

УДК 621.315.616.7

А.М. Чайкун¹, И.С. Наумов¹, М.А. Венедиктова¹, Е.В. Алифанов¹**НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ РЕЗИН СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ФТОРСИЛОКСАНОВЫХ КАУЧУКОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-60-65

Описаны современные тенденции развития фторсилоксановых каучуков и резин на их основе. Заявленная проблема представляется крайне актуальной, так как значительное увеличение интенсивности эксплуатации авиационной техники диктует новые требования к резинам, применяемым для изготовления соответствующих деталей. Это, прежде всего, увеличение температурного режима эксплуатации и повышение работоспособности. Поэтому представляет особый интерес совершенствование рецептур резин на основе фторсилоксановых каучуков, так как они обеспечивают широкий температурный режим эксплуатации изделий из них и обладают уникальным комплексом свойств. Высокомолекулярные фторсилоксановые каучуки и резины на их основе имеют сбалансированное сочетание стойкости к агрессивным средам с работоспособностью в продолжительном температурном интервале. Представлено описание последней разработки ВИАМ в указанной области.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.2. «Эластомерные и уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: резины, каучуки, фторсилоксановые каучуки.

The article shows modern tendencies in synthesis of fluorosilicone raw rubbers and vulcanizate stock based thereon. The subscribed problem is very actual since remarkable increase of aircraft operation intensity dictates new requirements to used rubbers. First of all they are the increase in temperature range of operation and improvement of performance parameters.

That is why the improvement of rubber compounds based on fluorosilicone raw rubbers is of particular interest since they provide wide temperature range of operation and have high performance characteristics. Rubbers based on silicone raw rubbers can work in air at wide temperature range. However they have low fuel- and oil resistance. High-molecular fluorosilicone raw and vulcanizate rubbers have balanced combination of resistance to aggressive environment and good working ability in wide temperature range.

Improving rubber compositions based on above-mentioned raw rubbers allows improving their performance parameters and thus increase the life time of aircraft. The patterns revealed in this work allow to research and compose new.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 15.2. «Elastomeric and sealing materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: rubber, rubber compounds, fluorosilicone rubbers.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Сочетание воздействия природных факторов, таких как перепады температур, воздействие озона и кислорода воздуха, а также эксплуатационных, таких как, например, влияние высоких температур и работа в условиях агрессивных сред является неотъемлемой частью эксплуатации резинотехнических изделий в авиационной промышленности [2–5]. Создание материалов, стойких к указанным воздействиям, а также увеличение долговечности конструкций и изделий специального назначения является одним из стратегических направлений ФГУП «ВИАМ» в области развития материалов и техноло-

гий их переработки [1, 6–8]. В ряде случаев резины наряду со стандартными техническими характеристиками (эластичность, износостойкость, атмосферостойкость и озоностойкость) должны обеспечивать сочетание стойкости к агрессивным средам, таким как топлива и масла, с работоспособностью в широком диапазоне положительных (250°C) и отрицательных (-60°C) температур. Известно, что резины на основе фторкаучуков, обладая высокой топливостойкостью и атмосферостойкостью, недостаточно морозостойки. Резины на основе силоксановых каучуков работоспособны на воздухе в широком температурном диапазоне, однако имеют низкую топливо- и мас-

лостойкость. Указанная проблема во многом была решена в процессе разработки высокомолекулярных фторсилоксановых каучуков, которые имеют сбалансированное сочетание стойкости к агрессивным средам с работоспособностью в широком температурном диапазоне эксплуатации [9–15].

В ВИАМ на протяжении многих лет активно занимались материалами на основе фторсилоксанов. Эти работы были начаты под научным руководством выдающегося ученого Н.Б. Барановской, столетний юбилей которой отмечался в 2015 г.

