

УДК 678.046

**А. В. Лешкевич¹, Ж. С. Шашок¹, Е. П. Усс¹, О. А. Кротова¹,
О. В. Карманова², А. А. Голякевич²**

¹Белорусский государственный технологический университет

²Воронежский государственный университет инженерных технологий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С КОМПЛЕКСНЫМ АКТИВАТОРОМ ВУЛКАНИЗАЦИИ

Исследованы технологические свойства резиновых смесей, содержащих различные активаторы вулканизации. В качестве объектов исследования выступали эластомерные композиции на основе натурального каучука и бутадиен-стирольного каучука, в которых осуществлялась равнозначная замена промышленного активатора вулканизации оксида цинка на новые комплексные активаторы вулканизации. В работе использовались новые комплексные активаторы вулканизации в виде сплава стеариновой кислоты, бентонита и оксида цинка в различных соотношениях минеральных составляющих, полученных при температурах 70, 90 и 110°C. Установлено, что применение исследуемых активаторов вулканизации взамен цинковых белил в составе резиновых смесей на основе НК приводит к снижению (на 10,1–23,3%) показателя вязкости по Муни, улучшению релаксационных процессов (коэффициент релаксации напряжений увеличивается до 1,1 раз), протекающих в объеме эластомерной матрицы, а также снижению (до 1,6 раз при 143°C и до 1,7 раз при 153°C) времени достижения оптимальной степени вулканизации. При установлении влияния комплексных активаторов вулканизации на технологические свойства резиновых смесей на основе СКС-30АРК не выявлено существенных различий в пластоэластических и релаксационных показателях по сравнению с композицией, содержащей ZnO, при этом установлено снижение до 17,5% показателя оптимума вулканизации при 153°C.

Ключевые слова: натуральный каучук, бутадиен-стирольный каучук, резиновая смесь, бентонит, оксид цинка, вязкость по Муни, релаксация напряжений, кинетика вулканизации.

Для цитирования: Лешкевич А. В., Шашок Ж. С., Усс Е. П., Кротова О. А., Карманова О. В., Голякевич А. А. Технологические свойства эластомерных композиций с комплексным активатором вулканизации // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 1 (277). С. 61–67.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-8.

**A. V. Leshkevich¹, Zh. S. Shashok¹, E. P. Uss¹, O. A. Krotova¹,
O. V. Karmanova², A. A. Golyakevich²**

¹Belarusian State Technological University

²Voronezh State University of Engineering Technologies

TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITIONS WITH COMPLEX VULCANIZATION ACTIVATOR

The technological properties of rubber mixtures containing various vulcanization activators have been studied. The objects of research were elastomeric compositions based on natural rubber and styrene-butadiene rubber, in which the industrial vulcanization activator zinc oxide was equivalently replaced with new complex vulcanization activators. The work used new complex vulcanization activators in the form of an alloy of of stearic acid, bentonite and zinc oxide in various ratios of minerals, obtained at temperatures of 70, 90 and 110°C. It has been established that the use of the studied vulcanization activators instead of zinc white in the composition of rubber compounds based on NR leads to a decrease (by 10.1–23.3%) in the Mooney viscosity index, an improvement in relaxation processes (the stress relaxation coefficient increases to 1.1 times) occurring in the volume of the elastomeric matrix, as well as a decrease (up to 1.6 times at 143°C and up to 1.7 times at 153°C) in the time to achieve the optimal degree of vulcanization. When establishing the influence of complex vulcanization activators on the technological properties of rubber compounds based on SBR, no significant differences were revealed in plastoelastic and relaxation indicators compared to a composition containing ZnO, while a decrease to 17.5% in the optimum vulcanization index was established when 153°C.

Keywords: natural rubber, styrene-butadiene rubber, rubber compound, bentonite, zinc oxide, Mooney viscosity, stress relaxation, vulcanization kinetics.

For citation: Leshkevich A. V., Shashok Zh. S., Uss E. P., Krotova O. A., Leshkevich A. V., Karmanova O. V., Golyakevich A. A. Technological properties of elastomer compositions with complex

vulcanization activator. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 1 (277), pp. 61–67 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-8.

