

УДК 678.046.3

А. В. Касперович¹, В. В. Боброва¹, С. А. Ефремов², С. В. Нечипуренко²¹Белорусский государственный технологический университет²Казахский национальный университет имени аль-Фараби**ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОД-КРЕМНИСТОГО ГИБРИДНОГО
НАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗИРОВАННЫХ ОТХОДОВ
ПРОИЗВОДСТВА РИСА В ПРОТЕКТОРНОЙ ЧАСТИ ШИНЫ**

Утилизация агропромышленных отходов является одной из основных экологических проблем. Благодаря наличию кремнезема в некоторых отходах сельскохозяйственных культур, данные материалы можно использовать в различных отраслях промышленности для замены коммерческих продуктов. Целью работы являлось изучение основных технологических, физико-механических и упруго-гистерезисных свойств эластомерных композиций на основе синтетического бутадиен-стирольного каучука, предназначенных для изготовления протекторной части летней легковой шины, при частичной замене (10,0 и 20,0 мас. ч.) высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя Экстрасил ВД150 на углерод-кремнистый наполнитель, полученный путем карбонизации в пиролизной печи отходов производства риса при температуре 550–600°C. Определено, что замена Экстрасил ВД150 в дозировке до 20 мас. ч. на углерод-кремнистый наполнитель в протекторных резинах приводит к уменьшению показателя вязкости по Муни до 5,3% и оптимального времени вулканизации до 9,2%, повышению пластической деформации до 7,7% и клейкости резиновых смесей на 31,3–34,4%, снижению модуля потерь и тангенса механических потерь до 24,0 и 14,3% соответственно, увеличению эластичности по отскоку до 6,3% и усталостной выносливости до 2,7 тыс. циклов, а также уменьшению температуры внутри образца до 4,7%. Однако установлено, что применение 20,0 мас. ч. углерод-кремнистого наполнителя вызывает существенное снижение прочностных показателей исследуемых резин (условной прочности при растяжении как до, так и после теплового старения до 27,0%). При этом использование углерод-кремнистого наполнителя в дозировке 10,0 мас. ч. способствует получению резин с комплексом технологических, динамических и эксплуатационных характеристик, незначительно различающихся с показателями промышленной композиции. Таким образом, определена возможность применения углерод-кремнистого наполнителя в дозировке не более 10,0 мас. ч. с обязательной корректировкой содержания вулканизирующей группы и пластификатора.

Ключевые слова: углерод-кремнистый наполнитель, протекторные резины, тангенс механических потерь, теплообразование.

Для цитирования: Касперович А. В., Боброва В. В., Ефремов С. А., Нечипуренко С. В. Применение углерод-кремнистого гибридного наполнителя на основе карбонизированных отходов производства риса в протекторной части шины // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 26–44.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-3.

A. V. Kasperovich¹, V. V. Bobrova¹, S. A. Efremov², S. V. Nechipurenko²¹Belarusian State Technological University²Al-Farabi Kazakh National University**APPLICATION OF CARBON-SILICA HYBRID FILLER BASED
ON CARBONIZED RICE PRODUCTION WASTE IN THE TREAD PART OF A TIRE**

Utilization of agro-industrial waste is one of the main environmental problems. Due to the presence of silica in some agricultural waste, these materials can be used in various industries to replace commercial products. The aim of the work was to study the main technological, physical-mechanical and elastic-hysteresis properties of elastomer compositions based on synthetic styrene-butadiene rubber, intended for the manufacture of the tread-running part of a summer passenger car tire, with partial replacement (10.0 and 20.0 wt. parts) of the highly reinforcing silica filler Extrasil VD150 with a carbon-silica filler obtained by carbonization in a pyrolysis furnace of rice production waste at a temperature of 550–600°C.

It was determined that the replacement of Extrasil VD150 in a dosage of up to 20 wt. parts. The addition of 20.0 wt. parts of carbon-silica filler to tread rubber reduces the Mooney viscosity by up to 5.3% and the optimal vulcanization time by up to 9.2%, increases plastic deformation by up to 7.7% and the tackiness of rubber compounds by 31.3–34.4%, decreases the loss modulus and mechanical loss tangent by up to 24.0 and 14.3% respectively, increases rebound elasticity by up to 6.3% and fatigue endurance by up to 2.7 thousand cycles, and reduces the temperature inside the sample by up to 4.7%. However, it was found that the use of 20.0 wt. parts of carbon-silica filler leads to a significant decrease in the strength properties of the studied rubbers (conditional tensile strength both before and after thermal aging up to 27.0%). Moreover, the use of carbon-silica filler at a dosage of 10.0 wt. parts results in rubbers with a range of technological, dynamic, and performance characteristics that differ only slightly from those of the industrial composition. Thus, the feasibility of using carbon-silica filler at a dosage of no more than 10.0 wt. parts, with mandatory adjustments to the vulcanizing group and plasticizer content, has been determined.

Keywords: carbon-silica filler, tread rubber, mechanical loss tangent, heat generation.

