УДК 678.046

Е. В. Федулова¹, Ж. С. Шашок², Е. П. Усс²¹ОАО «Белшина»²Белорусский государственный технологический университет**СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
С РАЗЛИЧНЫМИ КАПЛИНГ-АГЕНТАМИ**

Исследованы технологические свойства резиновых смесей на основе комбинации каучуков с кремнекислотным наполнителем и каплинг-агентами. В качестве объектов были использованы эластомерные композиции на основе каучуков марок ДССК-621В и TSR-20. В работе применялся кремнекислотный наполнитель марки LKHD165MP в дозировке 75,0 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. В качестве каплинг-агентов использовали силаны марок Crosile-69, Crosile-75, Crosile-966, Crosile-966 в дозировках 5,36; 6,36 и 7,36 мас. ч. Определено, что каплинг-агенты различного строения и в исследуемых дозировках оказывают незначительное влияние на вязкость по Муни резиновых смесей (изменение вязкости составляет до 4 усл. ед. Муни). Наибольшие значения пластичности смесей при различных дозировках каплинг-агентов установлены для композиций, содержащих органосиланы марок Crosile-75 и Crosile-966. При этом когезионная прочность смесей имеет наибольшие показатели для композиций с силанами марок Crosile-69 и Crosile-75. Характер изменения основных пластоэластических свойств резиновых смесей с каплинг-агентами обусловлен в основном скоростью и полнотой протекания реакции гидрофобизирования поверхности кремнекислотного наполнителя в процессе смешения. Установлено, что природа каплинг-агента оказывает значительное влияние на стойкость к подвулканизации резиновых смесей, причем чем больше фрагментов серы содержится в составе связующего силанового агента, тем быстрее начинается процесс подвулканизации и вулканизации. Выявленный характер изменения стойкости резиновых смесей к подвулканизации может быть обусловлен возможностью каплинг-агента выполнять функцию ускорителя вулканизации или донора серы при повышенной температуре.

Ключевые слова: каплинг-агент, кремнекислотный наполнитель, бутадиен-стирольный каучук, резиновая смесь, вязкость, пластичность.

Для цитирования: Федулова Е. В., Шашок Ж. С., Усс Е. П. Свойства модельных эластомерных композиций с различными каплинг-агентами // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 20–25.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-3.

E. V. Fedulova¹, Zh. S. Shashok², E. P. Uss²¹JSC “Belshina”²Belarusian State Technological University**PROPERTIES OF MODEL ELASTOMER COMPOSITIONS
WITH VARIOUS COUPLING AGENTS**

The technological properties of rubber mixtures based on a combination of rubbers with silica filler and coupling agents were investigated. Elastomeric compositions based on DSSK-621V and TSR-20 rubbers were used as objects of study. In the work, highly dispersed silica filler of the LKHD165MP brand was used in a dosage of 75.0 phr. Silanes of the Crosile-69, Crosile-75, Crosile-966, Crosile-966 brands were used as coupling agents in dosages of 5.36; 6.36 and 7.36 phr. It was determined that coupling agents of different structures and in the studied dosages exerted an insignificant effect on the Mooney viscosity of rubber compounds (the viscosity change was up to 4 conventional Mooney units). The highest values of the plasticity of the compounds at different dosages of coupling agents were established for the compounds containing organosilanes of the Crosile-75 and Crosile-966 grades. At the same time, the cohesive strength of the rubber compounds had the highest values for the compounds with silanes of the Crosile-69 and Crosile-75 grades. The nature of the change in the main plastoelastic properties of the rubber compounds with coupling agents of different structures is mainly determined by the rate and completeness of the hydrophobizing reaction of the silica filler surface during the mixing process. It has been established that the nature of the coupling agent has a significant effect on the resistance to scorch of rubber compounds, and the more sulfur fragments are contained in the composition of the binding silane agent, the faster the process of scorch and vulcanization begins. The revealed nature of the change in the resistance of rubber compounds to scorch may be due to the ability of the coupling agent to perform the function of a vulcanization accelerator or sulfur donor at elevated temperatures.

Keywords: coupling agent, silica filler, styrene-butadiene rubber, rubber compound, viscosity, plasticity.

For citation: Fedulova E. V., Shashok Zh. S., Uss E. P. Properties of model elastomer compositions with various coupling agents. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 20–25 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-3.