Фторсилоксановые каучуки можно рассматривать как силоксановые, у которых заместитель в боковой цепи у атома кремния заменен на трифторпропильную группу. Гибкость основной силоксановой цепи обуславливает их высокую морозостойкость, большое значение энергии полярной связи $-Si-O-$ в основной цепи (~ 450 кДж/моль) придает им высокую термическую стойкость, а наличие фтора обеспечивает топливостойкость. Организация промышленного производства эластомеров с трифторпропильными группами осуществлена в различных странах, но наиболее успешные результаты в этой области и широкое распространение были достигнуты в США и СССР для авиационной и космической промышленности. Основными марками фторсилоксановых каучуков являются: LS-63U фирмы Toqay Silicone, Silastic LS-420 компании Dow Corning Co., а также отечественные – СКТФТ-50 и СКТФТ-100. В нашей стране технология синтеза высокомолекулярных фторсилоксановых каучуков была разработана и усовершенствована во ВНИИСК им. С.В. Лебедева.

Самыми распространенными представителями фторсилоксановых каучуков являются линейный полимер полиметил(3,3,3-трифторпропилсилоксан) и его сополимер с диметилсилоксановыми звеньями. Они обладают термостойкостью, близкой к термостойкости силоксановых каучуков, и маслостойкостью на уровне каучука СКН-40. Поэтому, несмотря на высокую стоимость, они используются

при необходимости обеспечения сочетания маслостойкости с очень высокой морозостойкостью (в основном при изготовлении уникальных изделий).

Особый интерес с точки зрения морозостойкости представляют резины на основе сополимера СКТФТ-50 (содержание 50% (мольн.) 3,3,3-трифторпропилметилсилоксановых и 50% (мольн.) диметилсилоксановых звеньев). Они не кристаллизуются до температур $-90^{\circ}C$ и не требуют дополнительного введения пластификаторов, улучшающих морозостойкость, т. е. не теряют морозостойкость при длительной эксплуатации. Менее морозостойки резины на основе каучука СКТФТ-100. Их рекомендуется эксплуатировать при температурах до $-50^{\circ}C$, так как при более низких температурах активно развиваются процессы микрокристаллизации. Морозостойкость изменяется при изменении содержания трифторпропильных звеньев. Так, значения коэффициента морозостойкости по эластическому восстановлению (K_B) при температуре $-55^{\circ}C$ резин из каучуков, содержащих 0, 25, 50, 75 и 100% (мольн.) трифторпропильных звеньев, составляют 0,85; 0,55; 0,50; 0,46 и 0,2 соответственно, а значения K_B резин из каучуков СКТФТ-50 и СКТФТ-100 составляют 0,6 и 0,2 [9, С. 96]. Несмотря на это резины на основе высокомолекулярных фторсилоксановых каучуков являются наиболее морозостойкими материалами для эксплуатации в топливах и других углеводородных средах. Свойства отечественных фторсилоксановых каучуков и резин на их основе приведены в табл. 1.

Свойства резин на основе высокомолекулярных фторсилоксановых каучуков находятся в прямой зависимости от содержания в них трифторпропильных звеньев, связанных с атомом кремния в основной цепи. При повышении содержания трифторпропильных звеньев повышается температура стеклования (снижается морозостойкость), возрастает стойкость к жидким углеводородным средам и гидролитическая стабильность, снижаются диэлектрические характеристики и термостойкость.

На основе фторсилоксановых каучуков произво-

Таблица 1

Свойства отечественных фторсилоксановых каучуков и резин на их основе

| Показатель | Значения показателей каучука марки | | | |
|---|------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | СКТФ-25 | СКТФТ-50 | СКТФТ-100 | СКТФТ-100П |
| Характеристическая вязкость | – | 0,75–1,15 | – | – |
| Молекулярная масса, ед. | $(5-7) \cdot 10^5$ | $(5-7) \cdot 10^5$ | $(5-9) \cdot 10^5$ | $(7-20) \cdot 10^5$ |
| Термостабильность – потеря массы, г, за 3 ч при $150^{\circ}C$ | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Условная прочность при растяжении, МПа (не менее) | 6–7,6 | 4–5,9 | 8,8–10,1 | 8,7–10 |
| Относительное удлинение при разрыве, % (не менее) | 300–400 | 175–200 | 260–300 | 250–310 |
| Относительная остаточная деформация после разрыва, % (не более) | 10 | 10 | 10 | 5–10 |

