УДК 678.046.3

С. С. Масейков[1], А. В. Касперович[2], В. В. Боброва[2], Р. С. Колосовский,[2]
С. Г. Тихомиров[2], О. В. Карманова[3]
[1]ЗАО «Амкодор-Эластомер»
[2]Белорусский государственный технологический университет
[3]Воронежский государственный университет инженерных технологий (Российская Федерация)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ДОБАВКИ ИЗ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Исследованы реологические, кинетические, физико-механические свойства и структурные характеристики пространственной сетки вулканизатов, содержащих технологически активную добавку из вторичных материалов. В качестве объектов исследования применяли модельные эластомерные композиции на основе бутадиен-нитрильного (БНКС-18АМН) и изопренового каучуков (СКИ-3). В данной работе использовалась технологически активная добавка (ТАД-ЖК), представляющая собой органо-минеральный комплекс на основе смеси жирных кислот и природного бентонита, полученный модификацией сопутствующих продуктов рафинации масла подсолнечника при введении сернокислого алюминия и ферментного препарата производства ООО «Совтех». Данная добавка применялась в модельных эластомерных композициях различного назначения в качестве частичной и/или полной замены вулканизующей системы. Анализ технологических свойств исследуемых резиновых смесей показал, что замена вулканизующей группы на ТАД-ЖК приводит к росту показателя вязкости по Муни с увеличением дозировки добавки, а также способствует повышению стойкости к преждевременной подвулканизации и снижению времени достижения оптимума вулканизации при замене 60% ингредиентов вулканизующей системы. Определено, что показатель условной прочности при растяжении резин на основе СКИ-3, содержащих ТАД-ЖК в качестве замены 30% вулканизующей группы, выше, чем у модельного образца, а для вулканизатов на основе БНКС-18АМН – находится на его уровне. Исследования эластических свойств резин различного назначения продемонстрировали увеличение показателя относительного удлинения при разрыве с повышением дозировки ТАД-ЖК. Стоит отметить, что полная (100%-ная) замена вулканизующей группы на ТАД-ЖК в композициях невозможна.

Ключевые слова: технологически активная добавка, эластомерные композиции, вязкость, кинетика, прочность.

Для цитирования: Масейков С. С., Касперович А. В., Боброва В. В., Колосовский Р. С., Тихомиров С. Г., Карманова О. В. Влияние технологически активной добавки из вторичных материалов на свойства модельных эластомерных композиций // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 34–42.
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-5.

S. S. Maseykov[1], A. V. Kasperovich[2], V. V. Bobrova[2], R. S. Kolosovsky,[2]
S. G. Tikhomirov[3], O. V. Karmanova[2]
[1]JSC “Amkodor-Elastomer”
[2]Belarusian State Technological University
[3]Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation)

INFLUENCE OF TECHNOLOGICALLY ACTIVE ADDITIVE FROM SECONDARY MATERIALS ON THE PROPERTIES OF MODEL ELASTOMER COMPOSITIONS

The rheological, kinetic, physical and mechanical properties and structural characteristics of the spatial network of vulcanizates containing a technologically active additive made of secondary materials were studied. Model elastomer compositions based on butadiene-nitrile (BNKS-18AMN) and isoprene rubbers (SKI-3) were used as objects of study. In this work, a technologically active additive (TAA-FA), which was an organo-mineral complex based on a mixture of fatty acids and natural bentonite was used. The complex was obtained by modifying the by-products of sunflower oil refining with the introduction of aluminum sulfate and an enzyme preparationproduced by PC Sovtekh. This additive was used in model elastomer compositions for various purposes as a partial and/or complete replacement of the vulcanizing system. The analysis of the technological properties of the studied rubber compounds showed that the replacement of the vulcanizing group with TAA-FA leads to an increase in the Mooney viscosity index with an increase in the dosage of the additive, and also contributes to an increase in resistance

to premature scorch and a decrease in the time to achieve the vulcanization optimum when replacing 60% of the ingredients of the vulcanizing system. It was determined that the conditional tensile strength index of rubbers based on SKI-3, containing TAA-FA as a replacement for 30% of the vulcanizing group, is higher than that of the model sample, and for vulcanizates based on BNKS-18AMN is at its level. Studies of the elastic properties of rubbers for various purposes have shown that an increase in the relative elongation at break index with an increase in the dosage of TAA-FA. It should be noted that a complete (100%) replacement of the vulcanizing group with TAA-FA in the compositions is impossible.

