

УДК 678.046

А. Ю. Люштык¹, Ж. С. Шашок², Е. П. Усс², О. А. Кротова², А. В. Лешкевич²¹ОАО «Белшина»²Белорусский государственный технологический университет

ВУЛКАНИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С КРЕМНЕКИСЛОТНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Исследованы вулканизационные свойства резиновых смесей на основе растворных бутадиен-стирольных каучуков, содержащих кремнекислотные наполнители. В качестве объектов исследования выступали эластомерные композиции на основе каучука ДССК-2163 и маслонаполненного каучука ДССК-2560-М27. В работе использовались две марки наполнителя Zeosil-1165MP и Zeosil Premium 200MP, различающиеся величиной удельной поверхности по адсорбции. Дозировка минеральных наполнителей составляла 60, 65 и 70 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. В качестве связующего капрлинг-агента применяли силан марки X 50-S. Определено, что увеличение дозировки капрлинг-агента приводит к сокращению времени достижения оптимальной степени вулканизации резиновых смесей на основе ДССК-2163 при различном содержании наполнителя на 3,9–10,9% для композиций с Zeosil-1165MP и на 2,6–9,9% для композиций с Zeosil Premium 200MP, а для смесей на основе ДССК-2560-М27 увеличение содержания связующего агента вызывает сокращение указанного показателя для композиций с Zeosil-1165MP на 2,6–7,1% и с Zeosil Premium 200MP на 2,3–6,5%. Установлено, что с увеличением содержания наполнителя с 60 до 70 мас. ч. оптимум вулканизации повышается на 10,2–35,6% для композиций на основе ДССК-2163 и до 16,8% для композиций на основе ДССК-2560-М27.

Ключевые слова: бутадиен-стирольный каучук, резиновая смесь, кремнекислотный наполнитель, связующий агент, вулканизация.

Для цитирования: Люштык А. Ю., Шашок Ж. С., Усс Е. П., Кротова О. А., Лешкевич А. В. Вулканизационные свойства эластомерных композиций с кремнекислотными наполнителями // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 2 (271). С. 19–25. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-3.

А. Yu. Lyushtyk¹, Zh. S. Shashok², E. P. Uss², O. A. Krotova², A. V. Leshkevich²¹JSC “Belshina”²Belarusian State Technological University

VULCANIZING PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITIONS WITH SILICA FILLERS

The vulcanization properties of rubber compounds based on solution styrene-butadiene rubbers containing silica fillers have been studied. As objects of study, elastomer compositions based on rubber grades DSSK-2163 and oil-filled DSSK-2560-M27 were used. Two types of filler, Zeosil-1165MP and Zeosil Premium 200MP, were used in the work, differing in the specific adsorption surface area. The dosage of mineral fillers was 60, 65 and 70 phr. The silane grade X 50-S was used as a coupling agent. It has been determined that an increase in the dosage of the coupling agent leads to a reduction in optimum cure time of rubber compounds based on DSSK-2163 with different filler content by 3.9–10.9% for compositions with Zeosil-1165MP and by 2.6–9.9% for compositions with Zeosil Premium 200MP, and for compounds based on DSSK-2560-M27, an increase in the content of the coupling agent leads to a reduction in optimum cure time for compositions with Zeosil-1165MP by 2.6–7.1% and with Zeosil Premium 200MP by 2.3–6.5%. It has been established that an increase in the filler content from 60 to 70 phr, the optimum cure time increases by 10.2–35.6% for compositions based on DSSK-2163 and up to 16.8% for compositions based on DSSK-2560-M27.

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

For citation: Lyushtyk A. Yu., Shashok Zh. S., Uss E. P., Krotova O. A., Leshkevich A. V. Vulcanizing properties of elastomer compositions with silica fillers. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 2 (271), pp. 19–25. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-3 (In Russian).

Введение. Применение кремнекислотных наполнителей (ККН) совместно со связующими агентами в составе эластомерных композиций

на основе каучуков общего назначения приводит к изменению основных параметров как получения резиновой смеси, так и дальнейшей ее переработки.

