





Эффективность резин на основе этиленпропиленовых каучуков в качестве радиационностойких материалов

| | | |
|--------------------------------------|---------------------|---|
| Николай А. Чернобровкин ¹ | kolacher@rambler.ru |  0000-0002-3592-3644 |
| Людмила Р. Люсова ¹ | luslr@mail.ru |  0000-0001-9515-6347 |
| Светлана В. Котова ¹ | s.v.kotova@mail.ru |  0000-0002-7076-4669 |
| Маргарита С. Щербакова ² | schmstpp@ya.ru |  0000-0003-2777-3196 |





¹ Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Россия, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 5, г. Москва, 119435, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты использования резинотехнических изделий на основе тройных этиленпропиленовых каучуков отечественного и зарубежного производства, наполненных антирадиационной добавкой на основе композиции оксидов редкоземельных элементов, в качестве радиационностойких эластомерных материалов. Применение эластомеров в атомной промышленности позволяет решить множество актуальных задач и обеспечить работу многих ответственных изделий и механизмов, функционирование которых без применения эластичных материалов не представляется возможным. В данной работе представлены полученные результаты исследования и сравнение физико-механических и эксплуатационных свойств резин на основе различных этиленпропиленовых каучуков отечественного и зарубежного производства с добавлением антирадиационной добавки ВКР-5М для использования их в качестве радиационностойких эластомерных материалов. Изучены основные физико-механические и эксплуатационные характеристики резиновых смесей и резин на основе этиленпропиленовых каучуков отечественного и зарубежного производства. Рассмотрены основные механизмы и свойства радиационного старения эластомеров, а также способы повышения их стойкости к воздействию ионизирующего излучения. В работе приведены результаты исследований морозостойкости, термостойкости, радиационной и терморadiационной стойкости резин на основе этиленпропиленовых каучуков, в составе которых присутствует антирадиационная добавка на основе композиции оксидов редкоземельных элементов ВКР-5М, выявлены преимущества и недостатки различных марок отечественных и зарубежных этиленпропиленовых каучуков в различных эксплуатационных условиях, а также сделаны выводы об эффективности введения антирадиационной добавки ВКР-5М, повышающей радиационную стойкость резин. По результату анализа данных, полученных в ходе работы, определена наиболее радиационностойкая эластомерная основа для резин, используемых в условиях повышенного радиационного воздействия.

Ключевые слова: резина, радиация, этиленпропиленовые каучуки, антирадиационная добавка, старение, ионизирующее излучение, свойства резин, резиновая смесь.

The effectiveness of rubbers based on ethylene propylene rubbers as radiation-resistant materials

| | | |
|--|---------------------|---|
| Nikolay A. Chernobrovkin ¹ | kolacher@rambler.ru |  0000-0002-3592-3644 |
| Ludmila R. Lyusova ¹ | luslr@mail.ru |  0000-0001-9515-6347 |
| Svetlana V. Kotova ¹ | s.v.kotova@mail.ru |  0000-0002-7076-4669 |
| Margarita S. Shcherbakova ² | schmstpp@ya.ru |  0000-0003-2777-3196 |

¹ Russian Technological University, Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Malaya Pirogovskaya street, 1, p. 5.s, Moscow, 119435, Russia.

² Voronezh State University of Engineering Technology, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article discusses the main aspects of the use of rubber products based on triple ethylene propylene rubbers of domestic and foreign production, filled with an anti-radiation additive based on a composition of oxides of rare earth elements, as radiation-resistant elastomeric materials. The use of elastomers in the nuclear industry makes it possible to solve many urgent problems and ensure the operation of many critical products and mechanisms, the functioning of which is not possible without the use of elastic materials. This paper presents the results of the study and comparison of the physico-mechanical and operational properties of rubbers based on various ethylene propylene rubbers of domestic and foreign production with the addition of anti-radiation additive VKR-5M for their use as radiation-resistant elastomeric materials. The basic physical, mechanical and operational characteristics of rubber mixtures and rubbers based on ethylene propylene rubbers of domestic and foreign production have been studied. The main mechanisms and properties of radiation aging of elastomers, as well as ways to increase their resistance to ionizing radiation are considered. The paper presents the results of studies of frost resistance, heat resistance, radiation and thermal radiation resistance of rubbers based on ethylene propylene rubbers, which contain an anti-radiation additive based on the composition of rare earth element oxides WRC-5M, the advantages and disadvantages of various brands of domestic and foreign ethylene propylene rubbers in various operating conditions, and conclusions are drawn about the effectiveness of the introduction of anti-radiation additives WRC-5M, which increases the radiation resistance of rubbers. Based on the analysis of the data obtained during the work, the most radiation-resistant elastomeric base for rubbers used in conditions of increased radiation exposure was determined.

