

Научная статья

УДК 678.742.4

DOI: 10.15372/KhUR2025626

EDN: UXSYYWN

Исследование влияния полиизобутиленов на свойства стойкой к морской воде резины

Е. Н. ЕГОРОВ¹ , С. И. САНДАЛОВ², Н. И. КОЛЬЦОВ¹¹Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия²Чебоксарское производственное объединение им. В. И. Чапаева, Чебоксары, РоссияE-mail: enegorov@mail.ru , sandalov-1963@yandex.ru, koltsovni@mail.ru

Аннотация

Исследовано влияние полиизобутиленов марок П-30 и П-200 на реометрические, физико-механические и динамические свойства резины для производства изделий, эксплуатируемых при воздействии морской воды. В состав резиновой смеси входили: бутадиен-стирольный ДССК-628В и хлорбутиловый ХБК-139 каучуки; вулканизирующий агент (сера); ускорители вулканизации (2,2'-дибензтиазолдисульфид, гуанид Ф); активаторы вулканизации (белила цинковые, стеариновая кислота); противостаритель (N-фенил-2-нафтиламин); мягчители (канифоль, битум нефтяной, фактис); наполнители (*транс*-полинонборнен, технические углероды (П 514, П 803) и мел природный). В результате проведенных исследований установлено, что при увеличении содержания полиизобутиленов от 5.0 до 20.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. полимерной основы наблюдается изменение физико-механических свойств (уменьшение условной прочности при растяжении, твердости и сопротивления раздиру) резины. При этом происходит увеличение относительного удлинения при разрыве и динамических свойств резины. Кроме того, при содержании полиизобутиленов до 15.0 мас. ч. физико-механические свойства резины изменяются в допустимых пределах, а при 20.0 мас. ч. эти свойства резко ухудшаются. Вулканизаты, содержащие полиизобутилены П-30 и П-200 до 15.0 мас. ч., обладают меньшими изменениями физико-механических показателей и массы после воздействия морской воды. Установлено, что резина, содержащая 15.0 мас. ч. полиизобутилена П-200, по физико-механическим, эксплуатационным и динамическим свойствам может быть рекомендована для производства изделий, работающих в условиях воздействия морской воды.

Ключевые слова: бутадиен-стирольный и хлорбутиловый каучуки, полиизобутилены, резина, реометрические, физико-механические и динамические свойства, морская вода

Для цитирования: Егоров Е. Н., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Исследование влияния полиизобутиленов на свойства стойкой к морской воде резины // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 1. С. 24–29. DOI: 10.15372/KhUR2025626. EDN: UXSYYWN.

Original article

Investigation of the Influence of Polyisobutylenes on the Properties of Seawater-Resistant Rubber

E. N. EGOROV¹ ✉, S. I. SANDALOV², N. I. KOLTISOV¹¹Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia²Cheboksary Production Association named after V. I. Chapaev, Cheboksary, Russia

E-mail: enegorov@mail.ru✉, sandalov-1963@yandex.ru, koltsozni@mail.ru

Abstract

The influence of polyisobutylene of grades P-30 and P-200 on the rheometric, physico-mechanical and dynamic properties of rubber used for manufacturing the products exposed to sea water has been investigated. The rubber compound included: butadiene-styrene DSSK-628V and chlorobutyl KhBK-139 rubbers, vulcanising agent (sulphur), vulcanisation accelerators (2,2'-dibenzthiazole disulphide, guanide F), vulcanisation activators (zinc white, stearic acid), antioxidant (N-phenyl-2-naphthylamine), softeners (rosin, petroleum bitumen, factis), fillers (*trans*-polynorbornene, carbons black (P 514, P 803), and natural chalk). As a result of the studies, it is established that with an increase in the content of polyisobutylenes from 5 to 20 phr a change in the physico-mechanical properties of rubber is observed (a decrease in tensile strength, hardness, and tear resistance), while the relative elongation at break and the dynamic properties of rubber increase. Moreover, with polyisobutylene content up to 15 phr, the physico-mechanical properties of rubber change within acceptable limits, but at 20 phr these properties deteriorate sharply. Vulcanisates containing polyisobutylenes P-30 and P-200 up to 15 phr exhibit smaller changes in physico-mechanical properties and mass after exposure to sea water. It has been determined that rubber containing 15 phr polyisobutylene P-200, due to its physico-mechanical, performance and dynamic properties, can be recommended for the manufacturing the products operating under exposure to sea water.

