

УДК 678.046.3

**С. С. Масейков^{1,2}, А. В. Касперович², В. В. Боброва²,
Р. С. Колосовский², В. С. Францкевич², Д. Н. Боровский²,
С. Г. Тихомиров³, О. В. Карманова³**

¹ЗАО «Амкодор-Эластомер»

²Белорусский государственный технологический университет

³Воронежский государственный университет инженерных технологий

ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИЗ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ КАУЧУКА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе исследована возможность частичной и полной замены компонентов вулканизирующей системы (альтакс, цинковые белила, сера, гуанидин Ф, стеариновая кислота) в модельных эластомерных композициях на основе изопренового каучука СКИ-3 на технологически активную добавку (ТАД-ЖК). Добавка представляет собой органоминеральный комплекс на основе смеси жирных кислот и бентонита, полученный из вторичных продуктов рафинации подсолнечного масла при введении сернокислого алюминия и ферментного препарата производства ООО «Совтех» (г. Воронеж, Российская Федерация). Установлено, что частичная замена (до 30%) большинства компонентов, кроме стеариновой кислоты, на ТАД-ЖК приводит к значительному снижению вязкости по Муни (до 60,2%). При высоких дозировках (более 50%) и замене стеариновой кислоты во всех исследуемых дозировках наблюдается увеличение вязкости до 38,5%. Применение ТАД-ЖК повышает технологическую безопасность процесса вулканизации (увеличивается время начала вулканизации до 57,3%) и сокращает время оптимума вулканизации в 6,5 раза. Показано, что полная замена серы и гуанидина Ф на технологически активную добавку делает процесс вулканизации невозможным. Использование ТАД-ЖК способствует повышению прочности при растяжении (до 23,4%) и относительного удлинения при разрыве при несущественном изменении твердости по Шору А. Исследуемая ТАД-ЖК является эффективным модификатором для резин на основе СКИ-3, позволяющим целенаправленно регулировать их технологические и прочностные свойства. Для достижения заданных результатов необходим точный подбор дозировки и замещаемого компонента.

Ключевые слова: технологически активная добавка, изопреновый синтетический каучук, резиновая смесь, вязкость по Муни, кинетика вулканизации, прочность.

Для цитирования: Масейков С. С., Касперович А. В., Боброва В. В., Колосовский Р. С., Францкевич В. С., Боровский Д. Н., Тихомиров С. Г., Карманова О. В. Влияние органоминерального комплекса из вторичных материалов на свойства модельных эластомерных композиций на основе каучука общего назначения // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 105–119.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-10.

**S. S. Maseykov^{1,2}, A. V. Kasperovich², V. V. Bobrova²,
R. S. Kolosovsky², V. S. Frantskevich², D. N. Borovsky²,
S. G. Tikhomirov³, O. V. Karmanova³**

¹JSC “Amkodor-Elastomer”

²Belarusian State Technological University

³Voronezh State University of Engineering Technologies

THE INFLUENCE OF ORGANOMINERAL COMPLEX FROM SECONDARY MATERIALS ON THE PROPERTIES OF MODEL ELASTOMER COMPOSITIONS BASED ON GENERAL-PURPOSE RUBBER

This study investigated the possibility of partially and completely replacing vulcanization system components (Altax, zinc oxide, sulfur, guanidine F, and stearic acid) in model elastomer composites based on SKI-3 isoprene rubber with a technologically active additive (TAA-FA). The additive is an organomineral complex based on a mixture of fatty acids and bentonite, obtained from sunflower oil refining

byproducts with the addition of aluminum sulfate and an enzyme preparation manufactured by PC "Sovtekh" (Voronezh, Russian Federation). It was found that partial replacement (up to 30%) of most components, except stearic acid, with TAA-FA leads to a significant reduction in Mooney viscosity to 60.2%. At high dosages (over 50%) and replacement of stearic acid at all dosages studied, an increase in viscosity of up to 38.5% is observed. The use of TAA-FA improves the technological safety of the vulcanization process (increasing the onset of vulcanization time by up to 57.3%) and reduces the optimum vulcanization time by 6.5 times. It has been shown that the complete replacement of sulfur and guanidine F with a technologically active additive makes the vulcanization process impossible. The use of TAA-FA increases tensile strength (up to 23.4%) and elongation at break with an insignificant change in Shore A hardness. The studied TAA-FA is an effective modifier for SKI-3-based rubbers, allowing for targeted adjustment of their technological and strength properties. To achieve the desired results, precise selection of the dosage and the component being replaced is necessary.

Keywords: technologically active additive, isoprene synthetic rubber, rubber compound, Mooney viscosity, vulcanization kinetics, strength.

For citation: Maseykov S. S., Kasperovich A. V., Bobrova V. V., Kolosovsky R. S., Frantskevich V. S., Borovsky D. N., Tikhomirov S. G., Karmanova O. V. The influence of organomineral complex from secondary materials on the properties of model elastomer compositions based on general-purpose rubber. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 105–119 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-10.

Введение. В настоящее время наполнители обычно добавляют в резиновые матрицы для улучшения их физических свойств, снижения стоимости и придания цвета данным композициям. Дисперсные наполнители подразделяются на три основные категории: малоусиливающие, полуусиливающие, или расширяющие, и усиливающие наполнители [1–3]. Усиление является одной из важнейших технологий [4], которая подразумевает улучшение резиновых композиций, связанное с повышением модуля упругости, прочности на разрыв, сопротивления разрыву и истиранию [5].

Природные глины широко используются в качестве наполнителей в различных резиновых матрицах благодаря своей распространенности, низкой стоимости и относительно высокой чистоте, что делает композиции резина – глина новым классом материалов [6, 7]. Бентонит – это тип глины, в основном состоящий из монтмориллонита, природного глинистого минерала, который часто используется в производстве полимерных материалов. Его высокая набухаемость обеспечивает его расслаивание. Частицы бентонита, диспергированные в полимерной матрице, классифицируются как наполнители и способны модифицировать и улучшать некоторые свойства полимера, такие как модуль упругости, прочность, термостойкость и срок службы при повышенных температурах, негорючесть и газопроницаемость, даже при низком процентном содержании [8].

До настоящего времени применение глинистых минералов в резиновых изделиях оставалось сложной задачей, решение которой позволило бы добиться высоких эксплуатационных характеристик резиновых изделий, заменив традиционные резиновые наполнители, такие как технический углерод и диоксид кремния. Гидрофильная природа очищенного Na^+ или Ca^{+2} монтмориллонита делала эти материалы несовместимыми с гидрофобной резиновой матрицей, что приводило к неудовлетворительным свойствам композитов при их смешивании. Большинство предыдущих исследований было сосредоточено на изменении поверхностного характера глинистых минералов посредством реакций катионного обмена для достижения достаточной органофильности, нахождении оптимального количества глинистых минералов в различных резиновых матрицах и попытках обнаружить интеркалированные и расслоенные структуры глинистых минералов с помощью рентгеновской дифракции и морфологических исследований. Хотя модифицированный монтмориллонит частично диспергировался в полярных каучуках, таких как нитрильный каучук и хлоропреновый каучук [9], его диспергирование в неполярных каучуках, таких как натуральный, бутадиенстирольный, этиленпропилендиеновый и бутадиеновый, было весьма неудовлетворительным.