For citation: Kasperovich A. V., Bobrova V. V., Efremov S. A., Nechipurenko S. V. Application of carbon-silica hybrid filler based on carbonized rice production waste in the tread part of a tire. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 26–44 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-3.

Введение. Автомобильные шины с улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими как показатель сопротивления качению, безопасность, долговечность, экологичность, должны соответствовать непрерывно возрастающим требованиям потребителей. В этом аспекте армирующие материалы различного типа (технический углерод и коллоидная кремнекислота) добавляются в резиновые смеси для улучшения некоторых основных требований к свойствам, таких как модуль, твердость, прочность на разрыв и сопротивление разрыву. Кроме того, в настоящее время существует необходимость улучшения и оптимизации ключевых характеристик протектора автомобильных шин, среди которых сцепление на мокрой дороге, сопротивление качению и износ. Шины обычно содержат 30–35% технического углерода различных марок, который используется в качестве усиливающего наполнителя для различных деталей шины [1, 2].

После 1992 г., когда компания Michelin впервые представила диоксид кремния в качестве функционального наполнителя для протекторных смесей шин легковых автомобилей [3], показав, что добавки SiO₂ могут снизить сопротивление качению и улучшить сцепление на мокрой дороге, протекторы шин, армированные диоксидом кремния, стали предметом интенсивных исследований с целью обеспечения производства шин с улучшенными эксплуатационными параметрами, показателями энергосбережения и безопасности вождения [4–6]. В качестве перспективного сырья для получения кремнийсодержащих наполнителей можно рассматривать отходы производства зерновых культур, а именно риса, производство которого занимает центральное место в обеспечении продуктами питания и удовлетворении энергетических потребностей почти половины населения планеты [7, 8]. Однако при этом ежегодный объем отходов производства сельскохозяйственной продукции в виде рисовой шелухи и стебля (соломы) в настоящее время достигает порядка 700 млн т, что представляет собой серьезную экологическую проблему.

Одним из перспективных методов практического использования продуктов переработки рисовой шелухи и стебля является применение их карбонизатов в составе эластомерных композиций в качестве замены промышленных наполнителей [9–14]. Из-за своей низкой цены и большого содержания кремнезема по сравнению с другими натуральными материалами рисовая шелуха была признана подходящей для широкого спектра использования в производственных и прикладных процессах.

Уникальные физико-химические характеристики рисовой шелухи, а именно высокое содержание аморфного кремнезема (87–97 мас. % SiO₂), развитая пористая структура, низкая плотность и большая удельная поверхность, обуславливают ее востребованность в различных

промышленных процессах [15–17]. Учитывая многочисленные проведенные исследования [18–20], очевидно, что применение золы рисовой шелухи распространено в широком промышленном секторе, в том числе в составе эластомерных композиций. В работе [18] исследовались механические характеристики материалов на основе натурального каучука, содержащих золу рисовой шелухи (ЗРШ) при различных дозировках от 0 до 40 частей на 100 частей каучука в сравнении с коммерческими армирующими наполнителями (кремнеземом и техническим углеродом). Результаты показали, что включение ЗРШ в натуральный каучук улучшило твердость, но снизило прочность на растяжение и прочность на раздир. Другие свойства, такие как модуль Юнга и потери при истирании, остались без значительных изменений. Однако ЗРШ характеризуется лучшей упругостью, чем коммерческие кремнезем и технический углерод.

Также было предпринято много попыток использовать ЗРШ в качестве наполнителя для синтетических каучуков. В одной из таких попыток [19] было установлено, что введение ЗРШ низкой дисперсности в композиции на основе нитрильного каучука до 60 мас. ч. способствует незначительному изменению механических свойств резин, улучшению термической стабильности вулканизатов, что дает возможность применения ЗРШ в качестве наполнителя, обеспечивая как экономические, так и экологические преимущества. Однако в работе [20] исследовали влияние дозировки ЗРШ на свойства материалов на основе натурального каучука и обнаружили, что данный наполнитель ухудшает механические свойства (предел прочности при растяжении, модуль упругости, твердость, стойкость к истиранию и прочности на разрыв) по сравнению с усиливающими наполнителями, такими как диоксид кремния и технический углерод.

Стоит отметить, что значительное количество исследований посвящено получению из ЗРШ аморфного диоксида кремния [21–26], который характеризуется более высокой реакционной способностью и меньшим содержанием примесей по сравнению с кристаллическими формами кремнезема, такими как кварц и кристобалит. Сообщалось [27], что применение диоксида кремния, полученного из отходов рисовой шелухи путем химической обработки и последующего прокаливания при температуре 600°C, при низких дозировках (до 20 мас. ч.) в составе рецептур для протекторных шин на основе натурального каучука приводит к увеличению прочности на разрыв, твердости и модуля упругости, в то время как относительное удлинение при разрыве и сопротивление истиранию незначительно снижались.

