

УДК 666.193.2

DOI: 10.15372/ChUR2023479

EDN: IBPRQY

## Влияние базальтовых волокон на физико-механические, эксплуатационные и динамические свойства резины для подрельсовых прокладок

Е. Н. ЕГОРОВ<sup>1</sup>, С. И. САНДАЛОВ<sup>2</sup>, Н. И. КОЛЬЦОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова,  
Чебоксары (Россия)

E-mail: koltsovni@mail.ru

<sup>2</sup>Чебоксарское производственное объединение им. В. И. Чапаева,  
Чебоксары (Россия)

(Поступила 19.01.23; после доработки 24.04.23)

### Аннотация

Исследовано влияние базальтовых волокон на реометрические, физико-механические, эксплуатационные и динамические (вибропоглощающие) свойства резины, используемой для подрельсовых прокладок. Резиновая смесь на основе бутадиен-метилстирольного (СКМС-30АРК), изопренового (СКИ-3) и бутадиен-нитрильного (СКН 2655) каучуков включала вулканизирующие агенты (сера, *N,N'*-дитиодиморфолин, тетраметилтиурамдисульфид), ускоритель вулканизации (*N*-циклогексил-2-бензотиазолсульфенамид), активаторы вулканизации (оксид цинка, стеариновая кислота), мягчители (масло индустриальное И-12А, канифоль), противостарители (*N*-фенил-*N'*-изопропил-*para*-фенилендиамин, воск ЗВ-П, ацетонанил Н), наполнители (каолин, технический углерод марок N 220 и П 514, диоксид кремния Zeosil 1165 МР) и другие ингредиенты. Показано, что с возрастанием содержания базальтовых волокон в резиновой смеси наблюдается увеличение прочностных свойств и твердости вулканизатов. Базальтовые волокна уменьшают изменения упруго-прочностных характеристик вулканизатов после суточного термоокислительного старения на воздухе и воздействия стандартной нефтяной жидкости СЖР-1. Улучшенными динамическими (вибродемпфирующими) свойствами обладает вулканизат резиновой смеси, включающий 12.0 мас. ч. базальтовых волокон на 100.0 мас. ч. каучуков.

**Ключевые слова:** базальтовые волокна, бутадиен-метилстирольный, изопреновый и бутадиен-нитрильный каучуки, резина, реометрические, упруго-прочностные, эксплуатационные и динамические свойства

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время железные дороги в процессе эксплуатации создают повышенные уровни шума и вибрации, вызванные взаимодействием подвижного состава [1–7]. Шум, возникающий при работе железнодорожного транспорта, оказывает свое негативное воздействие на здоровье людей [8–14]. Для решения этой проблемы используются резиновые подрельсовые проклад-

ки [15–20]. Эти прокладки изготавливаются с применением ингредиентов направленного действия, позволяющих повысить шумопоглощающие (демпфирующие) свойства резины. Повышение вибродемпфирующих свойств резин достигается путем подбора оптимальной полимерной основы. Модификация каучуков и их комбинация с полимерами другой природы и структуры является одним из перспективных путей создания композиционных материалов с