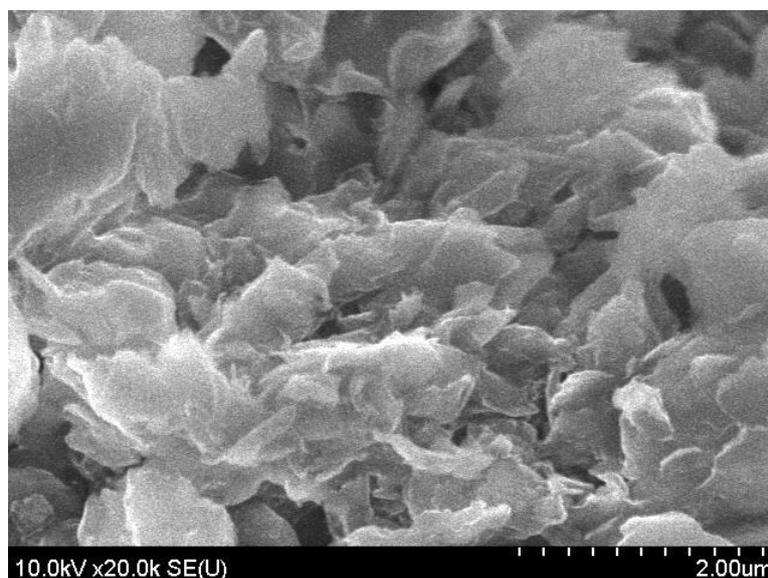
Для получения композита резина – глинистая минеральная смесь с желаемым улучшением свойств слои глинистых минералов должны быть хорошо разделены и равномерно распределены по всей резиновой матрице [10–12].

Интеркаляция органического поверхностно-активного вещества между слоями бентонита не только изменяет свойства поверхности с гидрофильных на гидрофобные, но и значительно увеличивает базальное расстояние между слоями [13, 14]. Среди различных взаимодействий глины с органическими веществами явление интеркаляции привлекло значительное внимание в последние несколько лет [15–17]. Интеркаляция привела к разработке специальных глинистых минералов с улучшенными поверхностными и структурными свойствами, которые нашли широкое применение в области полимерных композитов [18, 19]. А. Das с соавторами [10] сообщали об интеркаляции жирных кислот в слои глинистых минералов и последующем достижении большего межслоевого пространства глинистых минералов, чтобы минимизировать межслоевые взаимодействия и, таким образом, улучшить расслаивание частиц глинистых минералов в матрице натурального каучука. Кроме того, жирные кислоты в межслоевом пространстве могут участвовать в сшивке серой сегментов полимерной цепи, захваченных в межслоевом пространстве, что, возможно, может привести к получению резиновых композитов с высокими физическими свойствами [20, 21].

Основная часть. Целью исследования является установление влияния технологически активной добавки (ТАД-ЖК) при частичной и полной замене отдельных ингредиентов вулканизирующей группы на реологические, кинетические, физико-механические и структурные характеристики модельных эластомерных композиций на основе синтетического изопренового каучука общего назначения СКИ-3.

Применяемая в данной работе ТАД-ЖК представляет собой органоминеральный комплекс на основе смеси жирных кислот и природного бентонита, полученный модификацией сопутствующих продуктов рафинации масла подсолнечника при введении сернокислого алюминия и ферментного препарата (ООО «Совтех», г. Воронеж, Российская Федерация) [22].

Морфологию и структуру образца ТАД-ЖК (рисунок) анализировали на сканирующем растровом электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония). Отличительной особенностью исследуемой добавки является наличие плоских, чешуйчатых, слоистых пластин, которые характерны для монтмориллонита. Пластины монтмориллонита очень тонкие, имеют нерегулярный профиль с тенденцией к агрегации в процессе высыхания и демонстрируют хорошую способность к расслаиванию при контакте с водой. Укладка этих пластин регулируется относительно слабыми полярными силами и силами Ван-дер-Ваальса [23].



SEM-изображение технологически активной добавки

Элементный состав исследуемой ТАД-ЖК, а также процентный состав жирных кислот, входящих в состав данной добавки, представлены в работе [24].

Для оценки возможности применения технологически активной добавки в качестве частичной замены отдельных ингредиентов вулканизирующей группы, а также для установления влияния данной замены на технологические, прочностные и структурные характеристики резин были изготовлены модельные резиновые смеси на основе изопренового каучука (СКИ-3) общего назначения [25].

На основании ранее проведенных исследований [24] в данной работе в рецептурах модельных резиновых смесей осуществлялась различная процентная замена (10, 30, 50, 70 и 100% от общей дозировки) отдельных компонентов вулканизирующей группы (сера, альтакс, цинковые белила, стеариновая кислота, гуанидин Ф) на ТАД-ЖК. Технологически активная добавка дозировалась в соответствии с уменьшением дозировки вулканизирующей группы.

Оценка технологических свойств резиновых смесей во многом базируется на определении их вязкости по Муни [26]. Данный параметр является индикатором сопротивления материала деформации при течении с заданной скоростью на различных этапах технологического процесса [27]. Определение пластоэластических свойств резиновых смесей выполнялось на сдвиговом дисковом вискозиметре MV2000 в соответствии с ГОСТ 10722–76 [28]. В табл. 1 приведены результаты исследований по определению вязкости по Муни исследуемых эластомерных композиций с различным содержанием технологически активной добавки.

Таблица 1. Вязкость по Муни резиновых смесей

| Наименование компонента вулканизирующей группы | ↓, % | Вязкость по Муни, усл. ед. Муни |
|--|------|---------------------------------|
| Исходная смесь | – | 8,3 |
| Альтакс | 10 | 5,4 |
| | 30 | 5,6 |
| | 50 | 13,3 |
| | 70 | 13,4 |
| | 100 | 13,5 |
| Цинковые белила | 10 | 4,3 |
| | 30 | 5,4 |
| | 50 | 9,6 |
| | 70 | 10,2 |
| | 100 | 10,4 |
| Сера | 10 | 3,3 |
| | 30 | 5,3 |
| | 50 | 9,4 |
| | 70 | 11,2 |
| | 100 | 13,3 |
| Стеариновая кислота | 10 | 9,1 |
| | 30 | 9,0 |
| | 50 | 9,3 |
| | 70 | 12,2 |
| | 100 | 13,2 |
| Гуанидин Ф | 10 | 4,4 |
| | 30 | 5,8 |
| | 50 | 12,4 |
| | 70 | 12,9 |
| | 100 | 13,5 |

Примечание. ↓ – процентная замена компонентов вулканизирующей группы в резиновых смесях на ТАД-ЖК.