Введение. В настоящее время прослеживается отчетливая тенденция увеличения загрязнения окружающей среды вследствие интенсивной техногенной деятельности человека. Особенно опасными являются продукты химической и нефтехимической промышленности, в том числе органические ускорители серной вулканизации каучуков, которые подвергаются фотохимическим превращениям с образованием нитрозоаминов, являющихся сильными канцерогенными веществами, выделяющимися в воздушную и водную среды после сублимации в процессах хранения ускорителей на складах и после миграции из резин при эксплуатации, обслуживании, ремонте и хранении изделий [1]. Частицы, образующиеся при истирании шины, состоят примерно на 61% из каучука, 29% – из технического углерода и на 10% – из химикатов и технологических добавок. Эти частицы являются существенным источником канцерогенных веществ различных классов [2]. В борьбе с загрязнением окружающей среды особая роль отводится снижению накопления тяжелых металлов, одним из которых является цинк. Несмотря на то, что цинк – важный биоэлемент, его поступление в организм в повышенных количествах вызывает нарушения функционального состояния отдельных органов и систем.

С апреля 2004 г. Европейский союз объявил оксид цинка (ZnO) опасным для окружающей среды. С экологической точки зрения содержание ZnO в изделиях должно быть настолько низким, насколько это возможно [3].

Несмотря на то, что оксид цинка признан лучшим активатором вулканизации, сейчас возникает все больше беспокойств по его влиянию на окружающую среду и организм человека. Это связано с тем, что в процессе производства, в течение использования резиновых изделий (в том числе шин), в процессе утилизации, например через выщелачивание в участках закапывания мусора происходит выброс оксида цинка в окружающую среду. Еще не найдено вещество, способное полностью заменить собой оксид цинка, при этом не уступающее ему по функциональным свойствам [4].

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по применению соединений различных классов в качестве вулканизирующих систем и механизму их действия, выявлен ряд общих закономерностей, связывающих особенности вулканизационных структур с физико-механическими свойствами резин [5–10]. Однако недостаточно полно освещены вопросы

создания и использования в эластомерных композициях активаторов вулканизации со сниженным содержанием оксида цинка, улучшающих экологические параметры, а также технологические и технические свойства эластомерных композиций на их основе.

Основная часть. Цель работы – установить влияние новых комплексных активаторов вулканизации с пониженным содержанием оксида цинка на технологические свойства эластомерных композиций.

В качестве объектов исследования применялись резиновые смеси, содержащие различные по составу и свойствам комплексные активаторы вулканизации в виде сплава стеариновой кислоты, бентонита и оксида цинка, полученного при разных температурах $T_{\text{компл}}$ в соотношениях:

– при $T_{\text{компл}} = 70^\circ\text{C}$: 80 : 20; 60 : 40; 40 : 60 и 20 : 80;

– при $T_{\text{компл}} = 90^\circ\text{C}$: 70 : 30; 50 : 50 и 30 : 70;

– при $T_{\text{компл}} = 110^\circ\text{C}$: 80 : 20; 60 : 40; 40 : 60 и 20 : 80.

При этом содержание стеариновой кислоты при синтезе всех опытных активаторов было постоянным.

Исследования осуществлялись с использованием модельных рецептов (табл. 1) на основе натурального каучука НК и бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК.

Таблица 1

Рецептуры исследуемых резиновых смесей

| Наименование ингредиентов | Резиновая смесь на основе / содержание ингредиентов, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука | |
|---------------------------|---|-----------|
| | НК | СКС-30АРК |
| НК | 100,00 | – |
| СКС-30АРК | – | 100,00 |
| Сера | 2,25 | 1,75 |
| Акселератор TBBS | 0,70 | 1,00 |
| Оксид цинка | 5,00 | 3,00 |
| Стеариновая кислота | 2,00 | 1,00 |

В опытных резиновых смесях осуществлялась равнозначная замена оксида цинка на исследуемые активаторы вулканизации.

Определение вязкостных и релаксационных показателей резиновых смесей проводилось на роторном вискозиметре MV 2000 по ГОСТ Р 54552–2011 [11]. Исследование кинетических параметров процесса вулканизации эластомерных композиций осуществлялось по кривым, полученных

на виброреометре ODR2000 в соответствии с ГОСТ 12535–84 [12] при температурах 143 и 153°С в течение 60 и 45 мин в случае СКС-30АРК и в течение 45 и 30 мин для НК соответственно.

Одним из важнейших методов оценки технологических свойств резиновых смесей является определение их вязкости по Муни [13]. Вязкость резиновых смесей служит мерой усилия, которое необходимо приложить к материалу для осуществления течения его с заданной скоростью на той или иной стадии процесса [14–15]. В табл. 2 представлены результаты исследования вязкости по Муни анализируемых эластомерных композиций.

