном диапазоне от –20 до +200 °С. Вулканизуется аминами и пероксидами

Каучук	Композиция	Содержание фтора, % (по массе)	Описание
Элафтор 2000, Элафтор 2001HV	Сополимер ВФ и ГФП	66–67	Фторкаучук, применяемый для изготовления РТИ, работающих в широком диапазоне температур (от –15 до +250 °С) в агрессивных средах, кроме полярных растворителей (кетонов, сложных эфиров и др.). Вулканизуется бисфенолами
Элафтор 3032, Элафтор 3061	Триполимер ВФ, ТФЭ и ГФП	68–69	Фторкаучук, обладающий улучшенной химической стойкостью. Используется для изготовления РТИ, работающих в широком диапазоне температур (от –15 до +250 °С) в агрессивных средах, кроме полярных растворителей (кетонов, сложных эфиров и др.). Вулканизуется бисфенолами и аминами
Элафтор 7005	Триполимер ВФ, ТФЭ и ГФП с функциональной группой (CSM)	70–71	Обладает самой высокой химической стойкостью среди фторкаучуков и отличными уплотнительными свойствами. Используется для изготовления РТИ, работающих в широком диапазоне температур (от –15 до +230 °С) в любых агрессивных средах, кроме полярных растворителей (кетонов, сложных эфиров и др.). Вулканизуется пероксидами
Элафтор 8000	Триполимер ВФ, ПФМВЭ и ТФЭ с функциональной группой (CSM)	64	Фторкаучук с интервалом рабочих температур от –30 до +200 °С. Применяется для изготовления РТИ и других изделий, работающих в контакте с неорганическими кислотами, разбавленными щелочами и другими агрессивными веществами, а также в среде воздуха, пара, масел, бензина, органических растворителей, за исключением полярных (кетонов, сложных эфиров и др.). Вулканизуется пероксидами
Элафтор 1000Р	Сополимер ТФЭ и ПФМВЭ с функциональной группой (CSM)	72	Полностью фторированный каучук, обладающий уникальной химической стойкостью. Применяется для изготовления РТИ, работающих в широком диапазоне температур (от –15 до +230 °С) в агрессивных средах, включая полярные растворители, пар, горячую воду и амины. Вулканизуется пероксидами
Элафтор 1000	Сополимер ТФЭ и ПФМВЭ с функциональной группой (CSM)	72	Полностью фторированный каучук, применяемый для изготовления РТИ, работающих при экстремально высоких (до 315 °С) температурах в агрессивных средах, включая полярные растворители, пар, горячую воду и амины. Вулканизуется триазинами
Примечание. ВФ – винилиденфторид; ГФП – гексафторпропилен; ТФЭ – тетрафторэтилен; ТФХЭ – трифторхлорэтилен; ПФМВЭ – перфторметилвиниловый эфир; CSM (Cure Site Monomer) – мономер-модификатор; РТИ – резинотехнические изделия.			

Другим крупнейшим научным и опытно-производственным центром, в котором сосредоточены фундаментальные и прикладные исследования, проводимые в России в области каучуков и материалов на их основе, является ФГУП «НИИСК», продукция которого представлена в табл. 4.

В настоящее время имеется тенденция к более активному использованию способов переработки фторкаучуков с увеличенной производительностью, таких как трансферное литье, экструзия и др. Фторкаучуки с повышенным содержанием фтора наиболее применимы в ряде изделий благодаря улучшенной топливной стойкости, стойкости в современных маслах и пониженному коэффициенту трения [43, 44].