Keywords: rubber, radiation, ethylene propylene rubbers, modifying additive, aging, ionizing radiation, rubber properties, rubber compound.

Для цитирования

Чернобровкин Н.А., Люсова Л.Р., Котова С.В., Щербакова М.С. Эффективность резин на основе этиленпропиленовых каучуков в качестве радиационностойких материалов // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3. С. 159–165. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-159-165

For citation

Chernobrovkin N.A., Lyusova L.R., Kotova S.V., Shcherbakova M.S. The effectiveness of rubbers based on ethylene propylene rubbers as radiation-resistant materials. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 3. pp. 159–165. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-3-159-165

Введение

Вопрос обеспечения безопасности при транспортировке и хранении радиоактивных веществ и отходов (РВ и РАО), а также ядерных материалов (ЯМ) является актуальным на протяжении многих лет как в России, так и за рубежом. В настоящее время имеется обширный опыт использования различных радиационностойких материалов, в том числе резинотехнических изделий (РТИ). В настоящее время в качестве эластомерной основы для радиационностойких РТИ используют силоксановые, фторсодержащие и этиленпропиленовые каучуки. При изучении результатов испытаний на стойкость к терморadiационному старению было определено, что резины на основе этиленпропиленовых каучуков обладают наилучшим комплексом свойств для применения их в качестве радиационностойкого эластичного материала [1].

Поскольку при эксплуатации изделий атомной промышленности всегда рассматривается два режима – нормальная эксплуатация и аварийный режим, то выбор конструктивного эластомерного материала производится на основании следующих эксплуатационных характеристик:

- стойкость при длительном воздействии напряжения сжатия (что необходимо для сохранения герметичности);
- терморadiационная и радиационная стойкость;
- сопротивление ударным и вибрационным нагрузкам.

Сложности при эксплуатации РТИ в подобных условиях заключаются в совместном воздействии радиации и температуры на материал. Вместе с этим, резины должны обладать стойкостью к воздействию дезактивирующих кислотно-щелочных растворов.

Радиационная стойкость эластомеров – это способность эластомера сохранять под воздействием ионизирующего излучения свои химические и физические свойства, состав и структуру [1]. Свойства резины под таким воздействием изменяются вследствие следующих процессов:

- радиационное сшивание, которое заключается в образовании поперечных межмолекулярных углерод-углеродных связей;
- радиационная деструкция – разрыв валентных связей в макромолекуле с образованием летучих низкомолекулярных продуктов радиолитического разложения;
- изомеризация с изменением ненасыщенности;
- радиационное окисление;

- газовыделение (в большинстве случаев выделяется водород).

Стойкость эластомера к воздействию радиации определяется особенностью его взаимодействия с частицами или квантами излучения. В зависимости от вида излучения (α , β или γ) стойкость будет отличаться. Нестойкими окажутся каучуки, при облучении которых будет преобладать один из описанных выше процессов (деструкция или структурирование). При воздействии радиации на резины происходит необратимое изменение их свойств, которое называют радиационным старением. Деструкция и структурирование приводят к изменению механических свойств эластомера [1].

При действии ионизирующего излучения на резины происходит два процесса:

- сшивание макромолекул полимера (структурирование);
- деструкция полимера.