улучшенными вибродемпфирующими свойствами [21–24], которые улучшаются при введении в состав резины ингредиентов, приводящих к необратимому преобразованию энергии вибрации в теплоту [25, 26]. В работах [27–29] в качестве таких ингредиентов использовались *транс*-полиноборнен [27, 28] и кремнекислотный наполнитель Silica 1165 [29]. В [30, 31] установлено, что введение волокнистых наполнителей в резиновые смеси позволяет повысить прочностные показатели резин, сопротивление порезам и проколам, износостойкость, стойкость к действию агрессивных сред, снизить гистерезисные потери и др. К таким наполнителям относят базальтовые волокна, которые хорошо совместимы с другими материалами [32]. Материалы на основе базальтовых волокон обладают высокой пористостью, которая может достигать более 70 % по объему, что важно для создания шумопоглощающих материалов. В связи с этим цель работы заключалась в изучении влияния базальтовых волокон на физико-механические, эксплуатационные и динамические (вибродемпфирующие) свойства резины для подрельсовых прокладок.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования служила резиновая смесь, полимерная основа которой состояла из комбинации бутадиен-метилстирольного (СКМС-30АРК), изопренового (СКИ-3) и бутадиеннитрильного (СКН 2655) каучуков. Данная резиновая смесь включала вулканизирующие агенты (сера, тетраметилтиурамдисульфид и *N,N'*-дитиодиморфолин), ускоритель вулканизации (*N*-циклогексил-2-бензотиазолсульфенамид), активаторы вулканизации (оксид цинка, стеариновая кислота), противостарители (ацетонанил Н, воск ЗВ-П, *N*-фенил-*N'*-изопропил-парафенилендиамин), наполнители (каолин, технический углерод марок N 220 и П 514, диоксид кремния Zeosil 1165 МР и *транс*-полиноборнен (ТПНБ)), диспергатор (гепсол ХКП), мягчители (канифоль, масло индустриальное И-12А), замедлитель подвулканизации (*N*-нитрозодифениламин). Резиновую смесь готовили на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 при температуре поверхности валков 60–70 °С с циклом смешения 25 мин. Вулканизационные (реометрические) свойства резиновой смеси изучались с помощью реометра MDR 3000 Basic (Montech Werkstoffprufmaschinen GmbH, Германия) при

143 °С в течение 40 мин по ГОСТ 10722-76. Для определения физико-механических показателей резиновую смесь вулканизовали при 143 °С в течение 20 мин в сдвоенном вакуумном вулканизационном прессе типа P-V-100-3RT-2-PCD.

Основные показатели вулканизатов определяли согласно действующим в резиновой промышленности стандартам: упруго-прочностные характеристики (условное напряжение при 100 % растяжении ( $f_{100}$ ), условная прочность при растяжении ( $f_p$ ), относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ ) – в соответствии с ГОСТ 270-75; твердость по Шору А (*H*) – в соответствии с ГОСТ 263-75; сопротивление раздиру (*B*) – в соответствии с ГОСТ 262-93; изменение условной прочности при растяжении ( $\Delta f_p$ ), относительного удлинения при разрыве ( $\Delta \epsilon_p$ ) и твердости после термоокислительного старения на воздухе ( $\Delta H$ ) – по ГОСТ 9.024-74; изменение условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и твердости после воздействия стандартной нефтяной жидкости СЖР-1 – по ГОСТ 9.030-74 (метод В); изменение массы ( $\Delta m$ ) после экспозиции в агрессивных средах (вода, масло индустриальное И-20А, стандартная нефтяная жидкость СЖР-3) – по ГОСТ 9.030-74 (метод А). Динамические характеристики – модуль упругости ( $E'$ ), тангенс угла механических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) вулканизатов – определяли с помощью динамического механического анализатора VHF 104 (Metravib, Франция) при комнатной температуре, степени деформации 0.01 % и частоте 1000 Гц.

С целью улучшения совместимости ТПНБ с эластомерной матрицей была разработана каучукоподобная композиция ТПНБ с маслом индустриальным И-12А (КК) при массовом соотношении 1 : 1.5. В дальнейшем полученную КК вводили в исследуемую резиновую смесь, содержание которой составляло 45.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков. Используемые базальтовые волокна (Mega Invest Industrial, Узбекистан) представляли собой штапель длиной резки 10–12 мм, диаметром элементарного волокна 13–17 мкм, плотностью 2.6 г/см<sup>3</sup>, с модулем упругости 91–110 ГПа и удлинением при разрыве 1.4–3.6 %.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемые варианты резиновой смеси приведены в табл. 1. Вариант 1 резиновой смеси не содержал базальтовых волокон, а в вариан-