Таблица 2

Вязкость по Муни анализируемых эластомерных композиций

| Наименование активатора вулканизации | Соотношение компонентов в сплаве, % | Резиновая смесь на основе / Вязкость по Муни, усл. ед. Муни | |
|--|-------------------------------------|---|-----------|
| | | НК | СКС-30АРК |
| Оксид цинка | | 22,7 | 45,1 |
| $T_{\text{компл}} = 70^{\circ}\text{C}$ | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | 17,4 | 43,1 |
| | 60 : 40 | 17,8 | 42,5 |
| | 40 : 60 | 18,3 | 43,6 |
| | 20 : 80 | 19,6 | 43,5 |
| $T_{\text{компл}} = 90^{\circ}\text{C}$ | | | |
| Бентонит : ZnO | 70 : 30 | 18,2 | 44,1 |
| | 50 : 50 | 19,5 | 43,7 |
| | 30 : 70 | 20,4 | 44,2 |
| $T_{\text{компл}} = 110^{\circ}\text{C}$ | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | 18,7 | 42,9 |
| | 60 : 40 | 19,1 | 44,0 |
| | 40 : 60 | 20,0 | 44,0 |
| | 20 : 80 | 20,3 | 44,4 |

Из представленных данных видно, что замена широко применяемого в промышленности оксида цинка на исследуемые компоненты приводит к снижению показателя вязкости по Муни резиновых смесей на основе натурального каучука. Так, для смеси, содержащей только ZnO, данный показатель равен 22,7 усл. ед. Муни, а для композиций со всеми исследуемыми активаторами вулканизации значение вязкости находится в пределах 17,4–20,4 усл. ед. Муни. Следует отметить, что увеличение содержания оксида цинка в исследуемых активаторах вулканизации приводит к увеличению показателя вязкости по Муни резиновых смесей. Так, значение данного показателя для композиции с Бентонит : ZnO ($T_{\text{компл}} = 70^{\circ}\text{C}$) в соотношении 80 : 20, составляет 17,4 усл. ед. Муни, а для смеси с Бентонит : ZnO ($T_{\text{компл}} = 70^{\circ}\text{C}$) в соотношении 20 : 80 – 19,6 усл. ед. Муни. Аналогичная зависимость выявлена и для других компонентов, полученных при температуре 90 и 110°С.

Сравнительный анализ полученных данных показал, что при введении в эластомерные композиции на основе СКС-30АРК исследуемых активаторов вулканизации наблюдается незначительное (до 5,8%) снижение вязкости по Муни резиновых смесей. Композиция, содержащая в своем составе оксид цинка, имеет значение показателя вязкости по Муни – 45,1 усл. ед. Муни, а для всех исследуемых композиций значение данного показателя находится в пределах от 42,5 до 44,4 усл. ед. Муни.

Таким образом, установлено, что введение комплексных активаторов вулканизации в эластомерные композиции на основе НК приводит к снижению показателя вязкости по Муни резиновых смесей (на 10,1–23,3%). В то же время применение новых активаторов с пониженной дозировкой оксида цинка в эластомерных композициях на основе СКС-30АРК в меньшей степени оказывает влияние на вязкость по Муни резиновых смесей по сравнению с композициями на основе НК, что может быть обусловлено различиями в структуре каучуков.

Специфику переработки каучуков и резиновых смесей определяют их вязкоупругие свойства, проявляющиеся в развитии высокоэластических деформаций, нарастающих до максимума и реализующих структурную релаксацию напряжений [16]. Показатели релаксации напряжений исследуемых эластомерных композиций приведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели релаксации напряжений исследуемых резиновых смесей