Соответственно, полимерные материалы можно разделить на две группы. У первых происходит сшивание цепей, увеличивается число поперечных связей, что проявляется в увеличении жесткости. Также увеличивается напряжение, при котором начинается состояние вязкого течения. У вторых при излучении преобладает процесс деструкции. Связи рвутся, это проявляется в увеличении мягкости и хрупкости. Каучук легко «раскалывается». К тому же, понижается напряжение, при котором наблюдается вязкое течение полимера. Радиационная стойкость полимеров, зависит от количества, растворенного в них кислорода воздуха и скорости его поступления из окружающей среды; в его присутствии происходит радиационно-химическое окисление вещества. В результате этого существенно изменяются химическая и термическая стойкость веществ, предел прочности и модуль упругости, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность и электрическая проводимость. Более подробно вопрос воздействия ионизирующего излучения на полимерные материалы описан в [2–3].

Радиационная стойкость резин наиболее эффективно осуществляется введением в резиновую смесь защитных добавок – антирадов, которые поглощают энергию, полученную эластомером при облучении, и рассеивают её в виде тепла или флуоресценции, при этом не претерпевая существенных изменений. При прохождении через антирад лучи ионизирующего излучения взаимодействуют с атомами вещества, в результате чего образуется спектр поглощения и часть энергии поглощается [5].

Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе являются резины на основе тройных этиленпропиленовых каучуков отечественного и зарубежного производства: СКЭП-40, СКЭПТ-50, Vistalon 7500 EPDM (Exxon Mobil Corporation, США). В рецептуре присутствовала сера, ZnO, стеариновая кислота и технический углерод (марки П-324) и другие целевые добавки. В качестве антирада использовали соединение, представляющее собой композицию оксидов редкоземельных металлов, марки ВКР-5М (ТУ 95–1537–87). Это добавка на основе суммы оксидов редкоземельных элементов следующего состава: La_2O_3 , CeO_2 , PrO_2 , Nd_2O_3 , Sm_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , Tb_2O_3 , Dy_2O_3 , Ho_2O_3 , Er_2O_3 , Tm_2O_3 , Yb_2O_3 , Lu_2O_3 и Y_2O_3 . Добавка является наиболее экологически чистой по сравнению с другими антирадиационными добавками, например, на основе свинца.

Резиновую смесь изготавливали на вальцах в течение 30 минут при температуре переднего валька 50 °С и заднего 70 °С. Вулканизацию

проводили в вулканизационных прессах при температуре 180 °С в течение 10 минут [7].

В работе использовали следующие методики:

- определение вязкости по Муни на дисковом вискозиметре MonTech MV 3000 (ГОСТ 10722–76);
- определение условной прочности резины при растяжении (ГОСТ 270–75);
- определение сопротивления раздиру (ГОСТ 262–73);
- твердость по Шору (ГОСТ 263–75);
- определение морозостойкости резин (ГОСТ 13808–79);
- испытание на стойкость резин к старению при статической деформации сжатия (ГОСТ 9.029–74);
- испытание на стойкость к радиационному старению (ГОСТ-9.701–79).

Результаты

В таблице 1 представлены данные, показывающие влияние типа каучука и содержания в резине антирада на физико-механические свойства резиновых смесей и резин.

Таблица 1.

Физико-механические свойства исследованных образцов

Table 1.

Physical and mechanical properties of the studied samples

| Эластомерная основа Elastomeric base | Вязкость по Муни Mooney Viscosity | Условная прочность при растяжении, МПа Conditional tensile strength, MPa | Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, % | Остаточное удлинение, % Residual elongation, % | Твердость по Шору, усл. ед. Shore hardness, conventional units |
|---|--|---|--|---|---|
| СКЭПТ-40 | 41 (100 °С) | 20.1 | 270 | 3 | 73 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 41 (100 °С) | 18.2 | 249 | 2 | 71 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (1 масс. ч) | 42 (100 °С) | 23 | 296 | 4 | 69 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (3 масс. ч) | 42 (100 °С) | 21.5 | 281 | 2 | 65 |
| СКЭПТ-50 | 52 (100 °С) | 21.4 | 300 | 4 | 67 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 53 (100 °С) | 20.6 | 274 | 3 | 64 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (1 масс. ч) | 53 (100 °С) | 24 | 310 | 6 | 64 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (3 масс. ч) | 5 (100 °С) | 22 | 284 | 4 | 62 |
| Vistalon 7500 | 82 (100 °С) | 21 | 295 | 4 | 65 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 82 (100 °С) | 18.4 | 260 | 2 | 61 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (1 масс. ч) | 83 (100 °С) | 23.7 | 307 | 5 | 58 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (3 масс. ч) | 83 (100 °С) | 19.4 | 283 | 4 | 56 |