Keywords: technologically active additive, elastomer compositions, viscosity, kinetics, strength.

For citation: 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. *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.

Введение. Экологические проблемы, связанные с применением синтетических пластификаторов и мягчителей, вызвали интенсивный поиск устойчивых альтернатив в области полимерного материаловедения. Поскольку потребность в биоразлагаемых материалах становится все более актуальной, исследование добавок на основе биомассы рассматривается как многообещающий подход к снижению негативного воздействия полимерных материалов на окружающую среду [1]. Среди этих добавок интеграция натуральных масел в качестве пластификаторов и мягчителей приобрела значительную известность в последние годы благодаря ряду преимуществ [2]. Международный союз теоретической и прикладной химии (ИЮПАК) определяет пластификаторы и мягчители как вещества, добавляемые к полимерам для улучшения определенных свойств, таких как гибкость, пластичность и др. [3]. Эти добавки играют решающую роль в изменении эксплуатационных характеристик полимеров, позволяя использовать их в широком спектре. Хотя основная функция добавок заключается в улучшении технологичности и механических свойств полимеров, их присутствие настолько значимо, что они считаются неотъемлемой частью рецептур, а не просто добавками [4]. По мере роста потребительского спроса на более безопасные и более устойчивые альтернативы разработка пластификаторов и мягчителей на основе биомассы приобретает все большую популярность. Такие натуральные компоненты предлагают многообещающий путь к улучшению устойчивости полимерных материалов при сохранении или улучшении желаемых свойств полимеров [5]. Натуральные масла, характеризующиеся разнообразным химическим составом и функциональными возможностями, представляют собой жизнеспособные компоненты для улучшения свойств полимеров. Включение данных масел в полимерные матрицы направлено не только на улучшение механических характеристик, но и на содействие более устойчивому и экологичному подходу к полимерному материаловедению [6–8].

В связи со стабилизацией ассортимента каучуков и основных ингредиентов резиновых смесей для создания резин с новыми свойствами весьма перспективным является использование новых химических добавок полифункционального действия. При смешении каучуков с такими добавками образуются композиции, применение которых позволяет в значительной степени изменить свойства как резиновых смесей, так и полученных на их основе резин. Возможность использования полифункциональных добавок связана с их химическим строением, агрегатным состоянием и влиянием на структуру эластомерных композиций. Правильный подбор и введение добавок в резиновую смесь может облегчать ее переработку (эффект пластификации), изменять клейкость, когезионную прочность, параметры вулканизации и многие другие характеристики. В зависимости от химического строения и количества полифункциональных добавок существенно изменяются и свойства резин, полученных из таких композиций (эластичность, морозостойкость и теплостойкость, прочность, динамические и усталостные характеристики, твердость и сопротивление истиранию и т. д.). Эффективность использования добавок в каждой конкретной композиции зависит от совокупности химических и коллоидно-химических характеристик композиции и способов ее переработки. Важными являются факторы совместимости каучука и добавок, характер диффузии добавок и степень ассоциации молекул в эластомерной матрице, вызывающие изменение различных физических свойств композиции, а также степень воздействия на химические реакции в эластомерной композиции при ее вулканизации или в условиях эксплуатации. Более важным представляется совокупность факторов, определяющих взаимодействие добавок с каучуком при вулканизации и дальнейшее изменение образующихся продуктов в условиях эксплуатации резины. Поэтому наиболее эффективное применение добавок в композициях с каучуком должно основываться на знании закономерностей изменений под их влиянием структуры композиции, а для

выбора конкретных добавок необходимо проведение специальных экспериментов. Несмотря на большое количество работ, посвященных этому вопросу [9, 10], влияние технологических добавок на вулканизацию и свойства резин недостаточно выяснено. В этой связи исследование, разработка и последующее внедрение новой многофункциональной технологически активной добавки, в том числе доступных продуктов переработки масел, минерального сырья в качестве ингредиентов резиновой смеси с целью удовлетворения возрастающей потребности резиновой промышленности, представляется весьма актуальной задачей.