ТАБЛИЦА 1

Варианты исследуемой резиновой смеси и их реометрические показатели

Показатель	Вариант резиновой смеси				
	1	2	3	4	5
Содержание базальтовых волокон, мас. ч.	–	3.0	6.0	9.0	12.0
<b>Реометрические показатели при 143 °С</b>					
$S_{\max}$ , дН·м	19.36	19.49	20.09	19.82	20.34
$S_{\min}$ , дН·м	3.57	3.41	3.69	3.76	3.82
$\Delta S$ , дН·м	15.79	16.08	16.40	16.06	16.52
$t_s$ , мин	6.68	6.50	6.33	6.70	6.66
$t_{90}$ , мин	18.06	18.53	17.59	18.09	17.65

*Примечание.*  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  – максимальный и минимальный крутящие моменты соответственно;  $t_s$  и  $t_{90}$  – времена начала и оптимума вулканизации соответственно;  $\Delta S$  – разность максимального и минимального крутящих моментов.

тах смеси 2–5 количество базальтовых волокон варьировалось от 3.0 до 12.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков (при большем содержании базальтовых волокон наблюдалось ухудшение упругодеформационных свойств резины).

На рис. 1 представлены кривые вулканизации различных вариантов резиновой смеси. На основании полученных данных были рассчитаны реометрические показатели резиновой смеси, которые приведены в табл. 1. Как следует из представленных результатов, введение базальтовых волокон в состав резиновой смеси приводит, как правило, к возрастанию максимального и минимального крутящих моментов ( $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  соответственно), а также их разности ( $\Delta S$ ). Показатель  $\Delta S$  прямо пропорционален степени

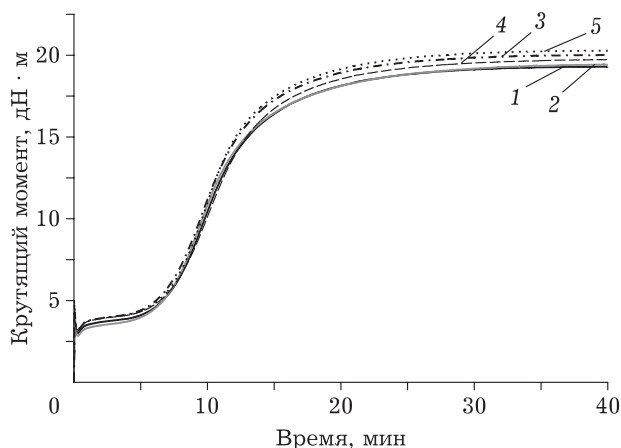


Рис. 1. Кривые вулканизации резиновой смеси. Номера кривых соответствуют номерам вариантов резиновой смеси (см. табл. 1).  $S$  – крутящий момент;  $t$  – время вулканизации.

химической сшивки вулканизата [33]. Следовательно, вулканизат варианта 5 должен обладать наибольшей степенью сшивки, и, как следствие, большими прочностными показателями. При возрастании содержания базальтового волокна в резиновой смеси времена начала ( $t_s$ ) и оптимума ( $t_{90}$ ) вулканизации практически не изменяются.

В табл. 2 представлены рассчитанные физико-механические показатели вулканизатов исследуемой резиновой смеси. Видно, что увеличение содержания базальтовых волокон приводит к возрастанию параметров  $f_{100}$ ,  $f_p$ ,  $H$ ,  $B$  и уменьшению  $\epsilon_p$  резины. Как и следовало ожидать, вулканизат варианта 5, обладающий наибольшей величиной  $\Delta S$ , характеризуется высокими прочностными показателями. Возрастание условной прочности при растяжении и уменьшение относительного удлинения при разрыве вулканизатов с увеличением содержания базальтовых волокон объясняется хорошей совместимостью волокон с эластомерной матрицей [34].

Также проведено исследование эксплуатационных свойств резины – изменения упругопрочностных показателей и твердости вулканизатов после термоокислительного старения на воздухе и воздействия стандартной нефтяной жидкости СЖР-1 (см. табл. 2). Как видно, введение базальтовых волокон в состав резиновой смеси приводит к уменьшению параметров  $\Delta f_p$  и  $\Delta \epsilon_p$ , а также  $\Delta H$ . При этом вулканизат варианта 5, включающий 12.0 мас. ч. базальтовых волокон, характеризуется наименьшими изменениями упругопрочностных показателей и твердости после термостарения на воздухе и в СЖР-1. Данные табл. 2 показывают уменьшение изменения массы образцов вулканизатов после суточного воздействия воды, И-20А и СЖР-3 при возрастании содержания базальтовых волокон.