Основное внимание в работе уделяли изучению влияния радиационного облучения на показатели, необходимые, например, для уплотнителей, работающих в условиях пониженных и повышенных температур. Известно, что морозостойкость резин в значительной мере определяется процессом микрокристаллизации, при этом было установлено, что оптимальным (с точки зрения морозостойкости) является содержание пропилена (W) 40–45 моль% для тройных этиленпропиленовых сополимеров [6].

Данное содержание близко содержанию, обеспечивающему термо- и радиационную стойкость, и является оптимальным для резин, которые эксплуатируются в широком интервале температур и при наличии ионизирующего излучения [7]. Для испытываемых резин был определен коэффициент эластического восстановления (K_e) после сжатия ($\varepsilon=30\%$) до и после облучения дозой в 500 мкЗв при охлаждении в течение 5 минут и 5.5 часов. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Восстанавливаемость (K_v) образцов

Table 2.

Recoverability (K_v) of samples

| Эластомерная основа Elastomeric base | $\tau=5$ минут, $t=-40$ °C, доза=0 мкЗв $\tau=5$ min, $t=-40$ °C, Dose =0 μ Sv | $\tau=5$ минут, $t=-50$ °C, доза=0 мкЗв $\tau=5$ min, $t=-50$ °C, Dose =0 μ Sv | $\tau=5.5$ часов, $t=-40$ °C, доза=0 мкЗв $\tau=5.5$ h, $t=-40$ °C, Dose =0 μ Sv | $\tau=5$ минут, $t=-40$ °C, доза=500 мкЗв $\tau=5$ min, $t=-40$ °C, Dose =500 μ Sv | $\tau=5$ минут, $t=-50$ °C, доза=500 мкЗв $\tau=5$ min, $t=-50$ °C, Dose =500 μ Sv | $\tau=5.5$ часов, $t=-40$ °C, доза=500 мкЗв $\tau=5.5$ h, $t=-40$ °C, Dose =500 μ Sv |
|---|---|---|---|---|---|---|
| СКЭПТ-40 | 0.54 | 0.47 | 0.39 | 0.30 | 0.27 | 0.18 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 0.5 | 0.45 | 0.38 | 0.38 | 0.31 | 0.29 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (1 масс. ч) | 0.50 | 0.46 | 0.39 | 0.39 | 0.34 | 0.31 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (3 масс. ч) | 0.49 | 0.45 | 0.31 | 0.38 | 0.33 | 0.27 |
| СКЭПТ-50 | 0.78 | 0.71 | 0.57 | 0.45 | 0.41 | 0.31 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 0.75 | 0.71 | 0.59 | 0.57 | 0.54 | 0.43 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (1 масс. ч) | 0.78 | 0.70 | 0.57 | 0.60 | 0.51 | 0.54 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (3 масс. ч) | 0.75 | 0.71 | 0.56 | 0.58 | 0.49 | 0.46 |
| Vistalon 7500 | 0.72 | 0.67 | 0.54 | 0.49 | 0.41 | 0.35 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 0.71 | 0.66 | 0.51 | 0.46 | 0.53 | 0.45 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (1 масс. ч) | 0.73 | 0.68 | 0.59 | 0.55 | 0.59 | 0.50 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (3 масс. ч) | 0.73 | 0.69 | 0.58 | 0.52 | 0.59 | 0.48 |

Можно видеть, что изучаемые резины отличаются по морозостойкости, причем, большей морозостойкостью обладают резины из СКЭПТ-50 и Vistalon 7500, что может быть связано с их повышенной молекулярной массой и затруднением процессов кристаллизации. Следует отметить положительное влияние на изменение восстанавливаемости образцов после воздействия радиации используемого антирада ВКР-5М. Оптимальным его содержанием в резинах можно считать 1 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука, что позволяет повысить их морозостойкость после облучения в среднем на 25%.