Keywords: styrene-butadiene and chlorobutyl rubbers, polyisobutylenes, rubber, rheometric, physico-mechanical and dynamic properties, sea water

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к резинотехническим изделиям предъявляются ужесточенные требования к надежности, долговечности и расширению диапазона эксплуатационных свойств. Это достигается за счет создания оптимальных рецептур резиновых смесей и технологий их переработки [1–3]. В особенности данные условия касаются резинотехнических изделий, к которым предъявляются высокие стандарты динамических характеристик [4–9]. Использование комбинаций каучуков и ингредиентов разной природы рассматривается в качестве перспективного подхода для создания резин с улучшенными динамическими (вибродемпфирующими) свойствами [10, 11], такими как тангенс угла механических потерь и модуль упругости. Некоторые из этих показателей определялись в [12–15] для резин, используемых в шинной промыш-

ленности, а также при изготовлении различных резинотехнических изделий, в том числе подвергаемых воздействию морской воды. Среди каучуков, способных усовершенствовать эксплуатационные и динамические свойства резин, заслуживают внимания полиизобутилены, хорошо совместимые с изопреновыми, бутадиеновыми и бутадиен-стирольными каучуками [16]. Благодаря предельному строению полиизобутиленов содержащие их композиции водостойки, обладают высокой стойкостью к различным химическим агентам, в частности, к кислотам [17, 18], и превосходными электроизоляционными свойствами [19, 20]. В связи с этим, представляет интерес улучшить эксплуатационные и динамические показатели разрабатываемой резины за счет введения в ее состав полиизобутиленов при сохранении реометрических и физико-механических свойств на допустимом уровне.

Цель данной работы – исследование влияния полиизобутиленов на свойства резины, используемой для производства изделий, устойчивых к воздействию морской воды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве основы исследуемой резиновой смеси с серной вулканизирующей системой использовали каучуки (ПАО “Нижнекамскнефтехим”): бутадиен-стирольный каучук ДССК-628В с вязкостью $МБ_{1+4}$ (100 °С) 77 ± 7 ед. Муни и массовой долей связанного стирола 24–30 % (ТУ 20.17.10-213-05766801-2019), а также хлорбутилкаучук ХБК-139 с вязкостью $МБ_{1+8}$ (125 °С) 39 ед. Муни, массовой долей хлора 1.20 % (ТУ 20.17.10-096-05766801-2017). Резиновая смесь включала следующие ингредиенты: вулканизирующий агент – сера; ускорители вулканизации – дифенилгуанидин, 2,2'-добензтиазолдисульфид; активаторы вулканизации – белила цинковые, стеариновая кислота; антиоксидант – N-фенил-2-нафтил-амин; мягчители – битум нефтяной, канифоль, фактис; наполнители – *транс*-полинонборнен, технические углероды П 514, П 803 и мел природный. В резиновую смесь вводили полиизобутилены марок П-30 и П-200 (ОАО “Ефремовский завод синтетического каучука”, согласно ТУ 38.303-02-99-2011 и ГОСТ 13303-86 соответственно), представляющие собой эластичные каучукоподобные продукты с молекулярной массой $(2.55-3.90) \cdot 10^4$ для П-30 и $(18-22) \cdot 10^4$ для П-200. Резиновую смесь готовили на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 (ГОСТ 14333-79, Россия) при температуре валков 60–70 °С в течение 25 мин. Реометрические характеристики резиновой смеси исследовались с помощью реометра MDR 3000 Basic фирмы (Mon Tech, Германия) при 150 °С в течение 40 мин в соответствии со стандартом ASTM D2084-79. Стандартные образцы для определения физико-механических показателей вулканизовали при температуре 150 °С в течение 30 мин с использованием вулканизационного пресса P-V-100-3RT-2-PCD (Pan Stone Hydraulic Industries Co, Тайвань).