Определено, что частичная замена (до 30%) отдельных компонентов вулканизирующей системы (кроме стеариновой кислоты) на технологически активную добавку в модельных эластомерных композициях на основе каучука общего назначения СКИ-3 приводит к снижению значений показателя вязкости по Муни резиновых смесей до 34,9% при замене альтакса, до 48,2% при замене цинковых белил, до 60,2% при замене серы и до 47,0% при замене гуанидина Ф по сравнению с исходной смесью. Снижение вязкости исследуемых резин, вероятно, обусловлено эффектом пластификации за счет жирных кислот, входящих в состав ТАД-ЖК [29]. Стоит отметить, что при частичной и полной замене стеариновой кислоты на ТАД-ЖК показатель вязкости по Муни исследуемых резиновых смесей увеличивается на 9,6–59,0% в сравнении с исходной смесью.

В случае увеличения процентной замены отдельных компонентов вулканизирующей группы на ТАД-ЖК (свыше 50%) определено повышение показателя вязкости по Муни. Так, значение вязкости для исходной смеси составляет 8,3 усл. ед. Муни, а для смесей, содержащих ТАД-ЖК, находится в диапазоне от 9,4 до 13,5 усл. ед. Муни. Бентонит, входящий в состав ТАД-ЖК, как и другие глины, обладает высокой способностью к образованию межмолекулярных взаимодействий, таких как водородные связи и ван-дер-ваальсовы силы. Модификация бентонита жирными кислотами может изменить его химическую совместимость с непрерывной фазой полимерной матрицы, что способствует более сильному взаимодействию между компонентами смеси, что в свою очередь может увеличить вязкость резиновой смеси [30]. Кроме того, введение высокого количества ТАД-ЖК в резиновую матрицу может приводить к образованию более сложной структуры благодаря образованию сетки частиц бентонита, которая ухудшит подвижность цепей полимера и тем самым увеличит значения показателя вязкости смеси [31].

Вулканизация представляет собой процесс образования трехмерной пространственной сетки цепных макромолекул. При этом в полимерной матрице возникают химические связи между макромолекулами, обусловленные химической реакцией агента вулканизации или энергетического фактора. Процесс вулканизации приводит к образованию вулканизационных узлов (поперечных связей). Поперечные связи ограничивают перемещения макромолекул при механическом воздействии [32].

Основные кинетические параметры вулканизации исследуемых резиновых смесей представлены в табл. 2. Определение кинетики вулканизации резиновых смесей проводилось на реометре ODR2000 фирмы Alpha Technologies согласно ГОСТ 12535–84 [33].

Установлено, что при введении ТАД-ЖК в резиновые смеси на основе СКИ-3 взамен отдельных компонентов вулканизирующей группы, а именно: альтакса, цинковых белил и серы, в дозировке до 30% значения минимального крутящего момента, характеризующего вязкость смесей при заданной температуре (M_L), уменьшается до 26,1; 42,9 и 9,9% соответственно. Снижение вязкости по Муни, вероятно, может быть обусловлено пластифицирующим эффектом жирных кислот, входящих в состав исследуемой добавки [34]. В случае увеличения процентной замены компонентов вулканизирующей группы на исследуемую добавку наблюдается повышение показателя M_L до 29,1%, что, возможно, обусловлено тем, что при повышенных дозировках может наблюдаться эффект усиления, который происходит за счет взаимодействия между бентонитовой глиной, входящей в состав ТАД-ЖК, и молекулами каучука, что, в свою очередь, ограничивает подвижность молекулярных цепей [35, 36]. Также стоит отметить, что при замене ускорителя вулканизации (гуанидина Ф) на ТАД-ЖК во всех исследуемых дозировках уменьшается показатель M_L до 19,3%, в случае замены активатора вулканизации (стеариновой кислоты) наблюдается обратный эффект – значения минимального крутящего момента увеличиваются на 5,0–24,8%. Применение технологически активной добавки в качестве замены различных компонентов вулканизирующей группы в рецептурах исследуемых резиновых смесей оказывает различное влияние на показатель минимального крутящего момента (M_H). Так, при замене альтакса и серы во всех исследуемых дозировках наблюдается снижение показателя M_H до 14,6 и 43,6% соответственно.

Таблица 2. Вулканизационные показатели резиновых смесей на основе СКИ-3

| Наименование компонента вулканизирующей группы | ↓, % | M_L , дН · м | M_H , дН · м | t_{S2} , мин | t_{90} , мин | ΔM , дН · м |
|--|------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
| Исходная смесь | – | 1,61 | 15,73 | 1,31 | 37,22 | 14,12 |
| Альтакс | 10 | 1,19 | 14,77 | 1,29 | 31,30 | 13,58 |
| | 30 | 1,53 | 15,22 | 1,35 | 29,27 | 13,69 |
| | 50 | 2,09 | 15,60 | 1,62 | 35,96 | 13,51 |
| | 70 | 1,85 | 13,63 | 1,68 | 34,52 | 11,78 |
| | 100 | 2,09 | 13,44 | 1,91 | 14,78 | 11,36 |
| Цинковые белила | 10 | 0,92 | 15,66 | 1,28 | 23,70 | 14,74 |
| | 30 | 1,20 | 16,46 | 1,29 | 23,71 | 15,26 |
| | 50 | 1,79 | 18,10 | 1,21 | 19,97 | 16,31 |
| | 70 | 1,73 | 15,96 | 1,25 | 13,60 | 14,23 |
| | 100 | 1,65 | 8,14 | 1,21 | 12,83 | 6,49 |
| Сера | 10 | 1,45 | 14,40 | 1,79 | 10,90 | 12,95 |
| | 30 | 1,47 | 12,29 | 1,46 | 9,43 | 10,82 |
| | 50 | 1,65 | 11,62 | 1,54 | 26,76 | 9,97 |
| | 70 | 1,76 | 8,87 | 1,68 | 32,53 | 7,11 |
| | 100 | 1,81 | – | – | – | – |
| Стеариновая кислота | 10 | 1,84 | 15,20 | 1,89 | 12,32 | 13,36 |
| | 30 | 1,69 | 15,72 | 1,32 | 20,06 | 14,03 |
| | 50 | 2,01 | 17,93 | 1,59 | 30,16 | 15,92 |
| | 70 | 1,79 | 16,80 | 1,43 | 26,80 | 15,01 |
| | 100 | 1,97 | 16,84 | 1,24 | 4,31 | 14,87 |
| Гуанидин Ф | 10 | 1,59 | 16,57 | 1,37 | 29,53 | 14,98 |
| | 30 | 1,65 | 17,23 | 1,35 | 6,17 | 15,58 |
| | 50 | 1,50 | 18,74 | 1,92 | 9,14 | 17,24 |
| | 70 | 1,30 | 17,34 | 2,06 | 5,75 | 16,04 |
| | 100 | 1,45 | – | – | – | – |

Примечание. ↓ – процентная замена компонентов вулканизирующей группы в резиновых смесях на ТАД-ЖК; M_L – минимальный крутящий момент, дН · м; M_H – максимальный крутящий момент, дН · м; t_{S2} – время начала вулканизации, определяемое увеличением минимального крутящего момента на 2 дН · м, мин; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; ΔM – разность между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН · м.