Таблица 4

Фторкаучуки производства ФГУП «НИИСК» [40–42]

Каучук	Содержание фтора, % (по массе)	Применение
Криофтон-1 (СКФ-260В)	64	Термо-, агрессивостойкий фторводородсодержащий каучук, работоспособный в интервале температур от –35 до +250 °С. Переработка изделий осуществляется методами прессования, шприцевания, каландрования и литья под давлением. Вулканизуется пероксидами
Неофтон	70–73	Перфторированный каучук, обладающий высокой термо- и агрессивостойкостью. Применяется для изготовления резинотехнических изделий, работающих в широком диапазоне температур – от –18 до +300 °С. Переработка изделий осуществляется методами шприцевания, каландрования и прессования. Вулканизуется пероксидами или аминофенольными вулканизирующими агентами

Заключения

В результате анализа научно-технической литературы определено, что по строению основной цепи фторкаучуки можно разделить на гетероцепные и карбоцепные.

Среди гетероцепных фторкаучуков наиболее термостойкими являются фтортриазиновые каучуки, верхний температурный предел эксплуатации которых может превышать 350 °С. Однако низкая стойкость к полярным растворителям (разрушаются под действием воды и оснований, включая аммиак) и сложный многостадийный синтез делают их практическое применение в ближайшем будущем маловероятным.

Среди карбоцепных фторкаучуков наиболее термостойкими являются перфторкаучуки, представляющие собой сополимеры тетрафторэтилена с перфторированными винилалкиловыми эфирами, температура эксплуатации которых может достигать 315 °С. Они нерастворимы и не набухают практически во всех растворителях (спиртах, простых и сложных эфирах, кетонах, ароматических аминах, фосфорных эфирах и др.), за исключением некоторых видов фреонов. По этой причине этот тип каучуков наиболее перспективен для изготовления резиновых смесей, которые используются в топливных системах авиационной техники, эксплуатируемых при повышенных температурах в контакте с топливами и маслами.

Среди российских производителей фторкаучуков можно выделить такие компании, как АО «ГалоПолимер» и ФГУП «НИИСК», выпускающие прежде всего карбоцепные фторкаучуки.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Нудельман З.Н. Фторкаучуки: основы, переработка, применение. М.: ПИФ РИАС, 2007. 383 с.
4. Améduri B. The Promising Future of Fluoropolymers // Macromolecular Chemistry and Physics. 2020. Vol. 221. P. 1900573. DOI: 10.1002/macp.201900573.
5. Chen Y., Wu Y., Li J. et al. Fluororubber composites: Preparation methods, vulcanization mechanisms, and the associated properties // Composites Part C: Open Access. 2024. Vol. 14. Art. 100461.
6. Потапова А.И., Боброва И.И., Евдокимов А.А., Венедиктова М.А. Рецептурные приемы создания эластомерных композиций с пониженной горючестью // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). С. 60–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.