дятся серийные резины марок 51-1434 (температура эксплуатации -60°C), 51-1570 и 51-1479 (температура эксплуатации -70°C). Выпускаются также резины марок ФС 55-1 и ФС 55-2 – для изделий, предназначенных для работы при температуре -60°C , ФС 55 и ФС-55-3 – для изделий, предназначенных для работы при температуре -55°C . Как и для ряда высокомолекулярных силоксановых каучуков, при необходимости продолжительной эксплуатации изделий из резин на основе каучука СКТФТ-100 следует проверять их длительную морозостойкость.

Основные свойства серийных отечественных резин из фторсилоксановых каучуков: условная прочность при растяжении 6–8 МПа; относительное удлинение при разрыве порядка 150–250%; коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению при температуре -60°C : 0,25–0,4; относительная остаточная деформация после сжатия (в воздушной среде при 200°C в течение 24 ч): 20–45%; изменение массы образца в топливе ТС-1 (выдержка при 150°C в течение 24 ч): 10–15%.

Наибольшее количество научных и патентных исследований в области фторсилоксановых каучуков и резин на их основе проведено в Японии. При этом улучшение свойств достигается путем модификации фторсилоксановых каучуков. Наблюдаются тенденции применения новых химических веществ в качестве ингредиентов и направленная модификация традиционных компонентов фторсилоксановых резин. Так, в патенте JP 3386831 (Toshiba Silicone Co. Ltd., Япония) улучшенная топливостойкость фторсилоксановой композиции достигается путем использования поверхностно модифицированного наполнителя – дивинилтетраметилдисилазана. В патенте JP 5240150 предложена композиция на основе фторсилоксанового каучука, термостойкость которой увеличена благодаря введению в резиновую смесь неорганического наполнителя – гидрокальцита, что привело к минимальному ухудшению свойств даже после воздействия температур 200°C и выше. Обнаружена также интересная научная публикация японских авторов [16]. В статье описана новая технология на основе нагревания и поверхностного окисления углеродных нанотрубок для решения проблемы адгезии между каучуком и углеродными нанотрубками. При оптимизации процесса окисления углеродных нанотрубок достигается стабильная связь между наполнителем и каучуком при высокотемпературном воздействии. Впервые получены высокоэффективные уплотнения на основе смеси «каучук/углеродные нанотрубки» для последующей эксплуатации в среде масел. Распространенным направлением является улучшение свойств путем совмещения каучуков, а также введение в состав композиции олигомеров с функциональными группами.

Анализ исследований, проведенных в США, показал, что большое распространение получили тенденции применения во фторсилоксанах новых веществ и усовершенствование технологий. В

патенте US 5610213 предлагается низкотемпературное смешение высоковязких каучуков в качестве нового технологического приема. Описана термостабильная фторсилоксановая композиция, в которой повышение термостойкости достигается за счет введения в рецептуру тонкодисперсного наполнителя – гидроксида церия (патент US 5340866).

Одна из ведущих полимерных компаний Америки – Dow Corning Corporation – также развивает направление повышения прочности фторсилоксановых эластомеров и композиций на их основе за счет модификации каучуков в процессе синтеза.

Анализ работ, проведенных в Китае, показал, что упор в исследованиях сделан на сложные рецептуры, содержащие большое количество различных ингредиентов, а также смеси каучуков, что позволяет добиться повышения комплекса свойств фторэластомерных композиций.