Введение. Коллоидный кремнекислотный наполнитель (кремнезем, диоксид кремния) – один из важнейших армирующих наполнителей, используемых в основном при производстве цветных и белых резиновых изделий. По сравнению с техническим углеродом, имеющим аналогичную удельную площадь поверхности, кремнезем обеспечивает меньшую степень усиления, поскольку содержит большое количество силанольных групп (–ОН) на поверхности, что делает его высокополярным и менее совместимым со многими неполярными каучуками, такими как натуральный каучук или бутадиен-стирольный каучук [1, 2].

Кроме того, наличие силанольных групп приводит к слабому взаимодействию между наполнителем и каучуком, что повышает склонность к агломерации наполнителя в эластомерной матрице и, следовательно, ухудшает обработку [3–6]. Указанные проблемы затрудняли использование кремнекислотного наполнителя (ККН) до появления специальных модифицирующих добавок – органических силановых связующих веществ (каплинг-агентов).

Как правило, кремнезем в процессе смешения модифицируется с помощью силанового связующего агента посредством реакции между гидроксильными группами на поверхности наполнителя и гидролизуемыми группами каплинг-агента (обычно при температуре около 150°C), а затем модифицированный кремнезем ковалентно связывается с эластомерной матрицей посредством реакции между органофункциональными группами силанового связующего агента и двойными углерод-углеродными связями каучука в процессе вулканизации [7, 8]. Таким образом, диспергирование кремнекислотного наполнителя и межфазное взаимодействие между наполнителем и каучуком значительно улучшаются [9].

Растущий спрос на энергоэффективные и экологически чистые продукты привел к разработке «зеленых» шин [10]. Замена технического углерода кремнеземом в составе протектора шин, согласно патенту компании Michelin [11], позволяет получить шины с более низким сопротивлением качению и более высоким сцеплением с мокрой дорогой [12].

Основная часть. Цель работы – определить влияние каплинг-агентов различного строения на основные технологические свойства резиновых смесей.

Объектом исследования выступали модельные эластомерные композиции на основе комбинации растворного бутадиен-стирольного каучука марки ДССК-621В и натурального каучука TSR-20 (в соотношении 75 : 25).

ДССК-621В – это продукт сополимеризации бутадиена-1,3 и стирола в растворе в присутствии литийорганических катализаторов, массовая доля связанного стирола – 18–24%, массовая доля 1,2-звеньев – 57–67% [13].

В работе использовался технически специфицированный НК марки TSR-20, который в соответствии с требованиями стандарта на каучук характеризуется строго регламентируемыми значениями содержания и предельного размера загрязнений, показателями химического состава, пластичности (вязкости) и др. [14].

В состав резиновой смеси вводился высокоусиливающий кремнекислотный наполнитель марки LKND165MP с удельной поверхностью по адсорбции цетилтриметиламмоний брамида (ЦТАБ) 160 м²/г в дозировке 75,0 мас. ч.

Каплинг-агентами являлись силаны марок:

Crosile-69 – бис-(3-триэтоксисилилпропил)тетрасульфидсилан;

Crosile-75 – бис-(3-триэтоксисилилпропил)дисульфидсилан;

Crosile-963 – 3-меркаптопропил-ди-(тридекан-1-окси-13-пента(этиленоксид))этоксисилан;

Crosile-966 – 3-октаноил-тио-1-пропил-триэтоксисилан.

Дозировка каплинг-агента составляла 5,36; 6,36 и 7,36 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Выбор дозировки силанового связующего вещества осуществлялся исходя из учета удельной поверхности кремнекислотного наполнителя по ЦТАБ [15] и варьировался в пределах ±1 мас. ч.

Определение вязкости и способности к преждевременной вулканизации резиновых смесей проводилось на вискозиметре MV 2000 в соответствии с ГОСТ Р 54552–2011 [16]. Оценка когезионной прочности резиновых смесей заключалась в растяжении испытываемого образца смеси с постоянной скоростью до разрыва и измерении силы в момент разрыва [17]. Установление пластичности и эластического восстановления проводилось согласно ГОСТ 415–75 [18] с применением пластометра ПСМ-3.

В табл. 1 приведены результаты определения технологических свойств резиновых смесей с различными каплинг-агентами.