| Наименование активатора вулканизации | Соотношение компонентов в сплаве, % | Резиновая смесь на основе / Показатели релаксации резиновых смесей | | | |
|--|-------------------------------------|--|-----------|--------------------|-----------|
| | | НК | | СКС-30АРК | |
| | | $\text{tg}\alpha'$ | $K_p, \%$ | $\text{tg}\alpha'$ | $K_p, \%$ |
| Оксид цинка | | -0,739 | 62,5 | -0,533 | 53,2 |
| $T_{\text{компл}} = 70^{\circ}\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | -0,863 | 65,8 | -0,540 | 54,8 |
| | 60 : 40 | -0,814 | 67,2 | -0,565 | 53,4 |
| | 40 : 60 | -0,789 | 66,9 | -0,516 | 53,9 |
| | 20 : 80 | -0,765 | 67,4 | -0,538 | 54,1 |
| $T_{\text{компл}} = 90^{\circ}\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 70 : 30 | -0,999 | 64,8 | -0,527 | 53,7 |
| | 50 : 50 | -0,844 | 70,3 | -0,532 | 53,1 |
| | 30 : 70 | -0,767 | 65,7 | -0,525 | 53,2 |
| $T_{\text{компл}} = 110^{\circ}\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | -0,923 | 68,4 | -0,552 | 54,1 |
| | 60 : 40 | -0,906 | 62,8 | -0,540 | 53,0 |
| | 40 : 60 | -0,754 | 68,0 | -0,510 | 53,9 |
| | 20 : 80 | -0,744 | 70,9 | -0,514 | 53,2 |

Примечание. $\text{tg}\alpha'$ – тангенс угла наклона касательной к графику релаксации через 1 с после остановки ротора; K_p – коэффициент релаксации напряжений.

Из таблицы видно, что замена оксида цинка на опытные цинкосодержащие активаторы вулканизации увеличивает скорость релаксации в резиновых смесях на основе НК. В данном случае значение тангенса угла наклона касательной для эластомерной композиции с ZnO равен $-0,739$, коэффициент релаксации составляет 62,5%, а для смесей, содержащих исследуемые активаторы вулканизации, значение K_p находится в пределах 62,8–70,9%, а максимальное значение $tg\alpha'$, равное $-0,999$, выявлено для композиции, содержащей бентонит : ZnO ($T_{\text{компл}} = 90^\circ\text{C}$) в соотношении 70 : 30. Следует отметить, что увеличение содержания оксида цинка в исследуемых активаторах вулканизации в составе резиновых смесей приводит к снижению скорости релаксации напряжений в объеме эластомерной матрицы, о чем свидетельствуют значения тангенса угла наклона касательной к графику релаксации.

Результаты исследований показали, что введение комплексных активаторов вулканизации в резиновые смеси на основе СКС-30АРК не оказывает значительного влияния на релаксационные процессы, протекающие в объеме эластомерной матрицы. Так, значения показателей K_p и $tg\alpha'$ для смеси с оксидом цинка составляют 53,2% и $-0,533$, в то время как для композиций с исследуемыми активаторами значения данных величин находятся в пределах 53,0–54,8% и от $-0,510$ до $-0,565$ соответственно. Такой характер свойств, вероятно, связан со структурой каучука, что может обуславливать нивелирование действия цинкосодержащих компонентов в объеме полимера. В данном случае наличие объемного заместителя в структуре бутадиен-стирольного каучука может являться определяющим фактором, влияющим на релаксационные процессы, протекающие в объеме эластомерных композиций [17, 18].

Вулканизация является завершающим процессом производства резиновых изделий, во многом определяющим их поведение при эксплуатации [14]. Уже при изготовлении смесей сера, ускорители и жирные кислоты сорбируются на поверхности дисперсных частиц оксида цинка и в результате взаимодействия их друг с другом возникают, с одной стороны, действительные агенты вулканизации, а с другой – соли жирных кислот, которые являются поверхностно-активными веществами для исследуемой системы. Определение кинетических параметров вулканизации позволяет оценить влияние различных ингредиентов на изменение свойств эластомерных композиций в процессе формирования пространственной сетки вулканизата. Оптимум вулканизации, или оптимальное время вулканизации (t_{90}), – это наименьшая продолжительность вулканизации, за которую

достигаются оптимальные показатели основных физико-механических свойств [19, 20].

В табл. 4 представлены результаты определения оптимума вулканизации резиновых смесей на основе натурального каучука НК и бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК в зависимости от температуры получения активатора вулканизации и соотношения в нем бентонита и ZnO.