В соответствии с ГОСТ 9029–74 исследовали накопление остаточной деформации сжатия, отражающее работоспособность таких изделий, как уплотнители. Испытания проводили при температуре 150 и 180 °C в течение 72 и 18 часов соответственно. [8] Результаты представлены в таблице 3.

Радиационную и терморadiационную стойкость исследованных резин определяли по величине остаточной деформации при сжатии 20% после облучения дозами 500 мкЗв и 750 мкЗв и температурах 20 и 150 °C соответственно [9]. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 3.

Накопление остаточной деформации сжатия образцов под длительным воздействием температуры

Table 3.

Accumulation of residual compression deformation of samples under prolonged exposure to temperature

| Эластомерная основа Elastomeric base | $t=150$ °C, $\tau=72$ ч $t=150$ °C, $\tau=72$ h | $t=180$ °C, $\tau=18$ ч $t=180$ °C, $\tau=18$ h |
|---|--|--|
| СКЭПТ-40 | 54.6 | 51.8 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 55.0 | 51.0 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (1 масс. ч) | 48.3 | 46.7 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (3 масс. ч) | 56.1 | 55.0 |
| СКЭПТ-50 | 42.6 | 43.8 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 41.3 | 42.1 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (1 масс. ч) | 42.5 | 41.2 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (3 масс. ч) | 43.8 | 45.2 |
| Vistalon 7500 | 48.6 | 50.2 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (0,5 масс. ч) | 47.9 | 49.1 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (1 масс. ч) | 44.7 | 45.3 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (3 масс. ч) | 51.3 | 53.6 |

Таблица 4.
Величина остаточной деформации
Table 4.
The amount of residual deformation

| Эластомерная основа Elastomeric base | t=20 °C, доза=750 мкЗв t=20 °C, dose=750 μSv | t=150 °C, доза=500 мкЗв t=150 °C, dose=500 μSv |
|--|---|---|
| СКЭПТ-40 | 64 | 83 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (0.5 масс. ч) | 62 | 79 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (1 масс. ч) | 59 | 76 |
| СКЭПТ-40+ВКР-5М (3 масс. ч) | 63 | 79 |
| СКЭПТ-50 | 52 | 71 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (0.5 масс. ч) | 50 | 65 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (1 масс. ч) | 45 | 60 |
| СКЭПТ-50+ВКР-5М (3 масс. ч) | 50 | 67 |
| Vistalon 7500 | 57 | 73 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (0.5 масс. ч) | 55 | 70 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (1 масс. ч) | 48 | 67 |
| Vistalon 7500+ВКР-5М (3 масс. ч) | 51 | 71 |

Результаты проведенных исследований подробно рассмотрены ниже, а также сделаны выводы по полученным значениям.

Обсуждение

По результатам определения физико-механических характеристик резиновых смесей и резин на основе различных марок этиленпропиленового каучука можно сделать следующие выводы:

- особенности строения каучука не оказывают существенного влияния на прочностные свойства вулканизатов;
- введение антирада ВКР-5М оказывает незначительное влияние на прочностные свойства вулканизатов, при его содержании в резиновой смеси 1 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука наблюдается некоторое увеличение прочностных характеристик резин, однако не превышающее ошибку эксперимента.

По результатам испытания на морозостойкость образцов можно сделать вывод, что из резин на основе тройных этиленпропиленовых каучуков наибольшей морозостойкостью обладает СКЭПТ-50. Антирад способствует существенному повышению стойкости к воздействию радиации, а максимальная морозостойкость резин наблюдается при содержании модификатора 1 масс. ч. Облучение, в основном, приводит к повышению морозостойкости, а увеличение времени испытания приводит к уменьшению K_6

для всех образцов, как контрольных, так и после облучения. Показано, что все исследованные резины сохраняют эксплуатационные характеристики при заданных температурах при статической деформации сжатия. Ни одна из резин не превышает критического значения накопления остаточной деформации сжатия.