Таблица 1

Технологические свойства модельных резиновых смесей с каплинг-агентами

Наименование показателя	Марка каплинг-агента / дозировка каплинг-агента, мас. ч.											
	Crosile-69			Crosile-75			Crosile-963			Crosile-966		
	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36
Вязкость по Муни, усл. ед. Муни	60	59	58	56	56	55	57	56	56	57	56	56
Пластичность	0,28	0,31	0,35	0,36	0,36	0,37	0,29	0,32	0,32	0,36	0,35	0,35
Эластическое восстановление, мм	1,1	1,0	0,8	0,9	0,9	0,9	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
Когезионная прочность, МПа	0,65	0,63	0,63	0,61	0,63	0,63	0,60	0,61	0,61	0,60	0,59	0,60

Результаты исследований выявили, что наибольшими показателями вязкости по Муни характеризуются резиновые смеси, содержащие каплинг-агент марки Crosile-69. В данном случае значения вязкости составляют 58–60 усл. ед. Муни, а для резиновых смесей с другими исследуемыми силанами показатель вязкости находится в пределах 55–57 усл. ед. Муни. Следует отметить, что исследуемые дозировки связующих агентов оказывают незначительное влияние на вязкость по Муни резиновых смесей (изменение вязкости смеси при изменении дозировки каплинг-агента составляет до 2 усл. ед. Муни). Добавление силанового связующего агента снижает взаимодействие наполнитель – наполнитель и усиливает взаимодействие каучук – наполнитель. Это приводит к лучшему диспергированию наполнителя в объеме эластомерной матрицы и снижению вязкости резиновой смеси [3]. Характер изменения показателей вязкости исследуемых композиций может быть обусловлен различиями скорости взаимодействия каплинг-агента с силанольными группами кремнезема и, как следствие, эффективностью снижения полярной составляющей поверхностной энергии наполнителя.

Определение пластичности и эластического восстановления резиновых смесей позволяет прогнозировать их перерабатываемость на технологическом оборудовании [19].

Из представленных данных видно, что наибольшие значения пластичности при различных дозировках каплинг-агентов выявлены для композиций, содержащих органосиланы марок Crosile-75 и Crosile-966 (0,35–0,37). При этом эластическое восстановление, которое определяет усадку смесей и полуфабрикатов [20], для указанных композиций не имеет существенных различий с изменением количественного содержания каплинг-агента в составе резиновой смеси. Так, для смесей с силаном Crosile-75 при всех исследуемых дози-

ровках показатель эластического восстановления составляет 0,9 мм, а для композиций с Crosile-966 – 1,0–1,1 мм. В случае композиции с каплинг-агентом марки Crosile-69 установлено, что с увеличением дозировки указанного компонента пластичность повышается с 0,28 до 0,35, а эластическое восстановление уменьшается с 1,1 мм до 0,8 мм. Схожий характер изменения пластозластических свойств определен и для композиций с силаном Crosile-963: с увеличением содержания силана пластичность повышается с 0,29 до 0,32, а эластическое восстановление снижается с 1,3 до 1,1 мм.

Когезионная прочность, или прочность невулканизированных резиновых смесей, – это прочность при растяжении и/или модуль растяжения невулканизированной резиновой смеси [21]. На основании полученных результатов определения когезионной прочности исследуемых резиновых смесей выявлено, что наибольшие показатели прочности невулканизированной смеси имеют композиции с силанами марок Crosile-69 и Crosile-75. В данном случае значение когезионной прочности находится в пределах 0,61–0,65 МПа. Для композиций с силанами Crosile-966 и Crosile-963 когезионная прочность смесей практически не изменяется с увеличением дозировки каплинг-агента и составляет 0,59–0,61 МПа.

Установленный характер изменения пластозластических свойств и когезионной прочности резиновых смесей может быть обусловлен влиянием природы каплинг-агента и его особенностями взаимодействия с кремнекислотным наполнителем в процессе смешения, что обуславливает уровень взаимодействия частиц наполнителя друг с другом, степень диспергирования кремнезема в эластомерной матрице и величину образования связанного каучука.

В табл. 2 приведены результаты определения характеристик подвулканизации резиновых смесей с различными каплинг-агентами.