В случае замены 70% цинковых белил и гуанидина Ф, а также полной замены стеариновой кислоты определено увеличение максимального крутящего момента до 19,1%. Различия в значениях показателя M_H , вероятно, обусловлены тем, что компоненты резиновой смеси как на стадии смешения, так и в процессе вулканизации могут образовывать физические и химические связи, комбинация которых может существенно повлиять на технологические характеристики резиновых смесей и физико-механические свойства вулканизатов.

Частичная замена отдельных компонентов вулканизирующей группы на ТАД-ЖК, а именно: альтакса, серы, стеариновой кислоты и гуанидина Ф, приводит к повышению стойкости исследуемых резиновых смесей к подвулканизации, поскольку показатель времени начала вулканизации (t_{S2}) возрастает до 45,8; 36,6; до 44,3 и 57,3% соответственно. В случае замены цинковых белил во всех исследуемых дозировках данный показатель уменьшается незначительно (до 7,6%). Стоит отметить, что применение исследуемой технологически активной добавки приводит к снижению времени достижения оптимума вулканизации (t_{90}) при замене каждого из ингредиентов вулканизирующей группы во всех исследуемых дозировках. Так, показатель t_{90} для исходной резиновой смеси составляет 37,22 мин, а для смесей с ТАД-ЖК находится в диапазоне от 5,75 до 35,96 мин. Данное изменение кинетических параметров вулканизации резиновых смесей на основе каучука общего назначения с ТАД-ЖК может быть обусловлено наличием в добавке высокого количества металлов (до 13,0%) и серы (до 3,0%) [24], что способствует ускорению процесса вулканизации [37].

Кроме того, использование оксида цинка (ZnO) в рецептуре требует добавления стеариновой или других жирных кислот для образования растворимого стеарата цинка. Ионы цинка (Zn^{2+}), образующиеся при этом, могут формировать комплексы с ускорителями и серой, что также ускоряет вулканизацию [38]. Поскольку биомасла содержат свободные жирные кислоты, они могут реагировать с ZnO, образуя карбоксилаты цинка. Это, в свою очередь, может сократить время вулканизации резиновых смесей [39]. Также известно [40], что смеси, содержащие высокомолекулярные кислоты (стеариновая, пальмитиновая, олеиновая, линолевая и др.), имеют наибольшую стойкость к преждевременной вулканизации. В случае замены 100% серы и гуанидина Ф на исследуемую добавку процесса вулканизации не наблюдается.

Разница между максимальным и минимальным крутящими моментами (ΔM) характеризует плотность поперечного сшивания резин [41]. Определено, что применение ТАД-ЖК в резиновых смесях на основе каучука общего назначения в качестве замены цинковых белил (кроме 100% замены), стеариновой кислоты и гуанидина Ф способствует повышению показателя ΔM до 15,5; 12,8 и 22,1% соответственно. В случае замены альтакса (свыше 50%) и серы (во всех исследуемых дозировках) показатель разности между максимальным и минимальным крутящими моментами снижается до 49,6%. Стоит учитывать, что исследуемая технологически активная добавка содержит как насыщенные, так и ненасыщенные кислоты [24], влияние которых на вулканизационные свойства может зависеть от множества факторов, включая их дозировку, другие ингредиенты смеси, условия вулканизации и т. д.

Для характеристики пространственной сетки вулканизатов часто используют показатели плотности поперечного сшивания (ν) и среднюю молекулярную массу отрезка цепи, заключенного между двумя поперечными связями (M_c). Для определения структурных показателей сетки поперечных связей исследуемых резин применяли метод равновесного набухания (растворитель – толуол). Расчет параметров пространственной сетки вулканизатов (табл. 3) проводили по уравнению Флори – Ренера [42].

Анализ полученных данных показал, что применение технологически активной добавки в составе эластомерных композиций на основе каучука общего назначения в случае замены 100% альтакса и серы, а также до 30% и полной замены цинковых белил приводит к снижению показателя количества поперечных связей (n) до 66,8% и показателя плотности поперечного сшивания резин (ν) до 66,5%. В случае замены 50 и 70% цинковых белил, стеариновой кислоты и гуанидина Ф во всех исследуемых дозировках наблюдается повышение данных показателей по сравнению с исходной смесью.

Для оценки влияния ТАД-ЖК на свойства резин были определены физико-механические показатели вулканизатов, а именно: условная прочность при растяжении (f_p), относительное удлинение при разрыве (ϵ_p), а также твердость по Шору А. Испытания по определению упруго-прочностных свойств резин проводились согласно ГОСТ 270–75 [43] и твердости по Шору А в соответствии с ГОСТ 263–75 [44].

Таблица 3. Показатели пространственной структуры резин

| Наименование компонента вулканизирующей группы | \downarrow , % | M_c , кг/моль | $n \cdot 10^{-19}$, см ⁻³ | $\nu \cdot 10^5$, моль/см ³ |
|--|------------------|-----------------|---------------------------------------|---|
| Исходная смесь | – | 25 691,3 | 2,14 | 3,55 |
| Альтакс | 10 | 26 397,1 | 2,08 | 3,45 |
| | 30 | 28 181,9 | 1,95 | 3,23 |
| | 50 | 27 665,0 | 2,01 | 3,29 |
| | 70 | 25 596,9 | 2,15 | 3,57 |
| | 100 | 31 462,9 | 1,76 | 2,93 |
| Цинковые белила | 10 | 27 218,0 | 2,01 | 3,34 |
| | 30 | 25 698,6 | 2,13 | 3,54 |
| | 50 | 21 504,7 | 2,58 | 4,28 |
| | 70 | 24 964,7 | 2,52 | 4,19 |
| | 100 | 77 274,8 | 0,71 | 1,19 |

Окончание табл. 3

| Наименование компонента вулканизирующей группы | ↓, % | M_c , кг/моль | $n \cdot 10^{-19}$, см ⁻³ | $\nu \cdot 10^5$, моль/см ³ |
|--|------|-----------------|---------------------------------------|---|
| Сера | 10 | 26 938,4 | 2,04 | 3,38 |
| | 30 | 29 073,8 | 1,89 | 3,13 |
| | 50 | 30 133,8 | 1,84 | 3,05 |
| | 70 | 37 282,5 | 1,49 | 2,47 |
| | 100 | – | – | – |
| Стеариновая кислота | 10 | 24 303,6 | 2,26 | 3,74 |
| | 30 | 24 890,4 | 2,20 | 3,66 |
| | 50 | 20 339,5 | 2,72 | 4,52 |
| | 70 | 21 176,5 | 2,62 | 4,34 |
| | 100 | 23 153,3 | 2,39 | 3,97 |
| Гуанидин Ф | 10 | 24 401,3 | 2,25 | 3,73 |
| | 30 | 23 680,6 | 2,31 | 3,84 |
| | 50 | 21 541,6 | 2,57 | 4,27 |
| | 70 | 23 534,6 | 2,35 | 3,91 |
| | 100 | – | – | – |

Примечание. M_c – средняя молекулярная масса отрезка молекулярной цепи, заключенного между двумя поперечными связями, кг/моль; n – количество поперечных связей в 1 см³ вулканизата; ν – плотность поперечного сшивания, моль/см³.