Недостатком кремнезема является наличие большого количества полярных силанольных групп на поверхности, что вызывает сильные взаимодействия между частицами через водородные связи и обуславливает высокую способность этого наполнителя к агломерации в резиновой матрице [1–3]. На долю наиболее реакционно-способных силанольных групп приходится 80% от общего их количества. Концентрация таких групп на поверхности кремнекислотных наполнителей может варьировать в зависимости от технологии производства. Кремнекислотные наполнители содержат в своем составе до 5–7% воды, связанной с поверхностью наполнителя водородными связями. Адсорбционно-связанная вода играет важную роль в формировании поверхностных свойств ККН [3].

Указанные особенности приводят к неудовлетворительному диспергированию кремнезема в каучуке, что увеличивает вязкость резиновой смеси, затрудняет ее переработку и оказывает влияние на процесс вулканизации [4]. Для устранения указанных недостатков в составах эластомерных композиций с кремнекислотным наполнителем обычно применяются серосодержащие силановые связующие агенты (каплинг-агенты), такие как бис(3-триэтиоксисилилпропил)тетрасульфид (TESPT). Силаны, называемые по механизму действия соединяющими или модифицирующими агентами, при механическом смешении каучука с наполнителем при температуре 120–160°C химически взаимодействуют с силанольными группами поверхности частиц кремнекислоты. В результате поверхность покрывается привитыми молекулами модификатора и меняет свои физические свойства: становится более гидрофобной, а взаимодействие между частицами ослабляется. При вулканизации молекулы силана за счет полисульфидных и меркаптогрупп вступают во взаимодействие с вулканизующей группой и, в конечном итоге, с каучуком. В результате в резине резко возрастает доля связанного каучука, что приводит к улучшению комплекса свойств резин [5–9].

Связующие агенты содержат в своем составе фрагменты серы, позволяющие им реагировать с полимером во время вулканизации для усиления резины. Другими функциональными группами, используемыми для связывания каплинг-агентов с полимером, являются двойные связи, которые необходимо активировать добавлением активного соединения серы или путем образования радикальных частиц, чтобы получить одновременное сшивание полимера и связующего агента с сопоставимыми скоростями реакции во время отверждения. Полисульфидные фрагменты силанов нестабильны, следовательно, расщепление

серных групп приводит к образованию активных фрагментов серы. Проблема с TESPT – это соблюдение баланса между его реакционной способностью по отношению к кремнезему, требующей температуры не менее 130°C для получения приемлемой скорости силанизации, и его реакционной способностью по отношению к эластомеру, которая активируется при температуре выше 145°C. Такие температурные ограничения требуют контроля и поддержания температурного режима цикла смешения резиновой смеси без риска ее преждевременной подвулканизации непосредственно в резиносмесителе [10].

Основная часть. Цель работы – определить особенности процесса вулканизации эластомерных композиций в зависимости от дозировки кремнекислотного наполнителя и связующего агента.

Объектом исследования являлись эластомерные композиции на основе растворного бутадиен-стирольного каучука ДССК-2163 и маслонаполненного каучука ДССК-2560-М27. В составе резиновой смеси использовались две марки кремнекислотного наполнителя Zeosil-1165MP и Zeosil Premium 200MP, различающиеся величиной удельной поверхности по адсорбции азота и цетилтриметиламмоний бромиду (ЦТАБ). Дозировка наполнителей составляла 60, 65 и 70 мас. ч.

Связующим агентом являлся силан марки X 50-S, представляющий собой смесь бифункционального серосодержащего органосилана (бис(3-триэтиоксисилилпропил)тетрасульфид, который наиболее известен под торговой маркой Si 69 (TESPT)) и технического углерода типа N330 в соотношении 1 : 1 по массе. Содержание связующего агента варьировалось в диапазоне ± 2 мас. ч. в зависимости от рассчитанной дозировки, учитывающей показатели удельной поверхности по адсорбции ЦТАБ [11].

Определение кинетики вулканизации исследуемых резиновых смесей проводилось на бензиновом реометре MDR 2000 фирмы Alpha Technologies согласно ГОСТ Р 54547–2011 [12] при температурах 143, 153 и 163°C в течение 60 мин.

Наименьшая продолжительность вулканизации, за которую достигаются оптимальные показатели основных физико-механических свойств, называется оптимумом вулканизации или временем достижения оптимальной степени вулканизации [13, 14].