Таблица 4

Оптимальное время вулканизации исследуемых резиновых смесей

| Наименование активатора вулканизации | Соотношение компонентов в сплаве, % | Резиновая смесь на основе / Оптимальное время вулканизации, мин | | | |
|--|-------------------------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | НК | | СКС-30АРК | |
| | | 143°C× ×45 мин | 153°C× ×30 мин | 143°C× ×60 мин | 153°C× ×45 мин |
| Оксид цинка | | 17,6 | 10,3 | 54,6 | 37,1 |
| $T_{\text{компл}} = 70^\circ\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | 10,7 | 6,2 | 52,4 | 31,1 |
| | 60 : 40 | 15,2 | 8,5 | 52,6 | 32,2 |
| | 40 : 60 | 18,2 | 10,5 | 53,9 | 35,3 |
| | 20 : 80 | 20,1 | 11,3 | 54,0 | 36,4 |
| $T_{\text{компл}} = 90^\circ\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 70 : 30 | 14,3 | 7,6 | 52,4 | 33,4 |
| | 50 : 50 | 18,4 | 10,1 | 54,1 | 35,2 |
| | 30 : 70 | 19,1 | 10,8 | 55,4 | 36,2 |
| $T_{\text{компл}} = 110^\circ\text{C}$ | | | | | |
| Бентонит : ZnO | 80 : 20 | 14,9 | 9,2 | 52,8 | 30,6 |
| | 60 : 40 | 18,0 | 10,6 | 55,6 | 34,8 |
| | 40 : 60 | 19,1 | 11,4 | 54,7 | 34,6 |
| | 20 : 80 | 19,2 | 10,9 | 54,6 | 36,0 |

Установлено, что наиболее существенное влияние на время достижения оптимальной степени вулканизации оказывает введение в эластомерные композиции на основе НК активаторов вулканизации с наибольшим содержанием бентонита. Так, значение оптимума вулканизации для резиновой смеси, содержащей оксид цинка, составляет 17,6 мин (при 143°C×45 мин) и 10,3 мин (при 153°C×30 мин), в то время как для композиции с бентонит : ZnO = 80 : 20 ($T_{\text{компл}} = 70^\circ\text{C}$) – 10,7 и 6,2 мин соответственно. Следует отметить, что увеличение содержания цинковых белил в составе комплексных активаторов вулканизации приводит к увеличению показателя t_{90} . В данном случае снижение оптимума вулканизации для смеси, содержащей бентонит : ZnO = 70 : 30 ($T_{\text{компл}} = 90^\circ\text{C}$), по сравнению с композицией, содержащей бентонит : ZnO = 30 : 70 ($T_{\text{компл}} = 90^\circ\text{C}$), составляет до 1,3 раза (при 143°C×45 мин) и до 1,4 раза (при 153°C×30 мин). Активирующее и замедляющее действие исследуемых активаторов вулканизации

может быть связано с механизмом взаимодействия компонентов, входящих в состав добавок, с вулканизирующим агентом и ускорителем вулканизации на различных стадиях вулканизации.

Анализ результатов определения кинетических параметров процесса вулканизации при 143°C показал, что применение исследуемых активаторов вулканизации, полученных при различных температурах, в эластомерных композициях на основе СКС-30АРК приводит к получению резиновых смесей с практически равноценными значениями оптимума вулканизации по сравнению со смесью с цинковыми белилами. Так, значение времени достижения оптимальной степени вулканизации для композиций с исследуемыми добавками находится в пределах от 52,4 до 55,6 мин, а для резиновой смеси с ZnO оптимум составляет 54,6 мин. При определении кинетических параметров вулканизации при 153°C выявлено, что введение всех исследуемых компонентов, полученных при различных температурах, приводит к снижению оптимума на 2,4–17,5%, причем наибольшее влияние оказывает добавка бентонит : ZnO = 80 : 20, полученная при температуре 110°C. Так, значение показателя t_{90} для композиции с ZnO составляет 37,1 мин, а для смеси с бентонит : ZnO = 80 : 20 ($T_{\text{компл}} = 110^\circ\text{C}$), – 30,6 мин. Такой характер влияния компонентов на кинетические параметры вулканизации обусловлен составом вулканизирующей группы и структурными особенностями используемых эластомеров.

Заключение. Установлены зависимости изменения технологических свойств эластомерных композиций на основе каучуков общего назначения от температуры получения и соотношения исходных компонентов в исследуемых добавках. Выявлено, что замена экологически небезопасного оксида цинка на комплексные активаторы вулканизации в эластомерных композициях на основе НК оказывает влияние на их пластоэластические (уменьшение вязкости по Муни резиновых смесей на основе до 23,3%), релаксационные (коэффициент релаксации эластомерных композиций увеличивается до 1,1 раза) свойства, а также на параметры процесса вулканизации (сокращение времени достижения оптимальной степени вулканизации до 1,6 раза при температуре 143°C и до 1,7 раза при 153°C). В результате исследований эластомерных композиций на основе СКС-30АРК не было выявлено значительных изменений пластоэластических и релаксационных свойств при замене цинковых белил на цинксодержащие комплексные активаторы вулканизации. При этом выявлено снижение (до 17,5%) времени достижения оптимальной степени вулканизации резиновых смесей при 153°C.