Наибольшей термостойкостью при статической деформации сжатия обладают резины на основе СКЭПТ-50. Введение в резиновую смесь ВКР-5М способствует увеличению сопротивления воздействию радиации при повышенных температурах. Так, при дозе облучения в 750 мкЗв и при $t=20$ °C значения накопления остаточной деформации не превышают критических (80%). Таким образом, все исследованные резины могут эксплуатироваться при $t=20$ °C длительное время при дозе облучения в 750 мкЗв. Наилучшим образом показали себя резины на основе СКЭПТ-50 при содержании антирада 1 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука. При совместном воздействии радиации и повышенной температуры значения накопления остаточной деформации резин на основе немодифицированного СКЭПТ-40 превышают критическую отметку (80%), в то время, как введение антирада приводит к понижению накопления остаточной деформации, причем, оптимальным содержанием ВКР-5М является опять же 1 масс. ч. на 100 масс. ч. каучука.

Заключение

В работе исследованы свойства резиновых смесей и резин на основе тройных этиленпропиленовых каучуков отечественного и зарубежного производства, модифицированных антирадиационной добавкой на основе композиции оксидов редкоземельных металлов – ВКР-5М. Все образцы обладают хорошими физико-механическими характеристиками. Установлено положительное влияние антирада на термо- и морозостойкость резин, особенно подвергнутых радиационному облучению. Полученные экспериментальные данные соответствуют значениям, обеспечивающим требуемые термо- и радиационную стойкость резин, позволяют рекомендовать разработанные составы для изготовления радиационностойких резин, эксплуатирующихся в широком интервале температур. После проведения дополнительных физико-химических испытаний и расширенных испытаний в условиях эксплуатации можно рекомендовать резины на основе каучука СКЭПТ-50 для изготовления резиновых изделий, например, уплотнителей, которые могут быть подвергнуты воздействию радиации.

Литература

- 1 Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. Москва: НППА «Истек», 2009. 504 с.
- 2 Штейнберг Е.М., Зенитова Е.А. Снижение экологической опасности радиационного облучения с использованием полимерных композиционных материалов. Обзор. // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 8. С. 67–71.
- 3 Галимзянова Р.Ю., Шакирова Ю.Д., Лисаневич М.С., Хакимуллин Ю.Н. Влияние гамма- и электронного излучений при радиационной стерилизации на свойства материала на основе вискозного волокна // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 10. С. 99–101.
- 4 Резниченко С.В. Большой справочник резинщика Ч. 1 Каучуки и ингредиенты. Москва: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 744 с.
- 5 Дик Д.С., Глаголев В.А., Котова С.В., Люсова Л.Р. Технология резины: Рецептуростроение и испытания. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
- 6 Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Венедиктова М.А., Наумов И.С. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №. 2 (35). С. 51-55.
- 7 Вахрушева Я.А., Юмашев О.Б., Чайкун А.М. Современные тенденции в области морозостойких резин на основе полярных и неполярных каучуков (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. №. 8 (114). С. 77-87.
- 8 Чайкун А.М., Юмашев О.Б., Сергеев А.В. Особенности разработки рецептуры морозостойкой озоностойкой резины на основе этиленпропиленового каучука // Труды ВИАМ. 2022. №. 9 (115). С. 58-67.
- 9 Ястребинский Р.Н., Самойлова Ю.М., Павленко В.И., Демченко О.В. Использование высокодисперсного оксида алюминия для синтеза радиационно-стойких полимерных композитов // Успехи современного естествознания. 2015. №. 9-3. С. 532-535.
- 10 ГОСТ 9.024–74 ЕСЗКС. Резины. Метод испытаний на стойкость к термическому старению. Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, 1975 г.
- 11 ГОСТ 9.701–79 ЕСЗКС. Резины. Метод испытаний на стойкость к радиационному старению. Издательство стандартов, 1984 г.
- 12 Lv J., Wang H., Liu Y., Chen J. et al. Nanocomposite enhanced radiation resistant effects in polyurethane Elastomer with low fraction of polydoapmine nanoparticles // Composites Science and Technology. 2020. V. 186. P. 107908. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107908
- 13 Zenoni A., Bignotti F., Donzella A., Donzella G. et al. Radiation resistance of elastomeric O-rings in mixed neutron and gamma fields: Testing methodology and experimental results // Review of Scientific Instruments. 2017. V. 88. №. 11. P. 113304. doi: 10.1063/1.5011035
- 14 Kumar P., Niranjana Prabhu T., Jineesh A.G. BaSO₄ and Fe₂O₃ filled polydimethylsiloxane elastomer nanocomposite as X-ray radiation resistant material // SasTech J. 2018. V. 17. P. 1.
- 15 Rzaeva S.A., Mammadov S.M., Garibov A.A., Akperov O.H. Physical and chemical regularities of obtaining heat resistant and radiation resistant polymer materials based on polyblend. 2014.
- 16 Boyarintsev A.Y., Galunov N.Z., Grinyov B.V., Krech A.V. Development features of radiation-resistant materials for composite scintillators and wavelength shifting light guides // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2019. V. 930. P. 180-184. doi: 10.1016/j.nima.2019.03.100
- 17 Awasthi P., Banerjee S.S. Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities // Additive Manufacturing. 2021. V. 46. P. 102177. doi: 10.1016/j.addma.2021.102177
- 18 Gao R., Sun W.H., Redshaw C. Nickel complex pre-catalysts in ethylene polymerization: new approaches to elastomeric materials // Catalysis Science & Technology. 2013. V. 3. №. 5. P. 1172-1179. doi: 10.1039/C3CY20691B
- 19 Larsen M.B., Boydston A.J. Successive mechanochemical activation and small molecule release in an elastomeric material // Journal of the American Chemical Society. 2014. V. 136. №. 4. P. 1276-1279. doi: 10.1021/ja411891x
- 20 Cardone D., Gesualdi G. Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures // International Journal of Mechanical Sciences. 2012. V. 64. №. 1. P. 127-143. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.07.008