На рис. 1 представлены результаты определения оптимума вулканизации (t_{90}) резиновых смесей на основе растворного бутадиен-стирольного каучука ДССК-2163 в зависимости от марки и содержания кремнекислотного наполнителя и каплинг-агента.

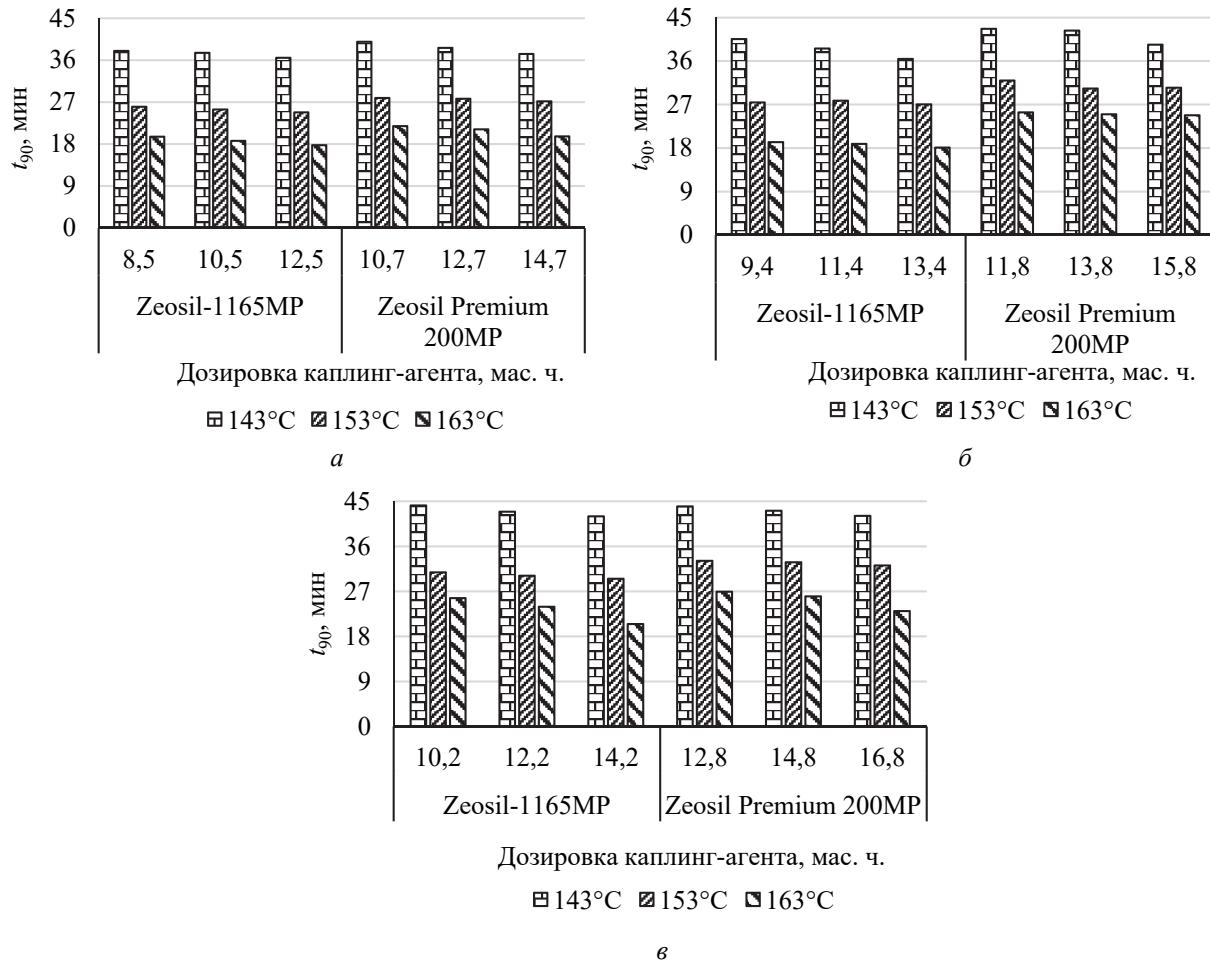


Рис. 1. Оптимальное время вулканизации резиновых смесей на основе ДССК-2163 в зависимости от марки и дозировки кремнекислотного наполнителя и связующего агента:
а – 60 мас. ч.; б – 65 мас. ч.; в – 70 мас. ч.