В России ведутся исследования различных путей совершенствования фторсилоксановых каучуков, на основе которых разрабатываются резиновые смеси. Патентов, касающихся собственно рецептуры резиновых смесей, обнаружено не было, за исключением патента RU 2271375, в котором рассмотрена композиция с повышенной маслостойкостью, что позволяет значительно увеличить ресурс резинотехнических деталей для неподвижных и ограниченно подвижных соединений при эксплуатации в среде воздуха, топлив и масел. Проблема разработки новых эластомеров отражена в патенте RU 2078097 (ФГУП «НИИСК»), в котором предлагается мономер полиметилсилоксан для выпуска термомаслостойких материалов.

В патенте RU 2101286 (ФГУП «НИИСК») предлагается создание новых доступных диорганодихлорсиланов путем введения в боковую цепь органосилоксанов различных элементарных звеньев.

В патенте RU 2455319 (ООО «Пента-91») приведен способ получения фторорганосилоксановых сополимеров путем сополимеризации α,ω -дигидроксиолигодиметилсилоксана среднего состава с 1,3,5-триметил-1,3,5-трис(3,3,3-трифторпропил)циклотрисилоксаном и триорганосиланом при нагревании до $70\text{--}110^{\circ}\text{C}$ в присутствии щелочного катализатора в количестве 0,001–0,5% (по массе) от смеси реагентов.

Таким образом, при анализе современных тенденций в области фторсилоксанов выявлены следующие направления разработок:

– в России – повышение механических характеристик, масло- и бензостойкости, увеличение срока эксплуатации достигается за счет использования новых каучуков;

– за рубежом – используется более широкий спектр исследований, таких как модификация каучука, совершенствование рецептуры путем введения новых модификаторов или наполнителей, совмещение различных каучуков и введение олигомеров, создание многослойных изделий.

Таблица 2

Физико-механические свойства резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», в исходном состоянии

| Условная прочность при растяжении, МПа | Относительное удлинение при разрыве, % | Сопротивление раздиру, кН/м | Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению, усл. ед., при температуре -50°C |
|--|--|-----------------------------|--|
| средние значения | | | |
| 8,3 | 250 | 17,5 | 0,34 |

Таблица 3

Уруго-прочностные свойства резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», после ускоренного теплового старения в среде воздуха и изменение массы после экспозиции в среде топлива ТС-1

| Уруго-прочностные свойства* образцов резин после старения при температуре, °C | | | | | | | | Изменение массы, %, после выдержки в топливе ТС-1 при 125°C в течение 24 ч (среднее значение) |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 200 | | | | 220 | | | | |
| в течение, ч | | | | | | | | |
| 24 | | 72 | | 24 | | 72 | | |
| σ | δ | σ | δ | σ | δ | σ | δ | 7,8 |
| 7,5 | 230 | 6,5 | 200 | 6,3 | 200 | 5,7 | 190 | |

* σ – условная прочность при растяжении, МПа; δ – относительное удлинение, %.

Таблица 4

Физико-механические свойства (средние значения) образцов опытных партий резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», в исходном состоянии и изменение массы после воздействия топлива

| Относительное остаточное удлинение после разрыва, % | Твердость по Шору А, ед. | Сопротивление раздиру, кН/м | Изменение массы, %, после выдержки в топливе ТС-1 при 125°C в течение 24 ч |
|---|--------------------------|-----------------------------|--|
| 5 | 59 | 17,4 | 7,9 |

Таблица 5

Морозостойкость образцов резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», в исходном состоянии

| Температурный предел хрупкости ($T_{п.хр}$), °C | Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению, усл. ед., при температуре, °C | |
|---|--|------|
| | -50 | -60 |
| -58 | 0,34 | 0,16 |