В табл. 4 приведены результаты определения физико-механических показателей свойств исследуемых резин, содержащих ТАД-ЖК в качестве частичной замены отдельных компонентов вулканизирующей группы.

Таблица 4. Физико-механические показатели резин

| Наименование компонента вулканизирующей группы | ↓, % | f_p , МПа | ε_p , % | Твердость по Шору А, усл. ед. Шор |
|--|------|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| Исходная смесь | – | 11,1 | 760 | 30 |
| Альтакс | 10 | 11,5 | 810 | 31 |
| | 30 | 11,0 | 840 | 30 |
| | 50 | 11,3 | 800 | 33 |
| | 70 | 11,2 | 830 | 30 |
| | 100 | 6,8 | 900 | 27 |
| Цинковые белила | 10 | 11,1 | 800 | 31 |
| | 30 | 12,2 | 810 | 29 |
| | 50 | 11,7 | 790 | 34 |
| | 70 | 12,7 | 820 | 33 |
| | 100 | 3,2 | 1100 | 10 |
| Сера | 10 | 11,6 | 860 | 28 |
| | 30 | 11,4 | 870 | 28 |
| | 50 | 11,5 | 880 | 27 |
| | 70 | 9,6 | 950 | 26 |
| | 100 | – | – | – |
| Стеариновая кислота | 10 | 12,7 | 800 | 30 |
| | 30 | 12,6 | 800 | 30 |
| | 50 | 11,8 | 790 | 33 |
| | 70 | 12,3 | 800 | 34 |
| | 100 | 12,8 | 810 | 32 |
| Гуанидин Ф | 10 | 13,0 | 820 | 31 |
| | 30 | 13,7 | 810 | 33 |
| | 50 | 12,1 | 780 | 33 |
| | 70 | 12,1 | 800 | 32 |
| | 100 | – | – | – |

Сравнительный анализ упруго-прочностных свойств показал, что применение технологически активной добавки в эластомерных композициях на основе каучука общего назначения в качестве частичной замены алтаткса (до 70%) и серы (до 50%) приводит к незначительному изменению (до 4,5%) условной прочности при растяжении по сравнению с исходной композицией. В случае замены цинковых белил, стеариновой кислоты и гуанидина Ф на ТАД-ЖК во всех исследуемых дозировках наблюдается увеличение f_p до 14,0; 15,3 и 23,4% соответственно. В то же время применение исследуемой добавки способствует повышению относительного удлинения при разрыве. Так, показатель ϵ_p для исходной резины составляет 760%, а для композиций с ТАД-ЖК находится в диапазоне от 780 до 1100%. Также стоит отметить, что исследуемая технологически активная добавка фактически не оказывает влияние на показатель твердости по Шору А (изменение составляет 3 усл. ед. Шор).

Известно [45], что стеариновая, пальметиновая и олеиновая кислоты и их соли, используемые в качестве активаторов вулканизации, улучшают технологические свойства смесей и способствуют получению высокомолекулярных вулканизатов, характеризующихся высоким сопротивлением разрыву и эластичностью. По-видимому, из ускорителя, серы, оксида цинка и жирной кислоты образуется комплекс, который, собственно, и является ускоряющим агентом. Лучшая растворимость соли жирной кислоты по сравнению с оксидом цинка, а также лучшее распределение ускорителей и других ингредиентов в присутствии жирной кислоты, очевидно, также способствуют улучшению физико-механических свойств вулканизатов. Добавление жирных кислот до определенного оптимального количества обуславливает повышение прочности на растяжение, твердости и эластичности вулканизатов. При превышении определенной ее дозировки жирная кислота, естественно, играет роль мягчителя, в результате чего свойства вулканизата снова ухудшаются.

Заключение. Установлены зависимости изменения технологических свойств модельных эластомерных композиций на основе каучука общего назначения от процентной замены отдельных компонентов вулканизирующей группы на технологически активную добавку на основе вторичных материалов.

Определено, что частичная замена (до 30%) таких компонентов вулканизирующей группы, как алтаткс, цинковые белила, сера и гуанидин Ф, на ТАД-ЖК способствует значительному (до 60,2%) снижению вязкости по Муни резиновых смесей благодаря пластифицирующему действию жирных кислот, входящих в состав исследуемой добавки. Однако замена стеариновой кислоты, а также применение высоких дозировок ТАД-ЖК (свыше 50%) приводит к увеличению показателя вязкости, что, вероятно, объясняется образованием сетки частиц бентонита, которая ограничивает подвижность полимерных цепей.

Применение ТАД-ЖК повышает технологическую безопасность процесса вулканизации, увеличивая время начала вулканизации до 57,3% для большинства исследуемых систем, что снижает риск подвулканизации. При этом технологически активная добавка существенно ускоряет основную стадию вулканизации, сокращая оптимум вулканизации с 37,22 до 5,75–35,96 мин. При полной замене серы и гуанидина Ф на ТАД-ЖК не наблюдается процесса вулканизации, что указывает на их незаменимую роль в формировании поперечных связей и невозможность данной замены.

Использование ТАД-ЖК способствует повышению условной прочности при растяжении (до 23,4%) и значительному увеличению относительного удлинения при разрыве резин. При этом твердость по Шору А исследуемых резин изменяется несущественно.

Таким образом, технологически активная добавка на основе смеси жирных кислот и природного бентонита является эффективным модификатором для эластомерных композиций на основе СКИ-3. Она позволяет целенаправленно регулировать свойства резиновых смесей и вулканизатов, улучшая их технологичность (снижая вязкость и ускоряя вулканизацию) и повышая ряд прочностных характеристик. Однако ее влияние комплексно и неоднозначно, требует точного подбора дозировки и замещаемого компонента в рецептуре для достижения заданных свойств.

Работа выполнялась в рамках Отдельного проекта Министерства образования Республики Беларусь.