Из приведенных данных видно, что увеличение дозировки капрлинг-агента приводит к сокращению времени достижения оптимальной степени вулканизации (t_{90}) резиновых смесей при всех исследуемых температурах вулканизации. В данном случае для композиций с Zeosil-1165MP значение указанного показателя уменьшается на 3,9–10,9% при различном содержании наполнителя, а для композиций с Zeosil Premium 200MP – на 2,6–9,9%. Связующий агент TESPT в процессе вулканизации может распадаться по сульфидной связи, что вызывает образование элементарной серы [10]. Увеличение дозировки силана способствует повышению содержания элементарной серы и тем самым обуславливает увеличение крутящего момента после достижения им локального минимума [15], а также рост общей скорости вулканизации резиновой смеси [16].

Следует отметить, что с повышением количественного содержания наполнителя с 60 до 70 мас. ч. в составе эластомерных композиций значение оптимума вулканизации увеличивается на 10,2–16,3% при температуре 143°C, до 18,8% при температуре

153°C и на 23,4–35,6% при температуре 163°C. Выявленный характер изменения времени достижения оптимальной степени вулканизации от дозировки наполнителя может быть обусловлен более существенными адсорбционными процессами между поверхностью кремнезема и компонентами вулканизующей системы [17], при этом наиболее значительное увеличение t_{90} определено для композиций, содержащих кремнекислотный наполнитель марки Zeosil-1165MP.

На рис. 2 представлены результаты определения оптимального времени вулканизации (t_{90}) резиновых смесей на основе растворного бутадиен-стирольного каучука ДССК-2560-М27 в зависимости от марки и содержания кремнекислотного наполнителя и капрлинг-агента.

Определение времени достижения оптимальной степени вулканизации эластомерных композиций на основе ДССК-2560-М27, содержащих наполнитель марки Zeosil-1165MP, показало, что увеличение дозировки капрлинг-агента приводит к сокращению показателя t_{90} на 2,9–7,1%.