Работа проводилась в рамках выполнения совместного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере для молодых ученых «БРФФИ–ФСРПМ–2022» Т22РПМ-005.

Список литературы

1. Костюковский Я. Л., Меламед Д. Б. Канцерогенные N-нитрозамины. Образование, свойства, анализ // Успехи химии. 1988. Т. 57, № 4. С. 625–655. DOI: 10.1070/RC1988v057n04ABEH003355.
2. Источники канцерогенных и токсичных веществ при производстве и эксплуатации шин / В. Г. Фроликова [и др.] // Мир шин. 2008. Т. 52, № 9. С. 40–49.
3. Chapman A. V., Johnson T. The role of zinc in the vulcanization of styrene-butadiene rubbers // Kautschuk. Gummi. Kunststoffe. 2005. Vol. 58. P. 358–361.
4. Астахова Е. А. Новые вулканизирующие системы для композиций на основе бутадиен-нитрильных каучуков: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 05.17.06. Москва, 2013. 24 с.
5. Charoeythornkhajhornchai P., Samthong C., Somwangthanaroj A. Influence of sulfenamide accelerators on cure kinetics and properties of natural rubber foam // Journal of Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134, no. 19. DOI: 10.1002/app.44822.
6. Maciejewska M., Sowińska A., Kucharska J. Organic zinc salts as pro-ecological activators for sulfur vulcanization of styrene-butadiene rubber // Polymers. 2019. Vol. 11, no. 10. DOI: 10.3390/polym11101723.
7. Development of passenger tire treads: reduction in zinc content and utilization of a bio-based lubricant / S. Moresco [et al.] // Journal of cleaner production. 2016. Vol. 117. P. 199–206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.013.
8. Carbonized elastomer based composites filled with carbon fillers and silicon carbide / A. A. Stepashkin [et al.] // Materials Letters. 2018. Vol. 215. P. 288–291. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.132.
9. Potential use of a novel composite zinc oxide as eco-friendly activator in Tire tread compound / P. Thapong [et al.] // Journal of Polymer Research. 2019. Vol. 26, no. 9. P. 226. DOI: 10.1007/s10965-019-1895-1.
10. Создание активирующих систем для эффективной вулканизации эластомеров / О. В. Карманова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3 (61). С. 126–129.
11. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.

12. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулкаметре: ГОСТ 12535–84. М.: Стандартиформ, 1985. 33 с.

13. Кузьминский А. С., Кавун С. М., Кирпичев В. П. Физико-химические основы получения, переработки и применения эластомеров. М.: Химия, 1976. 368 с.

14. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. М.: Санкт-ТМ, 2001. 400 с.

15. Щербина Е. И., Долинская Р. М. Структура и свойства резин. Минск: БГТУ, 2004. 135 с.

16. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.

17. Свойства модельных резиновых смесей с различными активаторами вулканизации / С. Н. Каюшников [и др.] // Труды БГТУ. 2014. № 4 (168): Химия, технология органических веществ и биотехнология. С. 35–39.

18. Каюшников С. Н., Прокопчук Н. Р., Усс Е. П. Влияние цинкосодержащих добавок на технологические свойства эластомерных композиций // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов: сб. науч. тр. 27 Междунар. симпозиум, Москва, 10–14 октября 2016 г. М., 2016. С. 224–231.

19. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: Истерик, 2009. 504 с.

20. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 420 с.

References

1. Kostyukovskiy Ya. L., Melamed D. B. Carcinogenic N-nitrosamines. Formation, properties, analysis. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 1988, vol. 57, no. 4, pp. 625–655. DOI: 10.1070/RC1988v057n04ABEH003355 (In Russian).

2. Frolikova V. G., Donskaya M. M., Yalovaya L. I., Pichugin A. M., Vishnyakov I. I. Sources of carcinogenic and toxic substances during the production and operation of tires. *Mir shin* [World of tires], 2008, vol. 52, no. 9, pp. 40–49 (In Russian).

3. Chapman A. V., Johnson T. The role of zinc in the vulcanization of styrene-butadiene rubbers. *Kautschuk. Gummi. Kunststoffe*, 2005, vol. 58, pp. 358–361.