Основная часть. Цель данной работы – исследование влияния технологически активной добавки (ТАД-ЖК) на основе вторичного сырья при частичной и/или полной замене вулканизующей группы на реологические, кинетические, физико-механические и структурные характеристики эластомерных композиций на основе каучуков общего и специального назначения.

Применяемая в данной работе ТАД-ЖК представляет собой органо-минеральный 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) [11].

Морфологию и структуру образца ТАД-ЖК (рис. 1) анализировали на сканирующем растровом электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония). Исследуемая добавка имеет однородную и плотную форму с прочными агломератами. При этом форма и размер частиц весьма разнообразны – от чешуйчатых до остроугольных.

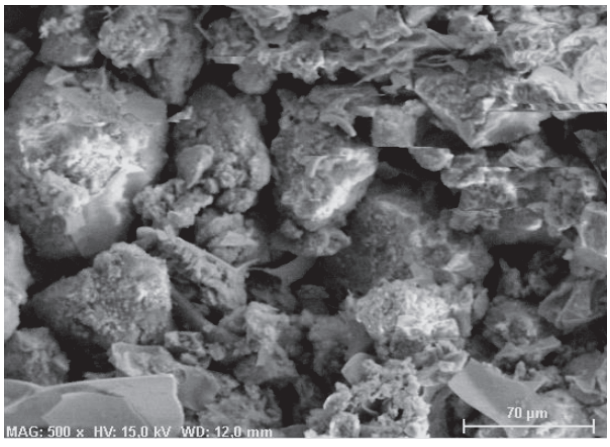

Рис. 1. SEM-изображение технологически активной добавки

Элементный состав поверхности ТАД-ЖК, полученный с помощью флуоресцентного спектрометра EDXQuantox-200 (Bruker, Германия), представлен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав ТАД-ЖК

Элементы	Содержание, мас. %
O	51,99
C	20,02
Si	11,83
Al	5,91
S	3,31
Mg	2,33
Zn	1,50
Fe	1,26
Na	0,47
K	0,79
Ca	0,35
Ti	0,18
P	0,06

Исследуемая технологическая добавка характеризуется аналогичным набором элементов, присущим известным глинистым минералам (каолинит, шунгит, палыгорскит и т. д.), однако отличает ее наличие высокого количества углерода, который присутствует в органической составляющей продуктов рафинации масла подсолнечника (40,5–50,9%), входящего в состав ТАД-ЖК [12]. Кроме того, наличие металлов (до 13,0%) и серы (более 3,0%) в исследуемой добавке может оказывать существенное влияние на кинетические параметры переработки резиновых смесей.

Данная работа направлена на исследование возможности замены вулканизующей группы на технологически активную добавку природного происхождения ввиду того, что производитель ТАД-ЖК позиционирует ее как добавку для частичной замены жирных кислот. Однако стоит отметить, что наличие углеродной и кремнеземной составляющей в исследуемой добавке может служить поводом для исследований ТАД-ЖК в качестве частичной замены наполнителей в рецептурах резиновых смесей.

Для оценки возможности применения технологически активной добавки в качестве частичной и/или полной замены вулканизующей системы, а также для установления влияния данной замены на основные реологические и физико-механические свойства резин были изготовлены модельные резиновые смеси на основе бутадиен-нитрильного (БНК) и изопренового (СКИ-3) каучуков (табл. 2) [13, 14].

В рецептурах исследуемых модельных резиновых смесей осуществлялась различная процентная замена (30%, 60% и 100% от общей дозировки) вулканизующей группы (сера, альтакс, цинковые белила, гуанидин Ф, стеариновая кислота, сульфенамид Ц) на ТАД-ЖК. Дозировка вводимой технологически активной добавки была прямо пропорциональна суммарной дозировке, на которую была уменьшена вулканизующая группа.

Таблица 2

Рецептуры модельных эластомерных композиций

Наименование ингредиента	Резиновая смесь на основе / Содержание ингредиентов, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука	
	БНКС-18 АМН	СКИ-3
БНКС-18 АМН	100,0	–
СКИ-3	–	100,0
Сера	1,7	1,0
Белила цинковые	3,0	5,0
Стеариновая кислота	1,0	2,0
Сульфенамид Ц	1,0	–
Альтакс	–	0,6
Гуанидин Ф	–	3,0

Показатель вязкости эластомерных композиций влияет на производительность технологического процесса переработки резиновых смесей, а также на качество готовой продукции. Определение вязкости по Муни является одним из наиболее распространенных способов исследования молекулярной структуры эластомерных композиций. Выявление пластоэластических свойств резиновых смесей проводилось на сдвиговом дисковом вискозиметре MV2000 в соответствии с ГОСТ 10722–76 [15]. На рис. 2 приведены результаты исследований по определению вязкости по Муни эластомерных композиций на основе каучуков общего и специального назначения с различным содержанием ТАД-ЖК.