Таблица 6

Уруго-прочностные свойства образцов резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», после ускоренного теплового старения в среде воздуха

| Свойства (нормативная документация) | Значения свойств* после выдержки в воздушной среде при температуре, °C | | | | | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 200 | | | | 220 | | |
| | в течение, ч | | | | | | |
| | 72 | 168 | 336 | 480 | 24 | 72 | 336 |
| Условная прочность при растяжении, МПа (ГОСТ 270–75) | $\frac{6,5-7,0}{6,7}$ | $\frac{6,2-6,4}{6,3}$ | $\frac{5,6-5,8}{5,7}$ | $\frac{5,3-5,5}{5,4}$ | $\frac{6,3-6,5}{6,4}$ | $\frac{5,7-6,0}{5,8}$ | $\frac{4,9-5,0}{4,9}$ |
| Относительное удлинение при разрыве, % (ГОСТ 270–75) | $\frac{200-220}{210}$ | $\frac{180-200}{190}$ | $\frac{150-160}{160}$ | $\frac{130-150}{140}$ | $\frac{200-220}{210}$ | $\frac{180-190}{190}$ | $\frac{110-130}{120}$ |

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Таблица 7

Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению образцов резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», после ускоренного теплового старения

| Свойства (нормативная документация) | Значения свойств* | | | | |
|--|----------------------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | в исходном состоянии | после выдержки в воздушной среде при 200°C в течение, ч | | | |
| | | 24 | 72 | 120 | |
| Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия при степени сжатия 20% (ГОСТ 13808–79) при температуре, °C: | -50 | <u>0,33–0,34</u> 0,34 | <u>0,32–0,33</u> 0,32 | <u>0,29–0,30</u> 0,29 | <u>0,26–0,27</u> 0,27 |
| | -60 | <u>0,16–0,17</u> 0,16 | <u>0,13–0,14</u> 0,14 | – | – |

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Таблица 8

Сравнение резины, разработанной во ФГУП «ВИАМ», с фторсилоксановыми резинами других марок

| Свойства (нормативная документация) | Требования по ТУ | Значения свойств резины | | | | Улучшение свойств, %, по сравнению с резиной | | |
|--|------------------|-------------------------------|---|-------------------------|---------------|---|------------------------|--------------|
| | | новой, разработки ФГУП «ВИАМ» | аналогичной, ранее разработанной во ФГУП «ВИАМ» | серийной, марки 51-1434 | марки LS-53U* | аналогичной, ранее разработанной во ФГУП «ВИАМ» | серийной марки 51-1434 | марки LS-53U |
| Условная прочность при растяжении, МПа (ГОСТ 270–75) | Не менее 8,0 | 8,3 | 8,0 | 6,4 | 8,0 | 4 | 30 | 4 |
| Сопротивление раздиру, кН/м (ГОСТ 262–93) | Не менее 14,0 | 17,4 | 15,0 | 10,0 | 16,0 | 16 | 74 | 9 |
| Относительное удлинение при разрыве, % (ГОСТ 270–75) | Не менее 200 | 250 | 200 | 200 | 170 | 25 | 25 | 47 |
| Изменение массы, %, после экспозиции в среде топлива ТС-1 в течение 24 ч при температуре 125°C (ГОСТ 9.030–74) | Не более 12 | 7,9 | – | – | – | – | – | – |
| Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия при температуре -50°C (ГОСТ 13808–79) | – | 0,32 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 60 | 60 | 60 |

* Разработка компании Dow Corning Co. (США).

Материалы и методы

Отечественные фторсилоксановые резины наряду с высокими эксплуатационными характеристиками имеют ряд существенных недостатков. Это низкие механические показатели, такие как прочность и сопротивление раздиру, что сдерживает их применение в уплотнительных деталях авиационной техники. В ВИАМ проводятся систематические исследования по созданию отечественных фторсилоксановых резин на базе модификаций каучука СКТФТ-100 разработки ФГУП «НИИСК». В последнее время во ФГУП «НИИСК» разработан каучук СКТФТ-100М, обеспечивающий увеличенные показатели услов-

ной прочности и сопротивления раздиру резин.