Результаты исследований динамических (вибропоглощающих) характеристик вулканизатов приведены в табл. 3. Установлено, что введение базальтовых волокон в резиновую смесь приводит к увеличению тангенса угла механических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и уменьшению модуля упругости ( $E'$ ). Наименьшей величиной  $E'$  и наибольшим значением  $\text{tg}\delta$ , а, следовательно, хорошими вибродемпфирующими свойствами характеризуется вулканизат варианта 5, содержащий 12.0 мас. ч. базальтовых волокон на 100.0 мас. ч. каучуков.

ТАБЛИЦА 2

Физико-механические показатели вулканизатов

Показатель	Вариант резиновой смеси				
	1	2	3	4	5
$f_{100}$ , МПа	3.3±0.1	3.4±0.2	3.7±0.2	3.9±0.2	4.1±0.3
$f_p$ , МПа	13.2±0.6	13.8±0.7	14.2±0.8	14.4±0.7	14.7±0.8
$\epsilon_p$ , %	400±16	380±17	360±14	350±13	340±14
$H$ , ед. Шор А	68±1	70±1	71±1	73±1	74±1
$B$ , кН/м	47±2	47±1	49±2	51±2	53±3
<b>Изменение показателей после старения на воздухе при 100 °С в течение 24 ч</b>					
$\Delta f_p$ , %	-29.9±1.5	-27.4±1.4	-25.1±1.2	-23.4±1.2	-21.7±1.1
$\Delta \epsilon_p$ , %	-38.4±1.9	-35.7±1.7	-32.0±1.5	-30.9±1.6	-29.4±1.5
$\Delta H$ , ед. Шор А	7±1	5±1	6±1	5±1	4±1
<b>Изменение показателей после воздействия СЖР-1 при 100 °С в течение 24 ч</b>					
$\Delta f_p$ , %	-36.1±1.8	-34.5±1.7	-32.9±1.7	-31.1±1.6	-30.6±1.5
$\Delta \epsilon_p$ , %	-31.4±1.6	-28.3±1.4	-26.4±1.3	-24.1±1.2	-23.7±1.2
$\Delta H$ , ед. Шор А	-14±1	-13±1	-12±1	-9±1	-7±1
<b>Изменение массы вулканизатов в различных агрессивных средах при 23 °С в течение 24 ч</b>					
$\Delta m(\text{H}_2\text{O})$ , %	0.63±0.02	0.59±0.01	0.48±0.01	0.45±0.01	0.39±0.01
$\Delta m(\text{И-20А})$ , %	6.97±0.21	6.36±0.19	5.98±0.17	4.87±0.14	3.71±0.12
$\Delta m(\text{СЖР-3})$ , %	10.26±0.31	9.17±0.28	8.58±0.25	7.86±0.23	6.17±0.18

Примечание.  $f_{100}$  – условное напряжение при 100 % растяжении;  $f_p$  – условная прочность при растяжении;  $\epsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве;  $H$  – твердость по Шору А;  $B$  – сопротивление раздиру;  $\Delta f_p$ ,  $\Delta \epsilon_p$ ,  $\Delta m$  – относительные изменения условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и массы соответственно;  $\Delta H$  – изменение твердости по Шору А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние базальтовых волокон на вулканизационные характеристики резиновой смеси, физико-механические, эксплуатационные и динамические свойства резины на основе каучуков СКМС-30АРК, СКИ-3 и СКН 2655. Установлено, что при содержании базальтовых волокон в количестве 12.0 мас. ч. на 100.0 мас. ч. каучуков наблюдаются лучшие прочностные и вибропоглощающие показатели и наименьшие изменения упруго-прочностных характеристик вулканизатов после термоокислительного старения на воздухе и в СЖР-1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ďungel J., Zvolenský P., Grenčík J., Leštinský L., Krivda J. Localization of increased noise at operating speed of a passenger wagon // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 2. Art. 453.
- 2 Kaewunruen S., Ishida M., Marich S. Dynamic wheel-rail interaction over rail squat defects // Acoustics Australia. 2015. Vol. 43, No. 1. P. 97–107.
- 3 Tavares de Freitas R., Kaewunruen S. Life cycle cost evaluation of noise and vibration control methods at urban railway turnouts // Environments. 2016. Vol. 3, No. 4. Art. 34.