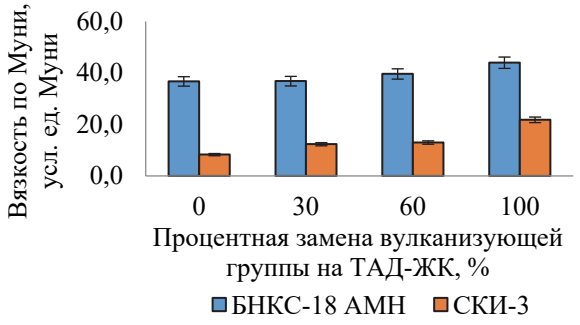

Рис. 2. Зависимости изменения вязкости по Муни резиновых смесей различного назначения от процентного содержания ТАД-ЖК

Установлено, что частичная и полная замены вулканизующей группы на технологически активные добавки в резиновых смесях на основе каучуков общего и специального назначения приводит к росту показателя вязкости по Муни с увеличением дозировки ТАД-ЖК, что придает жесткость резиновой смеси. Так, значение показателя вязкости по Муни модельной резиновой смеси на основе каучука специального назначения БНКС-18 АМН, содержащей вулканизующую группу согласно нормативно-технической документации, составляет 36,7 усл. ед. Муни, а для резин с ТАД-ЖК находится в диапазоне от 36,8 до 44,0 усл. ед. Муни. Аналогичная тенденция изменения вязкости определена и для резиновых смесей на основе каучука общего назначения СКИ-3. Выявленный характер изменения свойств резиновых смесей, вероятно, обусловлен эффектом 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 [16, 17].

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 при повышенной температуре. Процесс вулканизации вызывает образование вулканизационных узлов (поперечных связей). Поперечные связи ограничивают перемещения макромолекул при механическом воздействии [18].

В табл. 3 представлены кинетические параметры процесса вулканизации модельных эластомерных композиций на основе каучуков различного назначения с исследуемой ТАД-ЖК. Испытание по определению кинетики вулканизации резиновых смесей осуществляли на реометре ODR2000 согласно ГОСТ 12535–84 [19].

Таблица 3

Кинетические параметры процесса вулканизации эластомерных композиций с разным наполнением ТАД-ЖК

Резиновая смесь на основе	↓	M_L, дН·м	M_H, дН·м	t_{s2}, мин	t_{90}, мин	ΔM, дН·м
СКИ-3	0%	1,61	15,73	1,31	37,22	14,12
	30%	2,05	14,80	1,32	6,80	12,75
	60%	2,15	7,83	3,41	7,32	6,29
	100%	2,21	2,67	–	–	0,46
БНКС-18АМН	0%	2,48	20,75	5,53	15,03	18,27
	30%	2,67	13,86	6,25	10,62	11,19
	60%	2,66	6,11	11,76	18,29	3,49
	100%	2,83	3,03	–	–	0,20

Примечание. ↓ – процентная замена вулканизующей 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} – показатель скорости вулканизации, дН·м/мин; ΔM – разность между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН·м.

Из полученных данных видно, что введение в резиновую смесь ТАД-ЖК в качестве замены вулканизующей группы в различных дозировках вызывает рост минимального крутящего момента (M_L) с увеличением дозировки ТАД-ЖК по сравнению

с исходной композицией до 37,3% для композиций на основе БНКС-18 АМН и до 14,1% – на основе СКИ-3. Минимальный крутящий момент косвенно позволяет охарактеризовать вязкоупругие свойства резиновых смесей [20], что подтверждается полученными данными исследования показателя вязкости по Муни резиновых смесей. Максимальный крутящий момент (M_H) допускает оценку свойств вулканизатов, его увеличение или уменьшение свидетельствует об изменении структуры резин [21]. Введение в резиновые смеси исследуемой ТАД-ЖК вызывает снижение (до 83,0% для композиций на основе БНКС-18 АМН и до 85,4% – на основе СКИ-3) максимального крутящего момента исследуемых резиновых смесей по сравнению с исходными композициями.