7. Герасимов Д.М., Евдокимов А.А., Вахрушева Я.А., Венедиктова М.А., Коваленко А.В. Исследование влияния вулканизирующих агентов на работоспособность герметизирующего жгутового материала для автоклавного формования ПКМ при повышенных температурах // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 74–82. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-74-82.
8. Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451.
9. Беспалов А.С., Салимов И.Э., Юдин А.В. Придание высоких гидрофобных свойств высокопористому керамическому материалу низкоконтрированными растворами фторпарафина в среде сверхкритического диоксида углерода // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). С. 39–48. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
10. Бузник В.М. Сверхгидрофобные материалы на основе фторполимеров // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 1. С. 29–34.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
12. Нудельман З.Н. К вопросу о морозостойких фторэластомерах // *Каучук и резина*. 2005. № 1. С. 8–10.
13. Шадринов Н.В. Композиционные материалы на основе бутадиен-нитрильного каучука и сверхвысокомолекулярного полиэтилена для применения в климатических условиях севера: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2025. 300 с.
14. Голубев А.И., Кондаков Л.А., Овандер В.Б., Гордеев В.В. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.
15. Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М. и др. Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата // *Перспективные материалы*. 2015. № 11. С. 5–18.
16. Zhao R.P., Yin Zh.G., Zou W. et al. Preparation of High-Strength and Excellent Compatibility Fluorine/Silicone Rubber Composites under the Synergistic Effect of Fillers // *ACS Omega*. 2023. Vol. 8. No. 4. P. 3905–3916.
17. Технология резины: рецептуростроение и испытания / под ред. Дж.С. Дика; пер. с англ. под ред. В.А. Шершнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
18. Каблов В.Ф., Новопольцева О.М., Спиридонова М.П., Крюкова Д.А. Резины со специальными свойствами: учеб. пособие. Волгоград: ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2020. 128 с.
19. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. Т. 10: Клеи, герметики, резины, гидрожидкости. Ч. 2: Герметики, резины, гидрожидкости. 276 с.
20. Большой справочник резинщика: в 2 т. М.: Техинформ, 2012. Т. 1: Каучуки и ингредиенты / С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозов. 744 с.
21. Фторкаучуки: свойства и применение // Справочник химика 21. URL: <https://chem21.info/info/956999> (дата обращения: 16.07.2026).
22. Новицкая С.П., Нудельман З.Н., Донцов А.А. Фторэластомеры / под ред. А.А. Донцова. М.: Химия, 1988. 240 с.
23. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Наумов И.С., Елисеев О.А. Эластомерные материалы повышенной теплостойкости (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 2 (50). С. 41–47. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-6-6.
24. Антоновский В.Л., Хурсан С.Л. Физическая химия органических пероксидов. М.: Академкнига, 2003. 391 с.
25. Осовская И.И., Савина Е.В., Левич В.Е. Эластомеры: учеб. пособие. СПб., 2016. С. 48–50.
26. Blair J.A. Fluorocarbon polymers // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1971. No. 13. P. 73–93.
27. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине. М.: Химия, 1989. 400 с.
28. Фторкаучуки и латексы // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/> (дата обращения: 16.07.2026).

29. Каучук СКФ-26. СКФ (FKM) // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/skf-fkm/skf-26/> (дата обращения: 16.07.2026).
30. Каучук СКФ-32 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/skf-fkm/skf-32/> (дата обращения: 16.07.2026).
31. Баскин З.Л., Шабалин Д.А., Выражейкин Е.С., Дедов С.А. Ассортимент, свойства и применение фторполимеров Кирово-Чепецкого химического комбината // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 3. С. 13–23.
32. Элафтор 2000 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/d38/d38d1f8d5ec374c59a05b31ffa061461.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
33. Элафтор 2001HV // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/4e1/4e1b6197646791f8a1aade809d8437a7.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
34. Элафтор 3032 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/048/0484c881b321ef12bd9376bffe0ad5.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
35. Элафтор 3061 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/b48/b4876ae348fc8db6d5aa55cd694a5ff3.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
36. Элафтор 7005 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/b0b/b0b5c1c8e3f1a6084b29dc65dcc0a9e0.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
37. Элафтор 8000 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/6a2/6a2722f0d93ed3b53599eb4dc0d7ac07.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
38. Элафтор 1000P // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/31c/31ceb8f3c6c4991c462a858097cbee97.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
39. Элафтор 1000 // АО «ГалоПолимер»: офиц. сайт. URL: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/f56/f5669647a527f8c453f23205a6446327.pdf> (дата обращения: 16.07.2026).
40. Кριοфтон-1 (СКФ-260 В) // Научно-исследовательский институт синтетического каучука: офиц. сайт. URL: [https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/kriofton-1-\(skf-260-v\).html](https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/kriofton-1-(skf-260-v).html) (дата обращения: 16.07.2026).
41. Неофтон // Научно-исследовательский институт синтетического каучука: офиц. сайт. URL: <https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/neofton.html> (дата обращения: 16.07.2026).
42. Лебедев Н.В., Журавлев М.В., Зозуля Е.А. и др. НЕОФТОН. Новое поколение FFKM материалов // Каучук и резина, 2025: традиции и новации: материалы XIII Всерос. конф. М., 2025. С. 37.
43. Логинов Б.А., Виллемсон А.Л., Бузник В.М. Российские фторполимеры: история, технологии, перспективы. М., 2013. 318 с.
44. Осовская И.И., Новикова А.А. Получение и переработка эластомерных материалов. СПб.: Ризограф ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 126 с.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of Next-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Kablov E.N. Next-Generation Materials and Digital Technologies for Their Processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Nudelman Z.N. *Fluororubber: bases, processing, application*. Moscow: PIF RIAS, 2007, 383 p.
4. Améduri B. The Promising Future of Fluoropolymers. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, vol. 221, p. 1900573. DOI: 10.1002/macp.201900573.
5. Chen Y., Wu Y., Li J. et al. Fluororubber composites: Preparation methods, vulcanization mechanisms, and the associated properties. *Composites Part C: Open Access*, 2024, vol. 14, art. 100461.
6. Potapova A.I., Bobrova I.I., Evdokimov A.A., Venediktova M.A. Prescription techniques for creating elastomeric compositions with reduced flammability. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), pp. 60–77. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-60-77.