Таблица 2

Характеристики подвулканизации модельных резиновых смесей с каплинг-агентами

Наименование показателя	Марка каплинг-агента / дозировка каплинг-агента, мас. ч.											
	Crosile-69			Crosile-75			Crosile-963			Crosile-966		
	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36	5,36	6,36	7,36
t_5 – время до начала подвулканизации при $M_{\text{мин}} + 5$, мин	14	11	10	18	16	16	21	20	19	10	10	9
t_{35} – время до начала вулканизации при $M_{\text{мин}} + 35$, мин	19	15	15	22	21	20	25	24	23	14	12	11
Δt – индекс вулканизации	5	4	5	4	5	4	4	4	4	4	2	2

Из таблицы видно, что на время до начала подвулканизации существенное влияние оказывает природа каплинг-агента. В данном случае наибольшей стойкостью к подвулканизации (t_5 составляет 19–21 мин) характеризуются эластомерные композиции, содержащие в своем составе Crosile-963 – 3-меркаптопропил-ди-(тридекан-1-окси-13-пента (этиленоксид))этоксисилан. Далее по стойкости к подвулканизации следуют резиновые смеси с дисульфидсилианом (Crosile-75) и тетрасульфидсилианом (Crosile-69). Наибольшая склонность к подвулканизации установлена для смесей с Crosile-966 – 3-октаноил-тио-1-пропилтриэтоксисилан. Аналогичный характер выявлен и для показателя t_{35} (время до начала вулканизации). При этом с увеличением дозировки каплинг-агента в составе резиновых смесей их склонность к подвулканизации несколько повышается.

Без силианового связующего агента часть активатора вулканизации (комплекс с оксидом цинка) может взаимодействовать с реакционноспособными силианольными группами наполнителя, поэтому реакция вулканизации несколько замедляется. В присутствии силианового связующего агента поверхность кремнезема менее химически активна, и, таким образом, количество захваченного комплекса с оксидом цинка уменьшается, что приводит к более высокой скорости вулканизации [3]. Помимо этого, бис-(3-триэтоксисилпропил)тетрасульфидсилиан (Crosile-69) может диспропорционировать при высоких температурах процесса, образуя смесь полисульфидов с длиной цепи серы от двух до восьми атомов, в зависимости от времени и температуры реакции. Возникновение такой реакции диспропорционирования во время смешения или последующей переработки приводит к тому, что в ходе вулканизации данный каплинг-агент может действовать как ускоритель или отдавать серу каучуку [22], тем самым уменьшая стойкость к преждевременной вулканизации [23]. На основании полученных данных установлено, что каплинг-агент, содержащий в своем составе меньшее количество фрагментов серы (Crosile-963 и Crosile-75), оказы-

вает менее значительное влияние на склонность резиновых смесей к подвулканизации. В то же время каплинг-агент Crosile-966 при воздействии повышенной температуры более активно вступает в реакцию с компонентами вулканизирующей группы и тем самым ускоряет процесс структурирования и, как следствие, уменьшает стойкость смеси к подвулканизации.

Заключение. Таким образом, определено, что использование каплинг-агентов различного строения и в исследуемых дозировках незначительно влияет на вязкость по Муни резиновых смесей (изменение вязкости составляет до 4 усл. ед. Муни). Установлено, что что наибольшие значения пластичности при различных дозировках каплинг-агентов характерны для композиций, содержащих органосиланы марок Crosile-75 и Crosile-966. При этом для всех резиновых смесей выявлено увеличение пластичности и некоторое снижение эластического восстановления при увеличении дозировки силианового связующего агента. Определение когезионной прочности резиновых смесей выявило, что наибольшие показатели прочности невулканизированной смеси имеют композиции с силианами марок Crosile-69 и Crosile-75. Установленный характер изменения основных пластоэластических свойств резиновых смесей с каплинг-агентами различного строения обусловлен прежде всего полнотой протекания реакции гидрофобизирования поверхности наполнителя в процессе смешения, что способствует уменьшению взаимодействия наполнитель – наполнитель и увеличению взаимодействия наполнитель – полимер. Наиболее существенное влияние природы каплинг-агента установлено на процесс формирования пространственной сетки вулканизата. Определено, что чем больше фрагментов серы содержится в составе силиана, тем быстрее начинается процесс подвулканизации и вулканизации. Такой характер изменения кинетических параметров подвулканизации может быть связан с действием каплинг-агента как ускорителя вулканизации или донора серы, что и уменьшает стойкость смесей к преждевременной вулканизации.

Список литературы

1. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in a conventional vulcanization system / P. Sae-oui [et al.] // *Polymer Testing*. 2004. Vol. 23, no. 8. P. 871–879. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2004.05.008.
2. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.
3. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system / P. Sae-oui [et al.] // *Polymer Testing*. 2005. Vol. 24, no. 4. P. 439–446.
4. Roles of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene / P. Sae-oui [et al.] // *European Polymer Journal*. 2006. Vol. 42, no. 3. P. 479–486.
5. Каблов В. Ф., Аксёнов В. И. Современные тенденции применения каучуков и наполнителей в рецептуре резин // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2018. № 3. С. 24–34. DOI: 10.24411/2071-8268-2018-10305.