Следует отметить, что разница между максимальным и минимальным крутящими моментами (ΔM) характеризует плотность поперечного сшивания резин [22]. Эластомерные композиции, наполненные ТАД-ЖК, имеют меньшие значения данного показателя по сравнению с исходной резиновой смесью. Введение в резиновые смеси исследуемой ТАД-ЖК в качестве 30% замены вулканизующей группы снижает ΔM на 3,7% для композиций на основе БНКС-18АМН и на 38,8% – на основе СКИ-3. При увеличении содержания ТАД-ЖК в резиновой смеси данный показатель резко уменьшается до 98,9%. Снижение ΔM связано с тем, что замена вулканизующей группы на ТАД-ЖК свыше 30% фактически не влияет на процесс формирования поперечных связей в резине.

Введение технологически активной добавки в резиновые смеси на основе каучуков различного назначения в качестве замены вулканизующей группы до 60% приводит к повышению стойкости к преждевременной подвулканизации (t_{s2}) до 2,6 и 2,1 раза для композиций на основе БНКС-18 АМН и СКИ-3, соответственно. В случае полной замены вулканизующей группы на ТАД-ЖК как процесс преждевременной вулканизации, так и процесс вулканизации не наблюдаются. Уменьшение времени достижения оптимума вулканизации резиновых смесей на основе СКИ-3 до 5,1 раза и до 2,4 раза для БНКС-18 АМН, содержащих 30 и 60% ТАД-ЖК в качестве замены вулканизующей группы, может быть обусловлено тем, что непрореагировавшие жирные кислоты, присутствующие в технологической добавке, могут действовать как активаторы вулканизации. Данные кислоты могут реагировать с оксидом цинка с образованием стеарата цинка. Затем стеарат цинка вступает в реакцию с серой и ускорителями вулканизации, при этом время вулканизации сокращается [23]. Полученные данные по кинетическим параметрам вулканизации резиновых смесей свидетельствуют о невозможности применения технологически активной добавки на основе вторичных материалов в качестве замены более 30% вулканизующей группы в резиновых смесях на основе каучуков различного назначения, так как исследуемая добавка не обладает необходимой реакционной способностью для образования вулканизационной сетки.

Резина выступает продуктом вулканизации каучука. В процессе вулканизации происходит сшивание линейных макромолекул каучука поперечными связями в трехмерную сетку, которая и обусловливает изменение различных свойств готовых изделий. Одной из важнейших структурных характеристик аморфных сетчатых полимеров является степень поперечного сшивания. Молекулярная масса участка цепи между соседними узлами характеризует плотность сетки. Таким образом, степень поперечного сшивания (плотность пространственной сетки) показывает число молей цепей сетки в единице объема. Для каждого сетчатого полимера существует максимально возможная степень поперечного сшивания, зависящая от химического строения и содержания реакционноспособных групп. Наиболее часто плотность цепей сетки исследуют методом равновесного набухания вулканизата. Для характеристики пространственной сетки резин используют такие показатели, как средняя молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между двумя поперечными связями (M_c), плотность поперечного сшивания резин (ν) и количество поперечных связей в 1 см^3 вулканизата (n) [21]. В табл. 4 представлены результаты определения показателей пространственной сетки модельных эластомерных композиций с ТАД-ЖК.

Таблица 4

Показатели пространственной сетки модельных эластомерных композиций, содержащих ТАД-ЖК

Резиновая смесь на основе	↓	M_c, кг/моль	$n\cdot10^{-19}$, см$^{-3}$	$\nu\cdot10^{5}$, моль/см^3
СКИ-3	0%	25691,3	2,14	3,55
	30%	29277,1	1,87	3,11
	60%	104701,1	0,53	0,87
	100%	–	–	–
БНКС-18АМН	0%	26281,8	2,20	3,65
	30%	48310,3	1,20	1,99
	60%	104951,1	0,51	0,92
	100%	–	–	–

Анализ данных показал, что с увеличением дозировки технологически активной добавки, применяемой в качестве замены вулканизующей группы в составе эластомерных композиций как на основе каучука общего, так и специального назначений, уменьшается плотность поперечного сшивания до 75,5 и 74,8%, соответственно.