7. Gerasimov D.M., Evdokimov A.A., Vakhrusheva Ya.A., Venediktova M.A., Kovalenko A.V. Investigation of the effect of vulcanizing agents on the performance of sealing harness material for autoclave molding of PCM at elevated temperatures. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 74–82. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-74-82.
8. Eliseev O.A., Naumov I.S., Smirnov D.N., Bryk Ya.A. Rubbers, sealants, fireproof and heat-shielding materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451.
9. Bespalov A.S., Salimov I.E., Yudin A.V. Imparting highly hydrophobic properties to a high-porous ceramic material with low-concentration solutions of fluoroparaffin in a supercritical carbon dioxide environment. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 39–48. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
10. Buznik V.M. Superwaterproof materials on the basis of fluoropolymers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 1, pp. 29–34.
11. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
12. Nudelman Z.N. On the issue of frost-resistant fluoroelastomers. *Kauchuk i rezina*, 2005, no. 1, pp. 8–10.
13. Shadrinov N.V. *Composite materials based on butadiene-nitrile rubber and ultra-high-molecular-weight polyethylene for use in northern climatic conditions*: thesis, Dr. Sc. (Eng.). Tomsk, 2025, 300 p.
14. Golubev A.I., Kondakov L.A., Ovander V.B., Gordeev V.V. *Seals and Sealing Technology: A Handbook*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 464 p.
15. Eliseev O.A., Chaikun A.M., Buznik V.M. et al. Basic principles of formulating frost-resistant rubbers for products operating in Arctic climate conditions. *Perspektivnye materialy*, 2015, no. 11, pp. 5–18.
16. Zhao R.P., Yin Zh.G., Zou W. et al. Preparation of High-Strength and Excellent Compatibility Fluorine/Silicone Rubber Composites under the Synergistic Effect of Fillers. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, no. 4, pp. 3905–3916.
17. *Rubber Technology: Compounding and Testing*. Ed. J.S. Dik; trans. from Eng. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010, 620 p.
18. Kablov V.F., Novopoltseva O.M., Spiridonova M.P., Kryukova D.A. *Rubbers with Special Properties*: Textbook. Volgograd: VPI (Branch) of VolgGTU, 2020, 128 p.
19. *Aviation Materials: Handbook in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, vol. 10: Adhesives, Sealants, Rubbers, Hydraulic Fluids. Part 2: Sealants, Rubbers, Hydraulic Fluids, 276 p.
20. *Comprehensive Rubber Handbook*: in 2 vols. Moscow: Tekhninform, 2012, vol. 1: Rubbers and Ingredients, 744 p.
21. Fluororubbers: Properties and Applications. *Chemist's Handbook* 21. Available at: <https://chem21.info/info/956999> (accessed: July 16, 2026).
22. Novitskaya S.P., Nudelman Z.N., Dontsov A.A. *Fluoroelastomers*. Ed. by A.A. Dontsov. Moscow: Khimiya, 1988, 240 p.
23. Alifanov E.V., Chaikun A.M., Naumov I.S., Eliseev O.A. Elastomeric materials with high heat resistance (review). *Trudy VIAM*, 2017, no. 2 (50), pp. 41–47. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 16, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-6-6.
24. Antonovsky V.L., Khursan S.L. *Physical Chemistry of Organic Peroxides*. Moscow: Akademkniga, 2003, 391 p.
25. Osovskaya I.I., Savina E.V., Levich V.E. *Elastomers*: Textbook. St. Petersburg, 2016, pp. 48–50.
26. Blair J.A. Fluorocarbon polymers. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1971, no. 13, pp. 73–93.
27. Makhlis F.A., Fedyukin D.L. *Terminological Handbook on Rubber*. Moscow: Khimiya, 1989, 400 p.
28. *Fluororubbers and latices*. Available at: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/> (accessed: July 16, 2026).