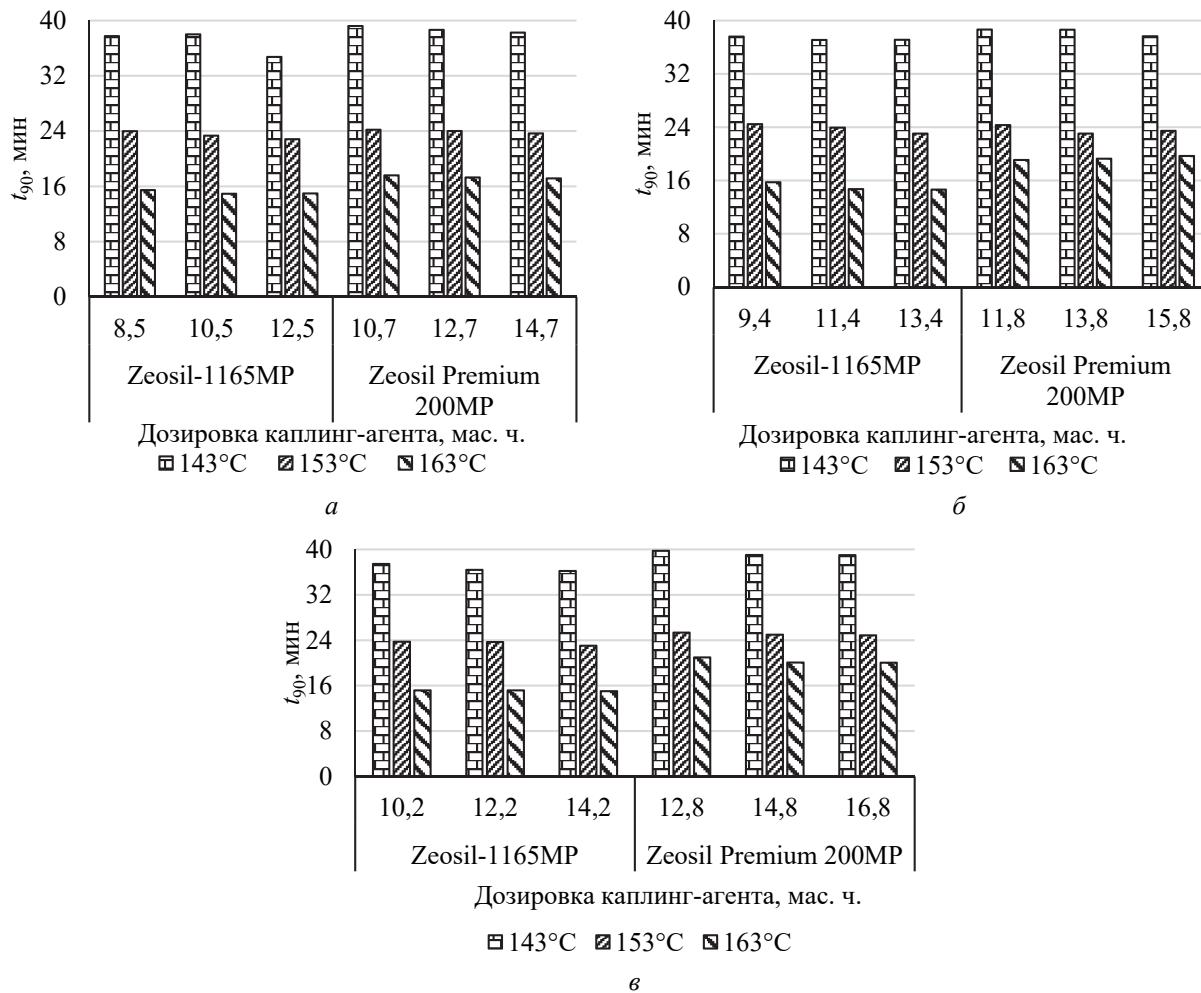


Рис. 2. Оптимальное время вулканизации резиновых смесей на основе ДССК-2560-М27 в зависимости от марки и дозировки кремнекислотного наполнителя и связующего агента:
а – 60 мас. ч.; б – 65 мас. ч.; в – 70 мас. ч.

В случае композиций с более высокодисперсным наполнителем марки Zeosil Premium 200MP увеличение дозировки куплиниг-агента вызывает сокращение оптимума вулканизации при различном содержании кремнезема на 2,3–6,5%.

Повышение содержания кремнекислотного наполнителя марки Zeosil-1165MP в составе резиновых смесей не оказывает существенного влияния на время достижения оптимальной степени вулканизации. В данном случае значение t_{90} при всех исследуемых температурах вулканизации с увеличением дозировки ККН составляет менее 2,0%. В случае композиций, содержащих кремнекислотный наполнитель марки Zeosil Premium 200MP, повышение дозировки кремнезема практически не оказывает влияния на оптимум вулканизации при 143°C (изменение показателя составляет до 2,0%) и увеличивает t_{90} на 4,7–5,1% при 153°C и на 14,2–16,8% при 163°C. Установленный характер изменения кинетических параметров процесса структурирования композиций обусловлен, прежде всего, природой эластомера, а также

взаимодействием поверхности наполнителя с макромолекулами каучука, обусловливающими как равномерность диспергирования ККН в объеме эластомерной матрицы, так и протекание адсорбционных процессов между компонентами эластомерных композиций и поверхностью кремнезема.

Сравнительный анализ результатов определения времени достижения оптимальной степени вулканизации резиновых смесей на основе ДССК-2163 и маслонаполненного каучука ДССК-2560-М27 показал, что использование кремнекислотного наполнителя в эластомерных композициях на основе маслонаполненного каучука приводит к меньшим изменениям времени достижения оптимальных свойств резин. Маслонаполненный каучук представляет собой полимер, заправленный на стадии получения пластификатором [18]. При выпуске маслонаполненных каучуков применяются полимеры с более высокой молекулярной массой, чем при производстве безмасляных каучуков [13]. Структурные особенности

используемых эластомеров, вероятно, определяют особенности формирования пространственной сетки резины и скорость протекания процесса вулканизации.