4. Astakhova Ye. A. *Novyye vulkanizuyushchiye sistemy dlya kompozitsiy na osnove butadiyen-nitril'nykh kauchukov. Avtoreferat dissertatsii kandidata khimicheskikh nauk* [New vulcanizing systems for compositions based on nitrile butadiene rubbers. Abstract of thesis PhD (Chemistry)]. Moscow, 2013. 24 p. (In Russian).

5. Charoeythornkhajhornchai P., Samthong C., Somwangthanaroj A. Influence of sulfenamide accelerators on cure kinetics and properties of natural rubber foam. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, no. 19. DOI: 10.1002/app.44822.

6. Maciejewska M., Sowińska A., Kucharska J. Organic zinc salts as pro-ecological activators for sulfur vulcanization of styrene-butadiene rubber. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 10. DOI: 10.3390/polym11101723.

7. Moresco S., Giovanela M., Carli L. N., Crespo J. S. Development of passenger tire treads: reduction in zinc content and utilization of a bio-based lubricant. *Journal of cleaner production*, 2016, vol. 117, pp. 199–206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.013.

8. Stepashkin A. A., Kaloshkin S. D., Pyatov I., Deniev M. Ya. Carbonized elastomer based composites filled with carbon fillers and silicon carbide. *Materials Letters*, 2018, vol. 215, pp. 288–291. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.132.

9. Thaptong P., Boonbumrung A., Jittham P., Sae-oui P. Potential use of a novel composite zinc oxide as eco-friendly activator in Tire tread compound. *Journal of Polymer Research*, 2019, vol. 26, no. 9. P. 226. DOI: 10.1007/s10965-019-1895-1.

10. Karmanova O. V., Popova L. V., Poymenova O. V., Gusev Yu. K. Creation of activating systems for effective vulcanization of elastomers. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2014, no. 3 (61), pp. 126–129 (In Russian).

11. 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).

12. GOST 12535–84. Rubber compounds. Method for determining vulcanization characteristics using a vulcanometer. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 33 p. (In Russian).

13. Kuz'minskiy A. S., Kavun S. M., Kirpichev V. P. *Fiziko-khimicheskiye osnovy polucheniya, pererabotki i primeneniya elastomerov* [Physico-chemical basis for the production, processing and use of elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 368 p. (In Russian).

14. Ovcharov V. I., Burmistr M. V., Tyutin V. A. *Svoystva rezinovykh smesey i rezin: otsenka, regulirovaniye, stabilizatsiya* [Properties of rubber compounds and rubbers: assessment, regulation, stabilization]. Moscow, Sankt-TM Publ., 2001. 400 p. (In Russian).

15. Shcherbina Ye. I., Dolinskaya R. M. *Struktura i svoystva rezin* [Structure and properties of rubber]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 135 p. (In Russian).
16. 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).
17. Kayushnikov S. N., Prokopchuk N. R., Shashok Zh.S., Vishnevskiy K.V. Properties of model rubber mixtures with various vulcanization activators. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 4: Chemistry, Organic Technology and Biotechnology, pp. 35–39 (In Russian).
18. Kayushnikov S. N., Prokopchuk N. R., Uss Ye. P. The influence of zinc-containing additives on the technological properties of elastomeric compositions. *Problemy shin, RTI i elastomernykh kompozitov: sbornik nauchnykh trudov 27 Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Problems of tires, rubber goods and elastomeric composites: collection of scientific papers 27 International Symposium]. Moscow, 2016, pp. 224–231 (In Russian).
19. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov* [Technology of elastomeric materials]. Moscow, Isterik Publ., 2009. 504 p. (In Russian).
20. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan, KNRTU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).

Информация об авторах

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

Шашок Жанна Станиславовна – доктор технических наук, профессор, 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

Карманова Ольга Викторовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19, Российская Федерация). E-mail: karolga@mail.ru

Голякевич Александр Александрович – аспирант кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности. Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19, Российская Федерация). E-mail: sasha4292@yandex.ru

Information about the authors

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

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

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

Karmanova Olga Viktorovna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Organic Compounds Technology, Polymer Processing and Technological Safety. Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: karolga@mail.ru

Golyakevich Alexander Aleksandrovich – PhD student, the Department of Organic Compounds Technology, Polymer Processing and Technological Safety. Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: sasha4292@yandex.ru

Поступила 13.12.2023