29. SKF-26 rubber. SKF (FKM). Available at: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/skf-fkm/skf-26/> (accessed: July 16, 2026).
30. SKF-32 rubber. Available at: <https://halopolymer.ru/product/ftorkauchuki-i-lateksy/skf-fkm/skf-32/> (accessed: July 16, 2026).
31. Baskin Z.L., Shabalin D.A., Vyrasheikin E.S., Dedov S.A. Product range, properties, and applications of fluoropolymers from the Kirovo-Chepetsk Chemical Combine. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 13–23.
32. Elaftor 2000. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/d38/d38d1f8d5ec374c59a05b31ffa061461.pdf> (accessed: July 16, 2026).
33. Elaftor 2001HV. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/4e1/4e1b6197646791f8a1aade809d8437a7.pdf> (accessed: July 16, 2026).
34. Elaftor 3032. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/048/0484c881b321ef12bd9376bffe0ad5.pdf> (accessed: July 16, 2026).
35. Elaftor 3061. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/b48/b4876ae348fc8db6d5aa55cd694a5ff3.pdf> (accessed: July 16, 2026).
36. Elaftor 7005. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/b0b/b0b5c1c8e3f1a6084b29dc65dcc0a9e0.pdf> (accessed: July 16, 2026).
37. Elaftor 8000. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/6a2/6a2722f0d93ed3b53599eb4dc0d7ac07.pdf> (accessed: July 16, 2026).
38. Elaftor 1000P. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/31c/31ceb8f3c6c4991c462a858097cbee97.pdf> (accessed: July 16, 2026).
39. Elaftor 1000. Available at: <https://halopolymer.ru/upload/iblock/f56/f5669647a527f8c453f23205a6446327.pdf> (accessed: July 16, 2026).
40. Cryophton-1 (SKF-260 V). Available at: [https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/kriohton-1-\(skf-260-v\).html](https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/kriohton-1-(skf-260-v).html) (accessed: July 16, 2026).
41. Neophton. Available at: <https://fgupniisk.ru/katalog/ftorkauchuki/neofhton.html> (accessed: July 16, 2026).
42. Lebedev N.V., Zhuravlev M.V., Zozulya E.A. et al. NEOPHTHON. New generation of FFKM materials. *Rubber and rubber, 2025: traditions and innovations: materials of the XIII All-Rus. conf. Moscow, 2025*, p. 37.
43. Loginov B.A., Willemson A.L., Buznik V.M. *Russian fluoropolymers: history, technologies, prospects*. Moscow, 2013, 318 p.
44. Osovskaya I.I., Novikova A.A. *Production and processing of elastomeric materials*. St. Petersburg: Risograph VShTE SPbGUPTD, 2017, 126 p.

Информация об авторах

Аляутдинова Гульнара Ринатовна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Евдокимов Антон Андреевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ворончихин Василий Дмитриевич, ведущий инженер, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Венедиктова Мария Анатольевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сергеев Александр Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Gulnara R. Alyautdinova, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton A. Evdokimov, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasily D. Voronchikhin, Leading Engineer, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria A. Venediktova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr V. Sergeev, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.09.2026.

The article was submitted 15.09.2026; approved and accepted for publication after reviewing 21.09.2026.