Упруго-прочностные свойства определяли по ГОСТ 270-75; вязкость по Муни – по ГОСТ 10722-76; твердость по Шору А – по ГОСТ 263-75; сопротивление раздиру – по ГОСТ 262-93; эластичность по отскоку – по ГОСТ 27110-86; изменение условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и твердости после воздействия морской воды (8%-й водный раствор морской соли) – по ГОСТ 9.030-74 (метод В); изменение массы после экспозиции в морской воде – по ГОСТ 9.030-74 (метод А). Динамические параметры (модуль упругости и тангенс угла механических потерь) вулканизатов изучали с помощью динамического механического анализатора VHF 104 (Metravib, Франция) при 30 °С в режиме деформации “растяжение-сжатие” (степень деформации 0.01 %) и частоте 1000 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вначале были проведены исследования по оценке влияния содержания полиизобутиленов П-30 и П-200 от 5.0 до 30.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков на свойства резиновой смеси и вулканизатов на ее основе. Установлено значительное ухудшение реометрических и физико-механических свойств резины при содержании обоих полиизобутиленов в количестве >20.0 мас. ч. Поэтому дальнейшие более детальные исследования проводились при содержании полиизобутиленов П-30 и П-200 от 5.0 до 20.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков.

Вариант 1 резиновой смеси не содержал полиизобутилены, варианты 2–5 и 6–9 включали полиизобутилены П-30 и П-200 соответственно в количестве 5.0; 10.0; 15.0 и 20.0 мас. ч. В табл. 1 приведены варианты резиновой смеси, их реометрические свойства представлены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 данных следует, что увеличение содержания полиизобутилена П-30 в резиновой смеси приводит к понижению максимального и минимального крутящих моментов, а также их разности (ΔM). Это, по-видимому, обусловлено тем, что П-30 в составе

ТАБЛИЦА 1

Состав резиновой смеси

Ингредиент	Вариант резиновой смеси								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Полиизобутилен П-30, мас. ч.	–	5.0	10.0	15.0	20.0	–	–	–	–
Полиизобутилен П-200, мас. ч.	–	–	–	–	–	5.0	10.0	15.0	20.0

Примечание. Прочерк – ингредиент не добавляли.

ТАБЛИЦА 2

Реометрические характеристики резиновой смеси при 150 °С

Реометрический показатель	Вариант резиновой смеси								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_H , дН·м	8.15	7.81	7.40	6.97	6.21	7.94	7.59	7.28	6.52
M_L , дН·м	1.18	1.15	1.11	1.07	1.00	1.16	1.13	1.10	1.02
ΔM , дН·м	6.97	6.66	6.29	5.90	5.21	6.78	6.66	6.18	5.50
t_s , мин	8.09	8.52	9.07	9.54	10.68	8.25	8.65	9.01	9.96
t_{90} , мин	28.61	28.64	28.69	28.75	28.96	28.69	28.76	28.84	29.14

Примечание. M_H – максимальный крутящий момент; M_L – минимальный крутящий момент; ΔM – разность максимального и минимального крутящих моментов; t_s – время начала вулканизации; t_{90} – оптимальное время вулканизации.

ТАБЛИЦА 3

Физико-механические свойства вулканизатов и их изменения после выдержки в морской воде

Показатель	Вариант резиновой смеси								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Физико-механические показатели вулканизатов									
f_p , МПа	5.8±0.2	5.3±0.2	4.9±0.2	4.5±0.1	3.6±0.1	5.5±0.2	5.1±0.2	4.8±0.2	4.0±0.1
ϵ_p , %	380±15	400±18	420±16	450±20	500±22	390±16	410±16	430±18	490±20
H , ед. Шор А	56±1	53±1	52±1	51±1	46±1	55±1	53±1	52±1	48±1
B , кН/м	27±2	24±1	23±1	21±1	18±1	25±2	24±2	23±1	20±1
S , %	22±1	21±1	21±1	21±1	20±1	21±1	21±1	22±1	20±1
Изменение показателей вулканизатов после воздействия морской воды (23 °С, 1 сут)									
Δf_p , %	+(2.9±0.2)	+(2.9±0.1)	+(2.7±0.1)	+(2.5±0.1)	+(2.8±0.1)	+(2.6±0.1)	+(2.4±0.1)	+(2.2±0.1)	+(2.7±0.1)
$\Delta \epsilon_p$, %	-(7.7±0.4)	-(5.4±0.3)	-(4.8±0.2)	-(4.3±0.2)	-(6.9±0.2)	-(4.3±0.2)	-(3.7±0.2)	-(3.1±0.1)	-(5.4±0.1)
ΔH , ед. Шор А	-(2±1)	-(2±1)	-(1±1)	-(1±1)	-(1±1)	-(1±1)	-(1±1)	-(1±1)	-(1±1)
Изменение массы вулканизатов после воздействия морской воды (23 °С, 7 сут)									
Δm , %	+(0.34±0.01)	+(0.30±0.01)	+(0.25±0.01)	+(0.23±0.01)	+(0.32±0.01)	+(0.28±0.01)	+(0.23±0.01)	+(0.19±0.01)	+(0.30±0.01)