Список литературы

1. Mohan T. P., Kuriakose J., Kanny K. Effect of nanoclay reinforcement on structure, thermal and mechanical properties of natural rubber styrene butadiene rubber (NR-SBR) // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2011. Vol. 17. P. 264–270.
2. Boczkowska A. *Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications*. Croatia: Published by InTech, 2012. 414 p.
3. Rodgers B., Tallury S. S., Klingensmith W. *Rubber Compounding* // *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2016. Vol. 11. P. 612–670.
4. El-Sabbagh S. H., Ahmed N. M., Ward A. A. Effect of kaolin metal oxides core shell pigments on the properties of styrene butadiene rubber composites // *Journal of Materials and Design*. 2012. Vol. 40. P. 343–355.
5. Ahmed N. M., El-Sabbagh S. H. The influence of hybrid phosphate – alumina pigments on properties of Ethylene propylene diene rubber composites // *Journal of Materials & Design*. 2011. Vol. 32, no. 1. P. 303–321.
6. El-Nashar D. E., Ahmed N. M., Yehia A. A. The role of ion-exchange bentonites in changing the properties of styrene butadiene rubber composites // *Journal of Materials & Design*. 2012. Vol. 34. P. 137–142.
7. Nantana J., Patcharee M., Narangkhan P. Modified bentonite clay in UV-curable coating applications // *Engineering Journal*. 2012. Vol. 16, no. 3. P. 14–18.
8. Evaluation of the role of an ionic liquid as organophilization agent into montmorillonite for NBR rubber nanocomposite production / J. P. Fontana [et al.] // *Journal of Polymer Science*. 2013. Vol. 83. P. 203–209.
9. Effect of Vulcanization Ingredients on the Intercalation-Exfoliation Process of Layered Silicate in an Acrylonitrile Butadiene Rubber Matrix / A. Das [et al.] // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2008. Vol. 293. P. 479–490. DOI: 10.1002/mame.200700375.
10. A general approach to rubber-montmorillonite nanocomposites: Intercalation of stearic acid / A. Das [et al.] // *Applied Clay Science*. 2011. Vol. 51. P. 117–125.
11. Synergistic effect of cationic and anionic surfactants for the modification of Ca-montmorillonite / Z. Zhang [et al.] // *Materials Research Bulletin*. 2013. Vol. 48, no. 5. P. 1811–1816.
12. Fatimah I., Huda T. Preparation of cetyltrimethylammonium intercalated Indonesian montmorillonite for adsorption of toluene // *Journal of Polymer Science*. 2013. Vol. 74. P. 115–120.
13. Chalermpan K., Kasama J., Nitinat S. Effect of Clay Surface Modification on Physical Properties of Natural Rubber Nanocomposites // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 123. P. 55–58.
14. Reyes L. Q. Morphology and Structure of Amino Fatty Acid Intercalated Montmorillonite // *Defect and Diffusion Forum*. 2017. Vol. 382. P. 44–50.
15. Galimberti M. *Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications*. New York: Published by Wiley & Sons, 2011. 632 p.
16. Hrachova J., Chodak B., Komadel P. Modification and characterization of montmorillonite fillers used in composites with vulcanized natural rubber // *Chemical Papers*. 2009. Vol. 63, no. 1. P. 55–61.
17. Rahim M. A., Ismail M., Kandil A. Effect of organophilization and interlamellar silylation of montmorillonite on compatibilization of polymer composites // *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016. Vol. 10, no. 32. P. 206–216. DOI: 10.12913/22998624/65121.
18. Giannelis E. P. *Polymer layered silicate nanocomposites* // *Advanced Materials*. 1996. Vol. 8. P. 29–35.
19. Gilman J. W. Flammability and thermal stability studies of polymer layered-silicate (clay) nanocomposites // *Applied Clay Science*. 1999. Vol. 15. P. 31–49.
20. Elucidation of the role of ZnO in sulfur cure in novel EPDM-CTS blends / S. G. Butuc [et al.] // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 117. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107843.

21. Effect of fatty acids on the accelerated sulfur vulcanization of rubber by active zinc/carboxylate complexes / P. Junkong [et al.] // *RSC Advances*. 2020. Vol. 10. P. 4772–4785. DOI: 10.1039/c9ra10358a.
22. Технологическая добавка для резиновых смесей: пат. RU 2396293 С2 / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, И. А. Осошник, Л. В. Попова, О. В. Карманова, Т. В. Тарасевич. Оpubл. 10.08.10.
23. Campos V., Tcacenco C. Synthesis of polycationic bentonite-ionene complexes and their benzene adsorption capacity // *Polímero*. 2015. Vol. 25, no. 2. P. 146–153.
24. Влияние технологически активной добавки из вторичных материалов на свойства модельных эластомерных композиций / С. С. Масейков [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. 2025. № 2 (295). С. 34–42. DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-5.
25. Каучук синтетический цис-изопреновый. Технические условия: ГОСТ 14925–79. М.: Изд-во стандартов, 1979. 29 с.
26. Кузьминский А. С., Кавун С. М., Кирпичев В. П. Физико-химические основы получения, переработки и применения эластомеров. М.: Химия, 1976. 368 с.
27. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. М.: Санкт-ТМ, 2001. 400 с.
28. Метод определения вязкости и способности к преждевременной вулканизации: ГОСТ 10722–76. М.: Изд-во стандартов, 1976. 9 с.
29. Investigation on the properties of rubber composites containing modified clay / S. H. El-Sabbagh [et al.] // *Pigment & Resin Technology*. 2015. Vol. 44, no. 3. P. 131–142.
30. Stress relaxation behavior of organically modified montmorillonite filled natural rubber/nitrile rubber nanocomposites / H. J. Maria [et al.] // *Applied Clay Science*. 2014. Vol. 87. P. 120–128. DOI: 10.1016/j.clay.2013.10.019.
31. Preparation and characterization of natural rubberlatex/modified montmorillonite clay nanocomposite / F. H. J. Al-Shemmari [et al.] // *Research on Chemical Intermediates*. 2012. Vol. 39, no. 9. P. 1–9.
32. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. М.: Химия, 1978. 287 с.
33. Смесей резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре: ГОСТ 12535–84. М.: Изд-во стандартов, 1985. 33 с.
34. New Vegetable Oils with Different Fatty Acids on Natural Rubber Composite Properties / S. Boonrasri [et al.] // *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 7. P. 1–12. DOI: 10.3390/polym13071108.
35. Araya-pranee W., Rempel G. L. Effects of Polarity on the Filler-Rubber Interaction and Properties of Silica Filled Grafted Natural Rubber Composites // *Journal of Polymers*. 2013. Vol. 1. P. 1–23.
36. Influence of Sepiolite Addition Methods and Contents on Physical Properties of Natural Rubber Composites / N. Hayeemasae [et al.] // *Science and Technology Indonesia*. 2022. Vol. 7, no. 2. P. 140–148.
37. Enhancing Rubber Vulcanization Cure Kinetics: Lowering Vulcanization Temperature by Addition of MgO as Co-Cure Activator in ZnO-Based Cure Activator Systems / M. N. Alam [et al.] // *Polymers*. 2024. Vol. 16. P. 876. DOI: 10.3390/polym16070876.
38. Unfilled Natural Rubber Compounds Containing Bio-Oil Cured with Different Curing Systems: A Comparative Study / C. Hayichelaer [et al.] // *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 12. P. 1–16.
39. Elucidation of the accelerated sulfur vulcanization of biooil-extended natural rubber compounds / C. Hayichelaer [et al.] // *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. Vol. 33, no. 1. P. 1–11.
40. Юрьева Е. Н. Влияние числа углеводородных атомов на свойства жирных кислот. Ярославль: ЯПИ, 1978. 26 с.
41. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития: монография. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.
42. Flory P. J., Rehner J. J. Statistical Mechanics of Cross-Linked Polymer Networks II. Swelling // *The Journal of Chemical Physics*. 1943. Vol. 11. P. 521–523. DOI: 10.1063/1.1723792.

43. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75. М.: Изд-во стандартов, 1975. 29 с.
44. Метод определения твердости по Шору А: ГОСТ 263–75. М.: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
45. Инсарова Г. Н. Влияние поверхностно активных веществ на переработку резиновых смесей и свойства резин. М.: ЦНИИТЭ Нефтехим, 1980. 30 с.

References

1. Mohan T. P., Kuriakose J., Kanny K. Effect of nanoclay reinforcement on structure, thermal and mechanical properties of natural rubber styrene butadiene rubber (NR-SBR). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011, vol. 17, pp. 264–270.
2. Boczkowska A. *Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications*. Croatia, Published by InTech, 2012. 414 p.
3. Rodgers B., Tallury S. S., Klingensmith W. Rubber Compounding. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2016, vol. 11, pp. 612–670.
4. El-Sabbagh S. H., Ahmed N. M., Ward A. A. Effect of kaolin metal oxides core shell pigments on the properties of styrene butadiene rubber composites. *Journal of Materials and Design*, 2012, vol. 40, pp. 343–355.
5. Ahmed N. M., El-Sabbagh S. H. The influence of hybrid phosphate – alumina pigments on properties of Ethylene propylene diene rubber composites. *Journal of Materials & Design*, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 303–321.
6. El-Nashar D. E., Ahmed N. M., Yehia A. A. The role of ion-exchange bentonites in changing the properties of styrene butadiene rubber composites. *Journal of Materials & Design*, 2012, vol. 34, pp. 137–142.
7. Nantana J., Patcharee M., Narangkhana P. Modified bentonite clay in UV-curable coating applications. *Engineering Journal*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 14–18.
8. Fontana J. P., Camilo F. F., Bizeto M. A., Faez R. Evaluation of the role of an ionic liquid as organophilization agent into montmorillonite for NBR rubber nanocomposite production. *Journal of Polymer Science*, 2013, vol. 83, pp. 203–209.
9. Das A., Jurk R., Stockelhuber K. W., Heinrich G. Effect of Vulcanization Ingredients on the Intercalation-Exfoliation Process of Layered Silicate in an Acrylonitrile Butadiene Rubber Matrix. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2008, vol. 293, pp. 479–490. DOI: 10.1002/mame.200700375.
10. Das A., Stöckelhuber K. W., Jurk R., Jehnichen D., Heinrich G. A general approach to rubber-montmorillonite nanocomposites: Intercalation of stearic acid. *Applied Clay Science*, 2011, vol. 51, pp. 117–125.
11. Zhang Z., Zhang J., Liao L., Xia Z. Synergistic effect of cationic and anionic surfactants for the modification of Ca-montmorillonite. *Materials Research Bulletin*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 1811–1816.
12. Fatimah I., Huda T. Preparation of cetyltrimethylammonium intercalated Indonesian montmorillonite for adsorption of toluene. *Journal of Polymer Science*, 2013, vol. 74, pp. 115–120.
13. Chalermpan K., Kasama J., Nitinat S. Effect of Clay Surface Modification on Physical Properties of Natural Rubber Nanocomposites. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 123, pp. 55–58.
14. Reyes L. Q. Morphology and Structure of Amino Fatty Acid Intercalated Montmorillonite. *Defect and Diffusion Forum*, 2017, vol. 382, pp. 44–50.
15. Galimberti M. *Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications*. New York, Published by Wiley & Sons, 2011. 632 p.
16. Hrachova J., Chodak B., Komadel P. Modification and characterization of montmorillonite fillers used in composites with vulcanized natural rubber. *Chemical Papers*, 2009, vol. 63, no. 1, pp. 55–61.
17. Rahim M. A., Ismail M., Kandil A. Effect of organophilization and interlamellar silylation of montmorillonite on compatibilization of polymer composites. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2016, vol. 10, no. 32, pp. 206–216. DOI: 10.12913/22998624/65121.

18. Giannelis E. P. Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced Materials*, 1996, vol. 8, pp. 29–35.
19. Gilman J. W. Flammability and thermal stability studies of polymer layered-silicate (clay) nano-composites. *Applied Clay Science*, 1999, vol. 15, pp. 31–49.
20. Butuc S. G., van Leerdam K., Rossenaar B., Swart J., Geurts F., Bossinga-Geurts B., Verwer P., Talma A. Elucidation of the role of ZnO in sulfur cure in novel EPDM-CTS blends. *Polymer Testing*, 2023, vol. 117, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2022.107843.
21. Junkong P., Morimoto R., Miyaji K., Tohsan A., Sakaki Y. Effect of fatty acids on the accelerated sulfur vulcanization of rubber by active zinc/carboxylate complexes. *RSC Advances*, 2020, vol. 10, pp. 4772–4785. DOI: 10.1039/c9ra10358a.
22. Bityukov V. K., Tikhomirov S. G., Ososhnik I. A., Popova L. V., Karmanova O. V., Tarasevich T. V. Technological additive for rubber compounds. Patent RU 2396293 C2, 2010 (In Russian).
23. Campos V., Tcacenco C. Synthesis of polycationic bentonite-ionene complexes and their benzene adsorption capacity. *Polímero*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 146–153.
24. Maseykov S. S., Kasperovich A. V., Bobrova V. V., Kolosovsky R. S., Tikhomirov S. G., Karmanova O. V. Influence of technologically active additive from secondary materials on the properties of model elastomer compositions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2025, no. 2 (295), pp. 34–42 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-5.
25. GOST 14925–79. Synthetic rubber cis-isoprene. Technical conditions. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979. 29 p. (In Russian).
26. 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).
27. 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).
28. GOST 10722–76. Method for Determining Viscosity and Pre-Vulcanization Ability. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 9 p. (In Russian).
29. El-Sabbagh S. H., Mahmoud D. S., Zawrah M. F., Ahmed N. M. Investigation on the properties of rubber composites containing modified clay. *Pigment & Resin Technology*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 131–142.
30. Maria H. J., Lyczko N., Nzihou A., Joseph K., Mathew C. Stress relaxation behavior of organically modified montmorillonite filled natural rubber/nitrile rubber nanocomposites. *Applied Clay Science*, 2014, vol. 87, pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.clay.2013.10.019.
31. Al-Shemmari F. H. J., Rabah A. A., Al-Mulla E. A. J., Alrahman N. O. M. Preparation and characterization of natural rubberlatex/modified montmorillonite clay nano-composite. *Research on Chemical Intermediates*, 2012, vol. 39, no. 9, pp. 1–9.
32. Dontsov A. A. *Protsessy strukturirovaniya elastomerov* [Elastomer structuring processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 287 p. (In Russian).
33. GOST 12535–84. Rubber mixtures. Method for determining vulcanization characteristics on a vulcameter. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 33 p. (In Russian).
34. Boonrasri S., Sae-Oui P., Reungsang A., Rachtanapun P. New Vegetable Oils with Different Fatty Acids on Natural Rubber Composite Properties. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 7, pp. 1–12. DOI: 10.3390/polym13071108.
35. Arayapranee W., Rempel G. L. Effects of Polarity on the Filler-Rubber Interaction and Properties of Silica Filled Grafted Natural Rubber Composites. *Journal of Polymers*, 2013, vol. 1, pp. 1–23.
36. Nayeemasae N., Adair A., Rasidi M. S. M., Jitsopin P., Masa A. Influence of Sepiolite Addition Methods and Contents on Physical Properties of Natural Rubber Composites. *Science and Technology Indonesia*, 2022, vol. 7, no. 2, pp. 140–148.