ТАБЛИЦА 3

Динамические показатели вулканизатов резиновой смеси

Показатель	Вариант резиновой смеси				
	1	2	3	4	5
$E' \cdot 10^{-7}$ , Па	5.27	5.51	4.62	6.09	4.67
$\text{tg}\delta$	0.215	0.217	0.228	0.231	0.243

Примечание.  $E'$  – модуль упругости;  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла механических потерь.

- 4 Barke D. W., Chiu W. K. A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components // Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit. 2005. Vol. 219, No. 3. P. 151–175.
- 5 Kouroussis G., Connolly D. P., Vogiatzis K., Verlinden O. Modelling the environmental effects of railway vibrations from different types of rolling stock: A numerical study // Shock and Vibration. 2015. Vol. 2015. Art. 142807.
- 6 Chiacchiari L., Loprencipe G. Measurement methods and analysis tools for rail irregularities: A case study for urban tram track // Journal of Modern Transportation. 2015. Vol. 23, No. 2. P. 137–147.
- 7 Colaço A., Costa P. A., Connolly D. P. The influence of train properties on railway ground vibrations // Struct. Infrastruct. Eng. 2015. Vol. 12, No. 5. P. 517–534.
- 8 Hao Y., Qi H., Liu S., Nian V., Zhang Z. Study of noise and vibration impacts to buildings due to urban rail transit and mitigation measures // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 5. Art. 3119.