Аналогично происходит уменьшение показателя, характеризующего количество поперечных связей в 1 см^3 вулканизата. Выявленный характер изменения показателей пространственной сетки модельных эластомерных композиций с увеличение дозировки ТАД-ЖК свидетельствует о низкой способности добавки участвовать в процессе образования сетчатой структуры вулканизата.

Для оценки влияния ТАД-ЖК на свойства резин были найдены физико-механические показатели вулканизатов, а именно условная прочность при растяжении ($f_р$), относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_р$), а также твердость по Шору А. Испытания по определению упруго-прочностных свойств резин проводились согласно ГОСТ 270–75 [24] и твердости по Шору А в соответствии с ГОСТ 263–75 [25].

В табл. 5 представлены результаты определения физико-механических показателей исследуемых резин, содержащих технологически активную добавку на основе вторичных материалов в различных дозировках в качестве замены вулканизующей группы.

Таблица 5

Физико-механические свойства исследуемых резин

Резиновая смесь на основе	↓	$f_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %	Твердость по Шору А, усл. ед. Шор
СКИ-3	0%	11,1	760	30
	30%	19,0	700	28
	60%	0,9	1000	12
	100%	–	–	–
БНКС-18АМН	0%	1,7	250	38
	30%	1,7	410	31
	60%	2,0	1440	22
	100%	–	–	–

Анализ полученных данных выявил, что введение в резиновые смеси на основе СКИ-3 30% технологически активной добавки на основе вторичных материалов в качестве замены вулканизующей группы приводит к увеличению условной прочности при растяжении на 71,2% и незначительному (на 3 усл. ед.) снижению твердости по Шору А. Дальнейшее увеличение процентного содержания ТАД-ЖК по отношению к вулканизующей группе вызывает резкое снижение прочностных показателей резин. Повышение условной прочности резин на основе СКИ-3, вероятно, связано с тем, что жирные кислоты, входящие в состав ТАД-ЖК, делают поверхность добавки гидрофобной, а это увеличивает совместимость ее с неполярным полимером.

В случае применения ТАД-ЖК в эластомерных композициях на основе БНКС-18 АМН определено увеличение значений показателя $f_р$ до 17,6% и показателя $\varepsilon_р$ до 5,8 раза. Однако твердость по Шору А резин с ТАД-ЖК снижается с увеличением содержания последнего до 16 усл. ед. Шор. Повышение относительного удлинения при разрыве может быть связано как с получением резин с меньшей плотностью сшивки, что и обусловливает более высокие эластические свойства вулканизатов, так и с возникновением скольжения молекулярных цепей каучука с поверхности ТАД-ЖК [26].

Заключение. Установлены особенности влияния частичной и/или полной замены ингредиентов вулканизующей группы на технологически активную добавку из вторичных материалов на технологические, физико-механические и структурные характеристики модельных композиций на основе каучуков общего и специального назначения.

Определена целесообразность замены до 30% вулканизующей группы на ТАД-ЖК, так как в данном случае улучшаются кинетические параметры переработки резиновых смесей (стойкость к подвулканизации улучшается ~ в 2 раза, а время достижения оптимума вулканизации сокращается ~ в 5 раз) и сохраняются упруго-прочностные характеристики исследуемых вулканизатов. Однако ввиду специфического элементного состава ТАД-ЖК планируются дальнейшие исследования, направленные на использование данной добавки в качестве отдельных ингредиентов вулканизующей системы и в качестве наполнителя для резин.

Список литературы

1. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review / M. G. A. Vieira [et al.] // European Polymer Journal. 2011. Vol. 47. P. 254–263. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011.

2. Recent advances in bio-based functional additives for polymers / V. Marturano [et al.] // Progress in Materials Science. 2023. Vol. 139. P. 101186. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101186.

3. Oh E., Kim B. A Trend and Market in Eco-friendly Plasticizers: Review and Prospective // Composites Research. 2022. Vol. 35. P. 232–241.

4. Synthesis of plasticizer ester using acid-functionalized ionic liquid as catalyst / C. Xie [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 151. P. 847–850. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.113.

5. Plasticizers Derived from Biomass Resources: A Short Review / P. Jia [et al.] // Polymers. 2018. Vol. 10. P. 1303. DOI: 10.3390/polym10121303.