37. Alam M. N., Kumar V., Jeong S. U., Park S.-S. Enhancing Rubber Vulcanization Cure Kinetics: Lowering Vulcanization Temperature by Addition of MgO as Co-Cure Activator in ZnO-Based Cure Activator Systems. *Polymers*, 2024, vol. 16, p. 876. DOI: 10.3390/polym16070876.
38. Hayichelaer C., Nun-Anan P., Purbaya M., Boonkerd K. Unfilled Natural Rubber Compounds Containing Bio-Oil Cured with Different Curing Systems: A Comparative Study. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 12, pp. 1–16.
39. Hayichelaer C., Boonkerd K., Nun-Anan P., Purbaya M. Elucidation of the accelerated sulfur vulcanization of biooil-extended natural rubber compounds. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, vol. 33, no. 1, pp. 1–11.
40. Yur'yeva E. N. *Vliyaniye chisla uglevodorodnykh atomov na svoystva zhirnykh kislot* [The influence of the number of hydrocarbon atoms on the properties of fatty acids]. Yaroslavl, YPI Publ., 1978. 26 p. (In Russian).
41. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan, KNITU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).
42. Flory P. J., Rehner J. J. Statistical Mechanics of Cross-Linked Polymer Networks II. Swelling. *The Journal of Chemical Physics*, 1943, vol. 11, pp. 521–523. DOI: 10.1063/1.1723792.
43. GOST 270–75. Method for determining elastic strength properties under tension. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1975. 29 p. (In Russian).
44. GOST 263–75. Shore A hardness test method. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. 7 p. (In Russian).
45. Insarova G. N. *Vliyaniye poverkhnostno aktivnykh veshchestv na pererabotku rezinovykh smesey i svoystva rezin* [The influence of surfactants on the processing of rubber compounds and the properties of rubber]. Moscow, TsNIITE Neftekhim Publ., 1980. 30 p. (In Russian).

Информация об авторах

Масейков Сергей Сергеевич – заместитель директора по качеству. ЗАО «Амкодор-Эластомер» (Фанипольский с/с, 22, 222750, Минская область, Дзержинский район, Республика Беларусь); соискатель. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.maseykov@mail.ru.

Касперович Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: andkasp@mail.ru. SPIN-код: 1779-1330. Scopus ID: 6701354172. ORCID: 0000-0003-4403-6235. ResearcherID: M-8725-2014.

Боброва Валерия Владимировна – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bobrova@belstu.by. SPIN-код: 9899-4087. Scopus ID: 57216373854. ORCID: 0009-0005-7417-194X. ResearcherID: MCJ-2869-2025.

Колосовский Роман Светославович – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: timesnewroma31026p3s@mail.ru.

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fvs_maxp@belstu.by. SPIN-код: 8832-6166. Scopus ID: 6508059730. ORCID: 000-0002-4126-8850. ResearcherID: KPB-3718-2024.

Боровский Денис Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный

технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dzianis.borovskiy@belstu.by. SPIN-код: 5870-3053. Scopus ID: 57202264242. ORCID: 0000-0001-9698-2464. ResearcherID: B-4902-2018.

Тихомиров Сергей Германович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем. Воронежский государственный университет инженерных технологий (пр-т Революции, 19, 394036, г. Воронеж, Российская Федерация). E-mail: tikhomirov_57@mail.ru. SPIN-код: 2010-7100. Scopus ID: 56258071400. ORCID: 0000-0002-8192-0049. ResearcherID: D-7046-2014.

Карманова Ольга Викторовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии органических соединений и переработки полимеров. Воронежский государственный университет инженерных технологий (пр-т Революции, 19, 394036, г. Воронеж, Российская Федерация). E-mail: karolga@mail.ru. SPIN-код: 6289-1989. Scopus ID: 6506895263. ORCID: 0000-0003-2226-6582. ResearcherID: D-7259-2014.

Information about the authors

Maseykov Sergey Sergeevich – Deputy Director for Quality. JSC “Amkodor-Elastomer” (22 Fanipolskiy village council, 222750, Dzerzhinskiy district, Minsk, Republic of Belarus); external doctorate student. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.maseykov@mail.ru.

Kasperovich Andrey Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andkasp@mail.ru. SPIN code: 1779-1330. Scopus ID: 6701354172. ORCID: 0000-0003-4403-6235. ResearcherID: M-8725-2014.

Bobrova Valeriya Vladimirovna – PhD (Engineering), researcher, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bobrova@belstu.by. SPIN code: 9899-4087. Scopus ID: 57216373854. ORCID: 0009-0005-7417-194X. ResearcherID: MCJ-2869-2025.

Kolosovsky Roman Svetoslavovich – student. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: timesnewroma31026p3s@mail.ru.

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs_maxp@belstu.by. SPIN code: 8832-6166. Scopus ID: 6508059730. ORCID: 000-0002-4126-8850. ResearcherID: KPB-3718-2024.

Borovsky Denis Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dzianis.borovskiy@belstu.by. SPIN code: 5870-3053. Scopus ID: 57202264242. ORCID: 0000-0001-9698-2464. ResearcherID: B-4902-2018.

Tikhomirov Sergey Germanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Information and Control Systems. Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: tikhomirov_57@mail.ru. SPIN code: 2010-7100. Scopus ID: 56258071400. ORCID: 0000-0002-8192-0049. ResearcherID: D-7046-2014.

Karmanova Olga Viktorovna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing. Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: karolga@mail.ru. SPIN code: 6289-1989. Scopus ID: 6506895263. ORCID: 0000-0003-2226-6582. ResearcherID: D-7259-2014.

Поступила 05.10.2025