References

- 1 Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. Technology of elastomeric materials. Moscow, NPPA "Istek", 2009. 504 p. (in Russian).
- 2 Steinberg E.M., Zenitova E.A. Reducing the environmental hazard of radiation exposure using polymer composite materials. Review. Bulletin of the Kazan Technological University. 2012. no. 8. pp. 67–71. (in Russian).
- 3 Galimzyanova R.Yu., Shakirova Yu.D., Lisanevich M.S., Khakimullin Yu.N. Influence of gamma and electron radiation during radiation sterilization on the properties of a material based on viscose fiber. Bulletin of the Kazan Technological University. 2016. vol. 19. no. 10. pp. 99–101. (in Russian).
- 4 Reznichenko S.V. The Big Guide of the Gum Maker Ch. 1 Rubbers and Ingredients. Moscow, LLC "Publishing Center "Techinform" MAI", 2012. 744 p. (in Russian).
- 5 Dick D.S., Glagolev V.A., Kotova S.V., Lyusova L.R. Rubber Technology: Formulation and Testing. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010. 620 p. (in Russian).
- 6 Alifanov E.V., Chaikun A.M., Venediktova M.A., Naumov I.S. Features of rubber formulations based on ethylene-propylene rubbers and their application in special-purpose products (review). Aviation materials and technologies. 2015. no. 2 (35). pp. 51-55. (in Russian).
- 7 Vakhrusheva Ya.A., Yumashev O.B., Chaikun A.M. Modern trends in the field of frost-resistant rubbers based on polar and non-polar rubbers (review). Proceedings of VIAM. 2022. no. 8 (114). pp. 77-87. (in Russian).