6. Influence of Plasticizers Basing on Renewable Sources on the Deformation and Fracture Behaviour of Elastomers / M. M. Rahman [et al.] // Advances in Polymer Science. 2020. Vol. 286. P. 331–346. DOI: 10.1007/12_2020_77.

7. Exploring the Impact of Bio-Based Plasticizers on the Curing Behavior and Material Properties of a Simplified Tire-Tread Compound / F. van Elburg [et al.] // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 1880. DOI: 10.3390/polym16131880.

8. Karunanayake L. Epoxidized vegetable oils as processing aids and activators in carbon-black filled natural rubber compounds // Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka. 2021. Vol. 39, no. 3. P. 244–252.

9. Multifunctional Additives as Zinc-Free Curatives for Sulfur Vulcanization / G. Heideman [et al.] // Rubber Chemistry and Technology. 2006. Vol. 79, no. 4. P. 561–588. DOI: 10.5254/1.3547952.

10. Preparation of Multifunctional Additive [MFA] from Castor Oil (CO) and Study of its Effects on the Physical Properties of Natural Rubber Vulcanizates / K. K. Ajekwene [et al.] // International Journal of Research in Advent Technology. 2023. Vol. 11, no. 3. P. 1–10.

11. Технологическая добавка для резиновых смесей: пат. RU 2 396 293 C2 / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, И. А. Осошник, Л. В. Попова, О. В. Карманова, Т. В. Тарасевич. Опубл. 10.08.10.

12. Studying the regularities of thermal decomposition of sunflower husk under conditions of high-speed heating / A. Topal [et al.] // Power engineering economics technique ecology. 2024. Vol. 3. P. 170–183.

13. Синтетические каучуки БНКС: ТУ 38.30313–2006. Красноярск: Изд-во Краснояр. з-да синтетич. каучука, 2007. 35 с.

14. Каучук синтетический цис-изопреновый. Технические условия: ГОСТ 14925–79. М.: Изд-во стандартов, 1979. 29 с.

15. Метод определения вязкости и способности к преждевременной вулканизации: ГОСТ 10722–76. М.: Изд-во стандартов, 1976. 9 с.

16. 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. P. 279529.

17. 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.

18. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. М.: Химия, 1978. 287 с.

19. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулкаметре: ГОСТ 12535–84. М.: Изд-во стандартов, 1985. 33 с.

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

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

22. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.

23. The influence of modified soybean oil as processing aids in tire application / C. Siriwong [et al.] // Polymer Bulletin. 2010. Vol. 78, no. 3. P. 1–18. DOI: 10.1007/s00289-020-03296-z.

24. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75. М.: Изд-во стандартов, 1975. 29 с.

25. Метод определения твердости по Шору А: ГОСТ 263–75. М.: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.

26. Development and Characterization of Unmodified and Modified Natural Rubber Composites Filled with Modified Clay / A. Keereerak [et al.] // Polymers. 2022. Vol. 14, no. 17. P. 3515.

References

1. Vieira M. G. A., da Silva M. A., dos Santos L. O., Beppu M. M. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, pp. 254–263. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011.

2. Marturano V., Marotta A., Salazar S. A., Ambrogi V., Cerruti P. Recent advances in bio-based functional additives for polymers. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 139. P. 101186. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101186.

3. Oh E., Kim B. A Trend and Market in Eco-friendly Plasticizers: Review and Prospective. *Composites Research*, 2022, vol. 35, pp. 232–241.

4. Xie C., Li H., Li L., Yu S., Liu F. Synthesis of plasticizer ester using acid-functionalized ionic liquid as catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 151, pp. 847–850. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.113

5. Jia P., Xia H., Tang K., Zhou Y. Plasticizers Derived from Biomass Resources: A Short Review. *Polymers*, 2018, vol. 10. P. 1303. DOI: 10.3390/polym10121303.

6. Rahman M. M., Oßwald K., Langer B., Reincke K. Influence of Plasticizers Basing on Renewable Sources on the Deformation and Fracture Behaviour of Elastomers. *Advances in Polymer Science*, 2020, vol. 286, pp. 331–346. DOI: 10.1007/12_2020_77.