При разработке и комплексном исследовании новой резиновой смеси использовали стандартные методы, применяемые в технологии резины.

Результаты

На основе указанного каучука разработаны рецептура резины и технология ее изготовления. В настоящее время подобные резины, сочетающие высокие тепло-морозостойкость и физико-механические характеристики, необходимы для герметизации ряда соединений узлов летательных аппаратов современной и перспективной авиационной, ракетной и космической техники.

Совершенствование технологий изготовления тепло- и топливостойкой резины на основе каучуков, синтезированных из отечественного сырья, позволит исключить зависимость производства от импорта и обеспечить стабильность их свойств.

Авторами проведен широкий комплекс исследований разработанной резины. Результаты приведены в табл. 2–8.

Из данных табл. 2–8 можно сделать вывод, что фторсилоксановая резина, разработанная во ФГУП «ВИАМ», соответствует современному уровню разработок резин данных типов и может быть рекомендована для изготовления уплотнительных деталей неподвижных соединений, работающих в среде воздуха и топлива. Возможна эксплуатация материала в среде воздуха в интервале температур от -50 до $+200^{\circ}\text{C}$, в среде топлива ТС-1 – от -50 до $+125^{\circ}\text{C}$. В настоящее время проводятся дополнительные исследования по совершенствованию рецептуры и технологии изготовления указанной резины.

Обсуждение и заключения

Проведенный анализ показал, что в России проводится большой объем работ по улучшению фторсилоксановых каучуков, на основе которых разрабатываются резиновые смеси. Поскольку фторсилоксановые каучуки обладают высокой топливо-, морозо- и термостойкостью, они чаще всего используются в резинах

для изделий автомобильной, авиационной и космической техники. Однако следует отметить, что фторсилоксановые каучуки достаточно дорогостоящие, поэтому применять их в изделиях массового ассортимента и народного хозяйства нецелесообразно.

Авторами выявлены следующие направления разработок в области фторсилоксановых каучуков и резин на их основе: в России – повышение механических характеристик, масло- и бензостойкости, увеличение срока эксплуатации достигается путем использования новых каучуков; за рубежом используется более широкий спектр технических приемов – модификация каучука, совершенствование рецептуры путем введения новых модификаторов и наполнителей, совмещение различных каучуков и введение олигомеров, создание многослойных изделий.

Вышеперечисленные подходы позволяют получать материалы, обладающие комплексом необходимых свойств для работы в экстремальных условиях: высокой морозостойкостью, масло- и бензостойкостью, термостойкостью в широком интервале температур при сохранении высокой прочности материала. На основании достижений в области синтеза отечественных фторсилоксановых каучуков во ФГУП «ВИАМ» разработана новая резина, которая соответствует современным мировым аналогам и по ряду параметров превосходит их.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 41–45.
3. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №8. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.03.2015).
4. Елисеев О.А., Краснов Л.Л., Зайцева Е.И., Савенкова А.В. Разработка и модифицирование эластомерных материалов для применения во всеклиматических условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 309–314.
5. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.03.2015).
6. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
7. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
8. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
9. Большой справочник резинщика в 2 ч. М.: Техинформ, 2012. 1385 с.
10. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине. М.: Химия. 1989. 400 с.
11. Технология резины: Рецептуростроение и испытания: пер. с англ. / под ред. Дж.С. Дика. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
12. Швейцер Ф.А. Коррозия пластмасс и резин. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 637 с.
13. Мартин Дж.М., Смит У.К. Производство и применение резинотехнических изделий: пер. с англ. СПб.: Профессия, 2006. 480 с.
14. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.03.2015).
15. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 53–55.
16. Ito M., Noguchi T., Ueki H., Inukai H., Ino S., Takeuchi K., End M. Adhesion and Reinforcement of CNT-fluoroelastomers Composite for Oilfield Application // *Journal of The Adhesion Society of Japan*. 2011. V. 47 (4). P. 146–153.