- 8 Chaikun A.M., Yumashev O.B., Sergeev A.V. Peculiarities of formulation development of frost-resistant ozone-resistant rubber based on ethylene-propylene rubber. Proceedings of VIAM. 2022. no. 9 (115). pp. 58-67. (in Russian).
- 9 Yastrebinsky R.N., Samoilova Yu.M., Pavlenko V.I., Demchenko O.V. The use of highly dispersed aluminum oxide for the synthesis of radiation-resistant polymer composites. Successes of modern natural science. 2015. no. 9-3. pp. 532-535. (in Russian).
- 10 GOST 9.024-74 ESZKS. Rubber. Test method for resistance to thermal aging. Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry, 1975
- 11 GOST 9.701-79 ESZKS. Rubber. Test method for resistance to radiation aging. Standards Publishing, 1984.
- 12 Lv J., Wang H., Liu Y., Chen J. et al. Nanocomposite enhanced radiation resistant effects in polyurethane Elastomer with low fraction of polydoamine nanoparticles. Composites Science and Technology. 2020. vol. 186. pp. 107908. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107908
- 13 Zenoni A., Bignotti F., Donzella A., Donzella G. et al. Radiation resistance of elastomeric O-rings in mixed neutron and gamma fields: Testing methodology and experimental results. Review of Scientific Instruments. 2017. vol. 88. no. 11. pp. 113304. doi: 10.1063/1.5011035
- 14 Kumar P., Niranjana Prabhu T., Jineesh A.G. BaSO₄ and Fe₂O₃ filled polydimethylsiloxane elastomer nanocomposite as X-ray radiation resistant material. SasTech J. 2018. vol. 17. pp. 1.
- 15 Rzaeva S.A., Mammadov S.M., Garibov A.A., Akperov O.H. Physical and chemical regularities of obtaining heat resistant and radiation resistant polymer materials based on polyblend. 2014.
- 16 Boyarintsev A.Y., Galunov N.Z., Grinyov B.V., Krech A.V. Development features of radiation-resistant materials for composite scintillators and wavelength shifting light guides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2019. vol. 930. pp. 180-184. doi: 10.1016/j.nima.2019.03.100
- 17 Awasthi P., Banerjee S.S. Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. Additive Manufacturing. 2021. vol. 46. pp. 102177. doi: 10.1016/j.addma.2021.102177
- 18 Gao R., Sun W.H., Redshaw C. Nickel complex pre-catalysts in ethylene polymerization: new approaches to elastomeric materials. Catalysis Science & Technology. 2013. vol. 3. no. 5. pp. 1172-1179. doi: 10.1039/C3CY20691B
- 19 Larsen M.B., Boydston A.J. Successive mechanochemical activation and small molecule release in an elastomeric material. Journal of the American Chemical Society. 2014. vol. 136. no. 4. pp. 1276-1279. doi: 10.1021/ja411891x
- 20 Cardone D., Gesualdi G. Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures. International Journal of Mechanical Sciences. 2012. vol. 64. no. 1. pp. 127-143. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.07.008

Сведения об авторах

Николай А. Чернобровкин аспирант, кафедра химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева, Российский технологический университет, Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 5, г. Москва, 119435, Россия, kolacher@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3592-3644>

Людмила Р. Люсова д.т.н., профессор, кафедра химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева, Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 5, г. Москва, 119435, Россия, luslr@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9515-6347>

Светлана В. Котова к.т.н., доцент, кафедра химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева, Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 5, г. Москва, 119435, Россия, s.v.kotova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7076-4669>

Маргарита С. Щербак доцент, кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров и техноосферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, schmstpp@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2777-3196>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nikolay A. Chernobrovkin graduate student, chemistry and technology of elastomer processing named after F.F. Koshelev department, Russian Technological University, Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Malaya Pirogovskaya street, 1, p. 5.s, Moscow, 119435, Russia, kolacher@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3592-3644>

Ludmila R. Lyusova Dr. Sci. (Chem.), professor, chemistry and technology of elastomer processing named after F.F. Koshelev department, Russian Technological University, Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Malaya Pirogovskaya street, 1, p. 5.s, Moscow, 119435, Russia, luslr@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9515-6347>

Svetlana V. Kotova Cand. Sci. (Econ.), associate professor, chemistry and technology of elastomer processing named after F.F. Koshelev department, Russian Technological University, Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Malaya Pirogovskaya street, 1, p. 5.s, Moscow, 119435, Russia, s.v.kotova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7076-4669>

Margarita S. Shcherbakova associate professor, technology of organic compounds, polymer processing and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technology, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia, schmstpp@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2777-3196>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

| | | |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Поступила 20/07/2022 | После редакции 12/08/2022 | Принята в печать 31/08/2022 |
| Received 20/07/2022 | Accepted in revised 12/08/2022 | Accepted 31/08/2022 |