7. van Elburg F., Grunert F., Aurisicchio C., di Consiglio M., di Ronza R., Talma A., Bernal-Ortega P., Blume A. Exploring the Impact of Bio-Based Plasticizers on the Curing Behavior and Material Properties of a Simplified Tire-Tread Compound. *Polymers*, 2024, vol. 16. P. 1880. DOI: 10.3390/polym16131880.

8. Karunanayake L. Epoxidized vegetable oils as processing aids and activators in carbon-black filled natural rubber compounds. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 2021, vol. 39, no. 3, pp. 244–252.

9. Heideman G., Noordermeer J. W. M., Datta R. N., van Baarle B. Multifunctional Additives as Zinc-Free Curatives for Sulfur Vulcanization. *Rubber Chemistry and Technology*, 2006, vol. 79, no. 4, pp. 561–588. DOI: 10.5254/1.3547952.

10. Ajekwene K. K., Oboh J. O., Ugo U. K., Ichetaon S. I. Preparation of Multifunctional Additive [MFA] from Castor Oil (CO) and Study of its Effects on the Physical Properties of Natural Rubber Vulcanizates. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 1–10.

11. Tikhomirov S. G. Technological additive for rubber compounds. Patent RU 2 396 293 C2, 2010 (In Russian).

12. Topal A., Haponych L., Holenko I., Kobzar S. Studying the regularities of thermal decomposition of sunflower husk under conditions of high-speed heating. *Power engineering economics technique ecology*, 2024, vol. 3, pp. 170–183.

13. TC 38.30313–2006. Synthetic rubbers BNKS. Krasnoyarsk, Izdatel'stvo Krasnoyarskogo zavoda sinteticheskogo kauchuka Publ., 2007. 35 p. (In Russian).

14. GOST 14925–79. Synthetic rubber cis-isoprene. Technical conditions. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979. 29 p. (In Russian).

15. GOST 10722–76. Method for Determining Viscosity and Pre-Vulcanization Ability. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 9 p. (In Russian).

16. 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. P. 279529.

17. Hayeemasae 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.

18. Dontsov A. A. *Protsessy strukturirovaniya elastomerov* [Elastomer structuring processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 287 p. (In Russian).

19. GOST 12535–84. Rubber mixtures. Method for determining vulcanization characteristics on a vulcameter. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 33p. (In Russian).

20. 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, Sant-TM Publ., 2001. 400 p. (In Russian).

21. 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).

22. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. Status and directions of development]. Kazan, KGTU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).

23. Siriwong C., Khansawai P., Boonchiangma S., Sirisinha C., Sae-Oui P. The influence of modified soybean oil as processing aids in tire application. *Polymer Bulletin*, 2010, vol. 78, no. 3, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00289-020-03296-z.

24. GOST 270–75. Method for determining elastic strength properties under tension. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1975. 29 p. (In Russian).

25. GOST 263–75. Shore A hardness determination method. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. 7 p. (In Russian).

26. Keereerak A., Sukkhata N., Lehman N., Nakaramontri Y., Sengloyluan K., Johns J., Kalkornsurapranee E. Development and Characterization of Unmodified and Modified Natural Rubber Composites Filled with Modified Clay. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 17. P. 3515.

Информация об авторах

Масейков Сергей Сергеевич – заместитель директора по качеству. ЗАО «Амкодор-Эластомер» (Фанипольский с/с, 22, 222750, Дзержинский район, Минская область, Республика Беларусь); соискатель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 22006, 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, 22006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: andkasp@mail.ru

Боброва Валерия Владимировна – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 22006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bobrova@belstu.by

Колосовский Роман Святославович – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 22006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: timesnewroma31026p3s@mail.ru

Тихомиров Сергей Германович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем. Воронежский государственный университет инженерных технологий (пр. Революции, 19, 394036, г. Воронеж, Российская Федерация). E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

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

Information about the authors

Maseykov Sergey Sergeyevich – Deputy Director for Quality at JSC "Amkodor-Elastomer" (22, Fanipolsky village council, 222750, Dzerzhinsky district, Minsk Region, Republic of Belarus); external doctorate student, the Department of Polymer Composite Materials.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

Bobrova Valerya Vladimirovna – PhD (Engineering), Researcher, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lerik_bobrik94@mail.ru

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

Tikhomirov Sergey Germanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Information and Control Systems. Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolution Ave, 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

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 Revolution Ave, 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: karolga@mail.ru

Поступила 25.04.2025