Примечание. f_p – условная прочность при растяжении; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве; H – твердость; B – сопротивление раздиру; S – эластичность по отскоку; m – масса вулканизата; Δf_p , $\Delta \epsilon_p$, ΔH , Δm – относительные изменения характеристик резиновых смесей после выдержки в морской воде.

резиновой смеси проявляет пластифицирующее действие. При этом наблюдается увеличение времен начала и оптимума вулканизации резиновой смеси, что способствует улучшению ее технологических свойств (в технологической операции изготовления заготовок путем каландрования резиновой смеси перед ее вулканизацией с последующим получением готовых изделий). Однако при содержании полиизобутилена П-30 в количестве 20.0 мас. ч. времена начала и оптимума вулканизации резиновой смеси становятся очень большими, что приводит к увеличению длительности процесса ее вулканизации и повышению энергозатрат на изготовление соответствующих резинотехнических изделий. Аналогичные закономерности (уменьшение максимального и минимального крутящих моментов, а также увеличение времени начала вулканизации) наблюдаются для резиновой смеси, содержащей полиизобутилен П-200. Молекуляр-

ная масса полиизобутилена П-200 выше молекулярной массы полиизобутилена П-30, что приводит к увеличению вязкости, а следовательно и обоих крутящих моментов при переходе от вариантов более вязкой резиновой смеси с П-200 к менее вязким вариантам с П-30, содержащим эти полиизобутилены в одинаковых количествах. Известно [20, 21], что величина ΔM прямо пропорциональна степени химической сшивки вулканизатов. Поэтому вулканизаты, содержащие полиизобутилены П-30 и П-200, должны обладать меньшей степенью сшивки и, как следствие, характеризоваться меньшими прочностными характеристиками по сравнению с вулканизатом, не содержащим полиизобутилены.

В табл. 3 представлены результаты определения физико-механических свойств вулканизатов исследуемых вариантов резиновой смеси, которые подтверждают предположение об ухуд-

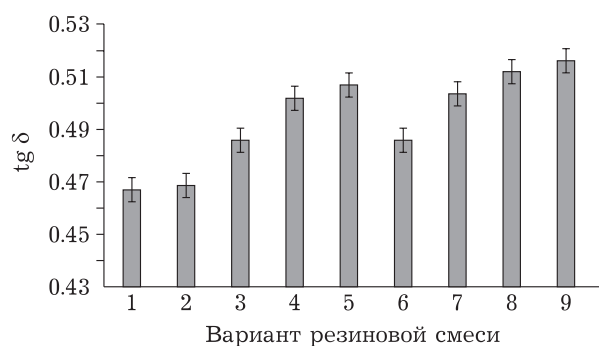


Рис. 1. Зависимость тангенса угла механических потерь ($\text{tg } \delta$) вулканизатов от состава резиновой смеси.

шении этих свойств при уменьшении ДМ с увеличением содержания полиизобутиленов. Этот аспект, вероятно, обусловлен сорбционной способностью полиизобутиленов на наполнителях и экранированием их поверхности от взаимодействия с макромолекулами каучуков, что приводит к потере физико-механических свойств вулканизатов. Следует отметить, что П-30 сорбируется в большей степени, чем П-200, из-за меньшей молекулярной массы и вязкости, а следовательно, вулканизаты с П-30 уступают вулканизатам с П-200 по физико-механическим свойствам. Повышение содержания полиизобутиленов приводит к увеличению относительного удлинения резины при разрыве, что связано с уменьшением вязкости резиновой смеси при увеличении содержания в ее составе полиизобутиленов и повышением подвижности макромолекул каучуков. Следует отметить, что при содержании обоих полиизобутиленов в количестве 20.0 мас. ч. происходит значительное ухудшение физико-механических свойств резины, что является недопустимым для изделий, эксплуатируемых в морской воде.