6. Силанизация протекторной резиновой смеси легковой шины. Сообщение 2. Кинетические особенности процесса силанизации / В. П. Дорожкин [и др.] // Каучук и резина. 2018. Т. 77, № 3. С. 166–172.
7. Bokobza L. The Reinforcement of Elastomeric Networks by Fillers // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2004. Vol. 289, no. 7. P. 607–621.
8. Novel percolation phenomena and mechanism of strengthening elastomers by nanofillers / Z. H. Wang [et al.] // *Physical Chemistry, Chemical Physics*. 2010. Vol. 12. P. 3014–3030.
9. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent / Q. He [et al.] // *Composites. Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 356–364.
10. Effect of nanosilica surface-capped by bis[3-(triethoxysilyl)propyl] tetrasulfide on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber/butadiene rubber nanocomposites / T. Qingfeng [et al.] // *Composites Communications*. 2018. Vol. 10. P. 190–193.
11. Rubber compound and tires based on such a compound: pat. EP 0501227 / R. Roland. Publ. 02.09.1992.
12. Luginsland H. D., Niedermeier W. New reinforcing materials for rising tire performance demands // *Rubber World*. 2003. Vol. 228, no. 6. P. 34–45.
13. Каталог. Каучуки. Бутадиен-стирольный каучук растворной полимеризации. URL: https://shop.sibur.ru/catalog/kauchuki/butadien_stirolnyy_kauchuk_rastvornoj_polimerizatsii_dssk/kauchuk_butadien_stirolnyy_dssk_621b_1183816 (дата обращения: 15.04.2025).
14. Куперман Ф. Е. Новые каучуки для шин: приоритетные требования: методы оценки. М.: НИИШП, 2005. 329 с.
15. Mihara S. *Reactive Processing of Silica-Reinforced Tire Rubber: New Insight into The Time- And Temperature-Dependence of Silica Rubber Interaction*. Netherlands: University of Twente, Enschede, 2009. 170 p.
16. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. М.: Стандартиформ, 2013. 22 с.
17. Raw rubber or unvulcanized compounds – Determination of green strength: ISO 9026:2007. Geneva: ISO copyright office, 2007. 14 p.
18. Каучуки и резиновые смеси. Метод определения пластоэластических свойств на пластометре: ГОСТ 415–75. М.: Стандартиформ, 2002. 6 с.
19. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
20. Пичугин А. М. Материаловедческие аспекты создания шинных резин: научное издание. М.: Машиностроение, 2008. 383 с.
21. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания. СПб.: HOT, 2010. 620 с.
22. Mechanistic aspects of the role of coupling agents in silica–rubber composites / J. W. Brinke [et al.] // *Composites Science and Technology*. Vol. 63, no. 8. P. 1165–1174.
23. Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art / J. Neethirajan [et al.] // *Functional Composite Materials*. 2022. Vol. 3, art. 7. DOI: 10.1186/s42252-022-00035-7.

References

1. Sae-oui P., Sirisinha Ch., Thepsuwan U., Hatthapanit K. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in a conventional vulcanization system. *Polymer Testing*, 2004, vol. 23, no. 8, pp. 871–879. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2004.05.008.
2. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan, Izdatel'stvo KNITU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).
3. Sae-oui P., Sirisinha Ch., Thepsuwan U., Hatthapanit K. Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system. *Polymer Testing*, 2005, vol. 24, no. 4, pp. 439–446.
4. Sae-oui P., Sirisinha Ch., Thepsuwan U., Hatthapanit K. Roles of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene. *European Polymer Journal*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 479–486.
5. Kablov V. F., Aksenov V. I. Modern trends in the use of rubbers and fillers in rubber formulations. *Promyshlennoye proizvodstvo i ispol'zovaniye elastomerov* [Industrial production and use of elastomers], 2018, no. 3, pp. 24–34. DOI: 10.24411/2071-8268-2018-10305 (In Russian).
6. Dorozhkin V. P., Salaev M. V., Mokhnatkin A. M., Mokhnatkina E. G., Makhotin A. A., Prinada A. L. Silanization of the tread rubber compound of a passenger tire. Message 2. Kinetic features of the silanization process. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2018, vol. 77, no. 3, pp. 166–172 (In Russian).
7. Bokobza L. The Reinforcement of Elastomeric Networks by Fillers. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2004, vol. 289, no. 7, pp. 607–621.