Заключение. Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что увеличение дозировки каплинг-агента приводит к сокращению времени достижения оптимальной степени вулканизации резиновых смесей на основе ДССК-2163 при различном содержании наполнителя на 3,9–10,9% для композиций с Zeosil-1165MP и на 2,6–9,9% для композиций с Zeosil Premium 200MP, что связано с повышением содержания свободной серы, образующейся из связующего агента, и с усилением взаимодействия наполнителя с каучуком и ускорением формирования вулканизационной структуры. Однако с увеличением количественного содержания наполнителя с 60 до 70 мас. ч. оптимум вулканизации возрастает на 10,2–35,6%, что может быть обусловлено более существенными адсорбционными процессами

между поверхностью наполнителя и компонентами вулканизующей системы.

В композициях на основе ДССК-2560-М27 определено, что при температурах вулканизации 143 и 153°C рост дозировки кремнекислотного наполнителя приводит к увеличению времени достижения оптимальной степени вулканизации на 2,0–5,1%. При температуре вулканизации 163°C выявлен несколько иной характер зависимости времени достижения оптимальных свойств резин от дозировки наполнителя. Повышение дозировки наполнителя Zeosil Premium 200MP вызывает увеличение значения времени оптимума вулканизации на 14,2–16,8%, что связано как с природой полимера, так и с особенностями взаимодействия поверхности наполнителя с каучуком. При этом увеличение содержания связующего агента приводит к сокращению времени достижения оптимальной степени вулканизации для композиций с Zeosil-1165MP на 2,6–7,1% и с Zeosil Premium 200MP на 2,3–6,5%.

Список литературы

1. Sowińska-Baranowska A., Maciejewska M. Influence of the silica specific surface area and ionic liquids on the curing characteristics and performance of styrene-butadiene rubber composites // Materials. 2021. Vol. 14, no. 18. Article 5302. DOI: 10.3390/ma14185302.
2. Noriman N. Z., Ismail H. Properties of styrene butadiene rubber (SBR)/recycled acrylonitrile butadiene rubber (NBR) blends: the effects of carbon black/silica (CB/Sil) hybrid filler and silane coupling agent, Si69 // Journal of Applied Polymer Science. 2012. Vol. 124, no. 1. P. 19–27. DOI: 10.1002/app.34961.
3. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 420 с.
4. Influence of carbon black and silica filler on the rheological and mechanical properties of natural rubber compound / I. M. Ulfah [et al.] // Procedia Chemistry. 2015. Vol. 16. P. 258–264.
5. Song S. H. Study on silica-based rubber composites with epoxidized natural rubber and solution styrene butadiene rubber // Polymers and Polymer Composites. 2021. Vol. 29 (9). P. 1422–1429.
6. Силанизация протекторной резиновой смеси легковой шины. Сообщение 1. Кинетические особенности процесса силанизации / В. П. Дорожкин [и др.] // Каучук и резина. 2018. Т. 77, № 3. С. 158–165.
7. 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.
8. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties / X. Wang [et al.] // e-Polymers. 2021. Vol. 21, no. 1. P. 279–288.
9. Optimization of mixing conditions for silica-reinforced natural rubber tire tread compounds / W. Kaewsakul [et al.] // Rubber Chemistry and Technology. 2012. Vol. 85, no. 2. P. 277–294.
10. White J., De S. K., Naskar K. Rubber technologist's handbook: in 2 vol. United Kingdom: Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, 2009. Vol. 2. 452 p.
11. Mihara S. Reactive processing of silica-reinforced tire rubber: new insight into the time- and temperature-dependence of silica rubber interaction: Abstract of thesis PhD. Netherlands, 2009. 170 p. DOI: 10.3990/1.9789036528399.
12. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров: ГОСТ Р 54547–2011. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
13. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: Ист-терик, 2009. 504 с.
14. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
15. Choi S.-S., Kim I.-S., Chang S. Influence of TESPT content on crosslink types and rheological behaviors of natural rubber compounds reinforced with silica // Journal of Applied Polymer Science. 2007. Vol. 106. P. 2753–2758. DOI: 10.1002/app.25744.
16. Kaewsakul W. Silica – reinforced natural rubber for low rolling resistance energy-saving tires: Dissertation of thesis PhD. Netherlands, 2013. 199 p.