В дальнейшем нами исследовались изменения физико-механических свойств после суточного и массы вулканизатов после семисуточного воздействия морской воды при комнатной температуре (см. табл. 3). Видно, что вулканизаты, содержащие полиизобутилены П-30 и П-200 до 15.0 мас. ч., характеризуются меньшими изменениями физико-механических показателей и массы после воздействия морской воды в отличие от вулканизатов базового варианта резины, а также вулканизатов, содержащих 20.0 мас. ч. полиизобутиленов. Лучшей стойкостью к морской воде и меньшим изменением массы характеризуются вулканизаты, содержащие полиизобутилен П-200 за счет большей его молекулярной массы и повышенной водостойкости по

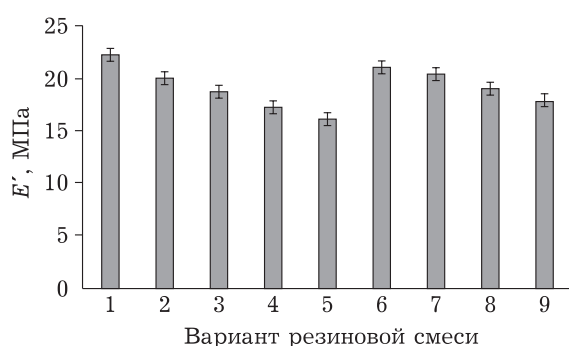


Рис. 2. Зависимость модуля упругости (E') вулканизатов от состава резиновой смеси.

сравнению с полиизобутиленом П-30. При этом изменения твердости после выдержки в морской воде для всех исследованных вулканизатов оказались практически одинаковыми.

Методом динамического механического анализа были определены величины тангенса угла механических потерь и модуля упругости, являющиеся количественной мерой оценки вибродемпфирующих свойств резин [21, 22]. Причем повышенные значения тангенса угла механических потерь указывают на высокие динамические показатели, а пониженные значения модуля упругости – на низкие физико-механические показатели вулканизатов, что и показано на рис. 1 и 2 при возрастании содержания обоих полиизобутиленов в резине. Таким образом, высокими динамическими параметрами, допустимыми физико-механическими показателями и улучшенными эксплуатационными характеристиками обладает вулканизат (вариант 8), содержащий 15.0 мас. ч. полиизобутилена П-200 на 100.0 мас. ч. каучуков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние полиизобутиленов П-30 и П-200 на реометрические, физико-механические, эксплуатационные и динамические показатели резины на основе бутадиен-стирольного ДССК-628В и хлорбутилового ХБК-139 каучуков. Установлено, что увеличение содержания полиизобутиленов от 5.0 до 15.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков приводит к улучшению технологических и возрастанию динамических свойств резины, некоторому допустимому ухудшению ее физико-механических показателей и их изменению после выдержки резины в морской воде. Резина, содержащая 15.0 мас. ч. полиизобутилена П-200, рекомендуется для изго-