8. Wang Z. H., Liu J., Wu S. Z., Wang W. C., Zhang L. Q. Novel percolation phenomena and mechanism of strengthening elastomers by nanofillers. *Physical Chemistry, Chemical Physics*, 2010, vol. 12, pp. 3014–3030.
9. He Q., Mingyuan Ch., David H., Jun L., Junchi Zh., Weiwei L., Xinxin Zh., Runguo W., Liqun Zh. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent. *Composites, Part B: Engineering*, 2017, vol. 114, pp. 356–364.
10. Qingfeng T., Yuan T., Tao D., Xiaohong Li, Zhijun Zh. Effect of nanosilica surface-capped by bis[3-(triethoxysilyl)propyl] tetrasulfide on the mechanical properties of styrene-butadiene rubber/butadiene rubber nanocomposites. *Composites Communications*, 2018, vol. 10, pp. 190–193.
11. Roland R. Rubber compound and tires based on such a compound. Patent. EP 0501227, 1992.
12. Luginsland H. D., Niedermeier W. New reinforcing materials for rising tire performance demands. *Rubber World*, 2003, vol. 228, no. 6, pp. 34–45.
13. Catalog. Rubbers. Butadiene-styrene rubber of solution polymerization. Available at: https://shop.sibur.ru/catalog/kauchuki/butadien_stirolnyy_kauchuk_rastvornoy_polimerizatsii_dssk/kauchuk_butadien_stirolnyy_dssk_621b_1183816 (accessed 15.04.2025) (In Russian).
14. Kuperman F. E. *Novyye kauchuki dlya shin: prioritetnyye trebovaniya: metody otsenki* [New rubbers for tyres: priority requirements: evaluation methods]. Moscow, NIIShP Publ., 2005. 329 p. (In Russian).
15. Mihara S. Reactive Processing of Silica-Reinforced Tire Rubber: New Insight into The Time- And Temperature-Dependence of Silica Rubber Interaction. Netherlands, University of Twente, Enschede, 2009. 170 p.
16. GOST R 54552–2011. Rubbers and rubber compounds. Determination of viscosity, stress relaxation and scorch characteristics using a Mooney viscometer. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).
17. ISO 9026:2007. Raw rubber or unvulcanized compounds – Determination of green strength. Geneva, ISO copyright office Publ., 2007. 14 p.
18. GOST 415–75. Rubbers and rubber compounds. Method for determining plastoelastic properties on a plastometer. Moscow, Standartinform Publ, 2002. 6 p. (In Russian).
19. Averko-Antonovich I. Yu., Bikmullin R. T. *Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov* [Methods for studying the structure and properties of polymers]. Kazan, KGTU Publ., 2002. 604 p. (In Russian).
20. Pichugin A. M. *Materialovedcheskiye aspekty sozdaniya shinnykh rezin: nauchnoye izdanie* [Materials Science Aspects of Tire Rubber Creation: Scientific Publication]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 383 p. (In Russian).
21. Dik Dzh. S. *Tekhnologiya reziny: retsepturostroyeniye i ispytaniya* [Rubber technology: formulation development and testing]. St. Petersburg, NOT Publ., 2010. 620 p. (In Russian).
22. Brinke J. W., Debnath S. C., Reuvekamp L. A. E. M., Noordermeer J. W. M. Mechanistic aspects of the role of coupling agents in silica–rubber composites. *Composites Science and Technology*, 2003, vol. 63, no. 8, pp. 1165–1174.
23. Neethirajan J., Parathodika A. R., Guo-Hua H., Naskar K. Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art. *Functional Composite Materials*, 2022, vol. 3, art. 7. DOI: 10.1186/s42252-022-00035-7.

Информация об авторах

Федулова Елена Владимировна – ведущий инженер исследовательского сектора центральной заводской лаборатории инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (ул. Минское шоссе, 213824, г. Бобруйск, Республика Беларусь). E-mail: fedulovaev@belshina.by

Шашок Жанна Станиславовна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Усс Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: uss@belstu.by

Information about the authors

Fedulova Elena Vladimirovna – leading engineer of the research sector of the Central Laboratory of Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: fedulovaev@belshina.by

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Uss Elena Petrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uss@belstu.by

Поступила 25.04.2025