17. The effects of silica/carbon black ratio on the dynamic properties of the tread compounds in truck tires / R. Zafarmehrabian [et al.] // *Journal of Chemistry*. 2012. Vol. 9, no. 3. P. 1102–1112.
18. Каблов В. Ф., Новопольцева О. М., Кракшин М. А. Материалы и создание рецептур резиновых смесей для шинной и резинотехнической промышленности. Волгоград: ВолгГТУ, 2009. 321 с.

References

1. Sowińska-Baranowska A., Maciejewska M. Influence of the silica specific surface area and ionic liquids on the curing characteristics and performance of styrene-butadiene rubber composites. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 18, article 5302. DOI:10.3390/ma14185302.
2. Noriman N. Z., Ismail H. Properties of styrene butadiene rubber (SBR)/recycled acrylonitrile butadiene rubber (NBRr) blends: the effects of carbon black/silica (CB/Sil) hybrid filler and silane coupling agent, Si69. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, vol. 124, no. 1, pp. 19–27. DOI:10.1002/app.34961.
3. 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).
4. Ulfah I. M., Fidyaningsih R., Rahayu S., Fitriani D. A., Saputra D. A., Winarto D. A., Wisojodharso L. A. Influence of carbon black and silica filler on the rheological and mechanical properties of natural rubber compound. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 16, pp. 258–264.
5. Song S. H. Study on silica-based rubber composites with epoxidized natural rubber and solution styrene butadiene rubber. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, vol. 29 (9), pp. 1422–1429.
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 1. Kinetic features of the silanization process. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2018, vol. 77, no. 3, pp. 158–165 (In Russian).
7. 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).
8. Wang X., Wu L., Yu H., Xiao T., Li H., Yang J. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties. *e-Polymers*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 279–288.
9. Kaewsakul W., Sahakaro K., Dierkes W. K., Noordermeer J. W. M. Optimization of mixing conditions for silica-reinforced natural rubber tire tread compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 2012, vol. 85, no. 2, pp. 277–294.
10. White J., De S. K., Naskar K. Rubber technologist's handbook: in 2 vol. United Kingdom, Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, Shropshire Publ., 2009. Vol. 2. 452 p.
11. Mihara S. Reactive processing of silica-reinforced tire rubber: new insight into the time- and temperature-dependence of silica rubber interaction. Abstract of thesis PhD. Netherlands, 2009. 170 p. DOI: 10.3990/1.9789036528399.
12. GOST R 54547–2011. Rubber compounds. Determination of vulcanization characteristics using rotorless rheometers. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. (In Russian).
13. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyaev O. N. *Tekhnologiya elastomerov materialov* [Technology of elastomeric materials]. Moscow, Isterik Publ., 2009. 504 p. (In Russian).
14. 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).
15. Choi S.-S., Kim I.-S., Chang S. Influence of TESPT content on crosslink types and rheological behaviors of natural rubber compounds reinforced with silica. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 106, pp. 2753–2758. DOI: 10.1002/app.25744.
16. Kaewsakul W. Silica – reinforced natural rubber for low rolling resistance energy-saving tires. Dissertation of thesis PhD. Netherlands, 2013. 199 p.
17. Zafarmehrabian R., Gangali S. T., Ghoreishy M. H. R., Davallu M. The effects of silica/carbon black ratio on the dynamic properties of the tread compounds in truck tires. *Journal of Chemistry*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 1102–1112.
18. Kablov V. F., Novopol'tseva O. M., Krakshin M. A. *Materialy i sozdaniye retseptur rezinovyykh smesey dlya shinnoy i rezinotekhnicheskoy promyshlennosti* [Materials and formulation of rubber compounds for the tire and rubber industry]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2009. 321 p. (In Russian).

Информация об авторах

Люштык Андрей Юрьевич – главный химик, начальник лаборатории. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

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

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

Кротова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: o.krotova@belstu.by

Лешкевич Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, ассистент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nastyonke@mail.ru

Information about the authors

Lyushtyk Andrey Yur'yevich – Chief Chemist, Head of the Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), Associate 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

Krotova Olga Aleksandrovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.krotova@belstu.by

Leshkevich Anastasiya Vladimirovna – PhD (Engineering), assistant lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastyonke@mail.ru

Поступила 17.03.2023