товления стойких к воздействию морской воды изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каблов В. Ф. Современные тенденции эволюции рецептов резин // Каучук и резина. 2018. Т. 77, № 5. С. 326–331.
2. Каблов В. Ф. Разработка и исследование полимерных материалов с функционально-активными компонентами // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. 2017. № 3 (198). С. 7–28.
3. Каблов В. Ф., Аксенов В. И. Современные тенденции применения каучуков и наполнителей в рецептуре резин // Пром. пр-во и использование эластомеров. 2018. № 3. С. 24–34.
4. Zhao X., Hu H., Zhang D., Zhang Z., Peng S., Sun Y. Curing behaviors, mechanical properties, dynamic mechanical analysis and morphologies of natural rubber vulcanizates containing reclaimed rubber // e-Polymers. 2019. Vol. 19, No. 1. P. 482–488.
5. Tian F., Chen L., Xu X. Dynamical mechanical properties of wood-high density polyethylene composites filled with recycled rubber // J. Bioresour. Bioprod. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 152–159.
6. Jiang X., Yang Z., Wang Z., Zhang F., You F., Yao C. Preparation and sound absorption properties of a barium titanate/nitrile butadiene rubber–polyurethane foam composite with multilayered structure // Materials. 2018. Vol. 11, No. 4. Art. 474.
7. Jiang X., Wang Z., Yang Z., Zhang F., You F., Yao C. Structural design and sound absorption properties of nitrile butadiene rubber–polyurethane foam composites with stratified structure // Polymers. 2018. Vol. 10, No. 9. Art. 946.
8. Liu C., Fan J., Chen Y. Design of regulable chlorobutyl rubber damping materials with high-damping value for a wide temperature range // Polym. Test. 2019. Vol. 79. Art. 106003.
9. Pöschl M., Vašina M., Zádřapa P., Měřínská D., Žaludek M. Study of carbon black types in SBR rubber: mechanical and vibration damping properties // Materials. 2020. Vol. 13, No. 10. Art. 2394.
10. Ушмарин Н. Ф., Егоров Е. Н., Григорьев В. С., Санда-лов С. И., Кольцов Н. И. Влияние хлорбутилкаучука на динамические свойства резины на основе каучуков общего назначения // Российский хим. журн. 2022. Т. 66, № 1. С. 29–34.
11. Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Исследование влияния *транс*-полинонборнена на свойства резиновой смеси для рельсовых прокладок // Материаловедение. 2021. № 12. С. 11–16.
12. Власов А. Н., Волков-Богородский Д. Б., Карнет Ю. Н., Гамлицкий Ю. А., Мудрук В. И. Оценка механических свойств гиперупругих композитных материалов с малыми добавками минеральных дисперсных наполнителей. Ч. 2. Реализация задачи на ячейке методом конечных элементов // Каучук и резина. 2017. Т. 76, № 1. С. 58–63.
13. Егоров Е. Н., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Влияние базальтовых волокон на физико-механические, эксплуатационные и динамические свойства резины для подрельсовых прокладок // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31, № 4. С. 374–378.
14. Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Исследование эксплуатационных и динамических свойств резины для изделий, работающих в морской воде // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63, № 11. С. 96–102.
15. Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Кольцов Н. И., Ворончихин В. Д. Исследование динамических свойств стойкой к морской воде резины // Журн. Сибирского федер. ун-та. Сер. Химия. 2021. Т. 14, № 1. С. 38–44.
16. Sun Y., Fan C., Wei B., Wesdemiotis C., Jia L. Activated isobutylene-isoprene rubber – synthesis, peroxide cure, and mechanical properties // ACS Appl. Polym. Mater. 2020. Vol. 2, No. 11. P. 5163–5172.
17. Parada C. M., Parker G. L., Storey R. F. Polyisobutylene containing covalently bound antioxidant moieties // J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. 2019. Vol. 57, No. 17. P. 1836–1846.
18. Alves J. B., Vasconcelos M. K., Mangia L. H. R., Tatagiba M., Fidalgo J., Campos D., Invernici P. L., Rebouças M. V., Andrade M. H. S., Pinto J. C. A bibliometric survey on polyisobutylene manufacture // Processes. 2021. Vol. 9, No. 8. Art. 1315.
19. Rozo-Medina M. L., Padovani A. M. Dielectric behavior of sulfonated poly(styrene-isobutylene-styrene) triblock copolymer thin films // J. Appl. Polym. Sci. 2018. Vol. 135, No. 2. Art. 45662.
20. Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Саломатина Е. В., Матюнин А. Н. Влияние полиизобутилена на физико-механические, эксплуатационные, диэлектрические и динамические свойства резины для прокладок рельсовых креплений // Изв. высш. учеб. заведений. Сер.: Химия и хим. технология. 2022. Т. 65, № 5. С. 94–102.
21. Egorov E. N., Salomatina E. V., Vassilyev V. R., Bannov A. G., Sandalov S. I. Effect of polynorbornene on physico-mechanical, dynamic, and dielectric properties of vulcanizates based on isoprene, α -methylstyrene-butadiene, and nitrile-butadiene rubbers for rail fasteners pads // J. Compos. Sci. 2023. Vol. 7, No. 8. Art. 334.
22. Каблов В. Ф., Сагомонова В. А., Сорокин А. Е., Целикин В. В., Гуляев А. И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энцикл. справ. 2020. № 3. С. 2–9.

Поступила в редакцию 24.02.2024

Одобрена после рецензирования 21.04.2024

Принята к публикации 20.05.2024