- 9 Mohamed A.-M. O., Paleologos E. K., Howar F. M. Noise pollution and its impact on human health and the environment / Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering. Elsevier, 2021. P. 975–1026.
- 10 Michali M., Emrouznejad A., Dehnokhalaji A., Clegg B. Noise-pollution efficiency analysis of European railways: A network DEA model // Transp. Res. Part D Transp. Environ. 2021. Vol. 98. Art. 102980.
- 11 Sahu P., Galhotra A., Raj U., Ranjan R. V. A study of self-reported health problems of the people living near railway tracks in Raipur city // Journal of Family Medicine and Primary Care. 2020. Vol. 9, No. 2. P. 740–744.
- 12 Panulinova E., Harabinová S., Argalášová L. Tram squealing noise and its impact on human health // Noise Health. 2016. Vol. 18, No. 85. P. 329–337.
- 13 Demir E., Huang Y., Scholts S., Van Woensel T. A selected review on the negative externalities of the freight transportation: Modeling and pricing // Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev. 2015. Vol. 77. P. 95–114.
- 14 Elmenhorst E.-M., Pennig S., Rolny V., Quehl J., Mueller U., Maaß H., Basner M. Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance // Sci. Total Environ. 2012. Vol. 424. P. 48–56.
- 15 Wu B., Chen G., Lv J., Zhu Q., Kang X. Generation mechanism and remedy method of rail corrugation at a sharp curved metro track with Vanguard fasteners // J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control. 2019. Vol. 39, No. 2. P. 1–14.
- 16 Liu L., Zuo Z., Zhou Y., Qin J. Insights into the effect of WJ-7 fastener rubber pad to vehicle-rail-viaduct coupled dynamics // Appl. Sci. 2020. Vol. 10, No. 5. Art. 1889.
- 17 Huang Y., Wang J., Le W., Zhang L., Su J. Study on mechanical behaviours of rail fasteners and effects on seismic performance of urban rail viaduct // Structures. 2021. Vol. 33. P. 3822–3834.
- 18 Liu W., Zhang H., Liu W., Thompson D. J. Experimental study of the treatment measures for rail corrugation on tracks with Egg fasteners in the Beijing metro // Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit. 2017. Vol. 232, No. 5. P. 1360–1374.
- 19 Xu J., Wang K., Liang X., Gao Y., Liu Z., Chen R., Wang P., Xu F., Wei K. Influence of viscoelastic mechanical properties of rail pads on wheel and corrugated rail rolling contact at high speeds // Tribol. Int. 2020. Vol. 151. Art. 106523.
- 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 скреплений // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, № 5. С. 94–102.
- 21 Zhang J., Wang L., Zhao Y. Fabrication of novel hindered phenol/phenol resin/nitrile butadiene rubber hybrids and their long-period damping properties // Polym. Compos. 2012. Vol. 33, No. 12. P. 2125–2133.
- 22 Roche N., Ichchou M. N., Salvia M., Chettah A. Dynamic damping properties of thermoplastic elastomers based on EVA and recycled ground tire rubber // J. Elastomers Plast. 2011. Vol. 43, No. 4. P. 317–340.
- 23 Wang Y., Cao R., Wang M., Liu X., Zhao X., Lu Y., Feng A., Zhang L. Design and synthesis of phenyl silicone rubber with functional epoxy groups through anionic copolymerization and subsequent epoxidation // Polymer. 2020. Vol. 186. Art. 122077.
- 24 Ushmarin N. F., Egorov E. N., Grigor'ev V. S., Sandalov S. I., Kol'tsov N. I. Influence of chlorobutyl caoutchouc on the dynamic properties of a rubber based on general-purpose caoutchoucs // Russ. J. Gen. Chem. 2022. Vol. 92, No. 9. P. 1862–1865.
- 25 Sheng Z., Yang S., Wang J., Lu Y., Tang K., Song S. Preparation and properties analysis of chlorinated butyl rubber (CIIR)/organic diatomite damping composites // Materials. 2018. Vol. 11, No. 11. Art. 2172.
- 26 Zhou X. Q., Yu D. Y., Shao X. Y., Zhang S. Q., Wang S. Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A review // Composite Structures. 2016. Vol. 136. P. 460–480.
- 27 Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Разработка и исследование резиновой смеси для прокладок рельсовых скреплений // Российский химический журнал. 2021. Т. 65, № 1. С. 56–61.
- 28 Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Кол'тсов Н. И. Studying the effect of *trans*-polynorborene on the properties of a rubber mixture for rail fastener pads // Inorg. Mater. Appl. Res. 2022. Vol. 13, No. 4. P. 1019–1023.
- 29 Егоров Е. Н., Ушмарин Н. Ф., Сандалов С. И., Григорьев В. С., Кольцов Н. И., Ворончихин В. Д. Исследование влияния кремнекислотного наполнителя Silica 1165 на свойства резины для прокладок рельсовых скреплений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2022. Т. 15, № 1. С. 110–117.
- 30 Шеголева Н. Е., Гращенко Д. В., Ваганова М. Л., Солнцев С. С. Композиционные материалы, армированные волокнистыми наполнителями // Перспективные материалы. 2014. № 8. С. 22–30.
- 31 Люштык А. Ю., Каюшников С. Н., Ипонова Е. Ю., Чилек М. С., Песецкий С. С., Адерица В. Н., Пашок Ж. С., Усс Е. П. Влияние волокнистых наполнителей на свойства шинных эластомерных композиций // Труды ВГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 95–100.
- 32 Литус А. А., Сеницына И. Н., Артеменко С. Е., Землянский А. А. Шумопоглощающие и звукоизоляционные материалы на основе базальтовых волокон // Пластические массы. 2008. № 1. С. 25–27.
- 33 Макаров В. М., Соловьева О. Ю., Никитина Е. Л. Влияние механохимической обработки ингредиентов на структуру и свойства резиновых смесей и резин на основе 1,4-*цис*-полиизопрена // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2020. Т. 63, № 5. С. 89–93.
- 34 Шадрин Н. В., Нартахова С. И. Структура и свойства бутадиен-нитрильной резины, наполненной углеродными и базальтовыми волокнами // Материаловедение. 2016. № 8. С. 40–44.