Исследование [28], проведенное для сравнения кремнезема, полученного из рисовой шелухи, синтезированного экологически безопасным методом, с традиционным кремнеземом (Zeosil 175) для усиления механических свойств силиконовых каучуков, показало, что силиконовый каучук демонстрирует сопоставимую прочность на разрыв с традиционным наполнителем при низком содержании кремнезема из рисовой шелухи. Однако при более высоких уровнях наполнения механические свойства ухудшаются.

Основная часть. Целью данного исследования является использование продукта карбонизации сельскохозяйственных отходов (рисовой шелухи и стеблей), содержащего как углеродную, так и кремнеземную фракции и не подвергавшегося дополнительной обработке, в качестве частичной замены высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя в эластомерных композициях на основе бутадиен-стирольного каучука (БСК), а также оценка их технологических, физико-механических, упруго-гистерезисных и эксплуатационных характеристик с целью удешевления производства, уменьшения загрязнения окружающей среды при утилизации отходов сельского хозяйства, а также придания резинам особых качеств.

Для этого были использованы действующие промышленные рецептуры резиновых смесей, предназначенных для изготовления протекторной части легкой автомобильной летней шины, с использованием золы рисовой шелухи в качестве замены белой сажи марки Экстрасил 150ВД.

Принципиальная рецептура исследуемой резины представлена в табл. 1.

Таблица 1. Принципиальная рецептура резиновой смеси для протекторной части летней шины

Наименование ингредиентов	Содержание ингредиентов, мас. ч.
БСК	60,0
Сажевый мастербэтч	50,0
Пластификатор	9,0
Вулканизирующая система	7,3
Экстрасил 150ВД	64,0
Цинковая соль жирной кислоты	5,5
Технический углерод марки N339	50,0
Смола	0,2
Силан	10,4
Противостарители	6,0

Основными наполнителями в исследуемой резине являются технический углерод марки N339 и усиливающий кремнекислотный наполнитель (ККН), представляющий собой белый порошок с пористой структурой. Основные характеристики ККН приведены в табл. 2 (экспериментальные значения).

Таблица 2. Характеристики кремнекислотного наполнителя

Показатель	Значение показателя
Массовая доля диоксида кремния, %	97,0
Массовая доля влаги, %, не более	4,0–6,0
рН водной суспензии	5,4–7,5
Удельная поверхность по адсорбции азота, м ² /г	150,0–175,0
Средний размер частиц, нм	5,0–15,0
Потери при прокаливании (950°С), %, не более	7,0

Известно, что введение в резиновые смеси кремнекислотных наполнителей дает ряд преимуществ, таких как улучшение сопротивления раздиру, снижение теплообразования и повышение адгезии, уменьшение сопротивления качению и улучшение гистерезисных потерь в многокомпонентных изделиях, таких как шины [29]. Механизм усиления полимера кремнекислотными наполнителями отличается от механизма усиления техническим углеродом. Это связано с химической природой и энергетикой поверхности кремнекислотных наполнителей, существенно отличной от свойств поверхности технического углерода [30, 31].

В качестве частичной замены промышленного усиливающего кремнекислотного наполнителя использовали углерод-кремнистый наполнитель (УКН), который получен в ТОО «NeoCarbon» (г. Алматы, Республика Казахстан) по технологии, разработанной авторами настоящей статьи [32]. Исходным сырьем являлась смесь рисовой шелухи (РШ) и рисового стебля (РС), измельченная на роторно-ножевой мельнице до фракции –5,0 мм. Затем указанные компоненты смешивали в пропорции: РС : РШ от 2,0 : 5,0 до 0,5 : 2,0. Полученную смесь подвергали карбонизации в пиролизной печи, без доступа кислорода, при температуре 550–600°С. В работе [33] представлены физико-химические и структурные характеристики УКН, а также его элементный состав.

Ввиду наличия силанольных групп на поверхности углерод-кремнистого наполнителя и высокого содержания аморфного кремнезема представляло интерес произвести частичную замену промышленного кремнекислотного наполнителя на УКН и оценить влияние данной замены на основные показатели протекторных резин. В промышленной рецептуре для протекторной части шины производилась частичная замена (10,0 и 20,0 мас. ч.) высокоактивного ККН на углерод-кремнистый наполнитель. Определение вязкости по Муни – один из основных способов оценки технологичности резиновых смесей [34]. Вязкость

характеризует сопротивление материала течению при заданной скорости деформации [35] и является важным параметром для оптимизации технологических процессов. Выход вязкости за определенные пределы делает переработку резиновой смеси технически невозможной или экономически нецелесообразной [36]. Определение вязкости по Муни резиновых смесей осуществлялось на ротационном вискозиметре дискового типа MV 2000 (Alpha Technologies, Хадсон, США) согласно стандартной методологии [37].

Установлено, что замена промышленного кремнекислотного наполнителя марки Экстрасил ВД150 на исследуемый углерод-кремнистый наполнитель на основе растительного сырья в дозировке 10,0 мас. ч. не оказывает влияния на показатель вязкости по Муни резиновых смесей для протекторной части шины, а увеличение содержания УКН до 20,0 мас. ч. приводит к незначительному снижению данного показателя на 4 усл. ед. Муни (5,3%) (рис. 1).

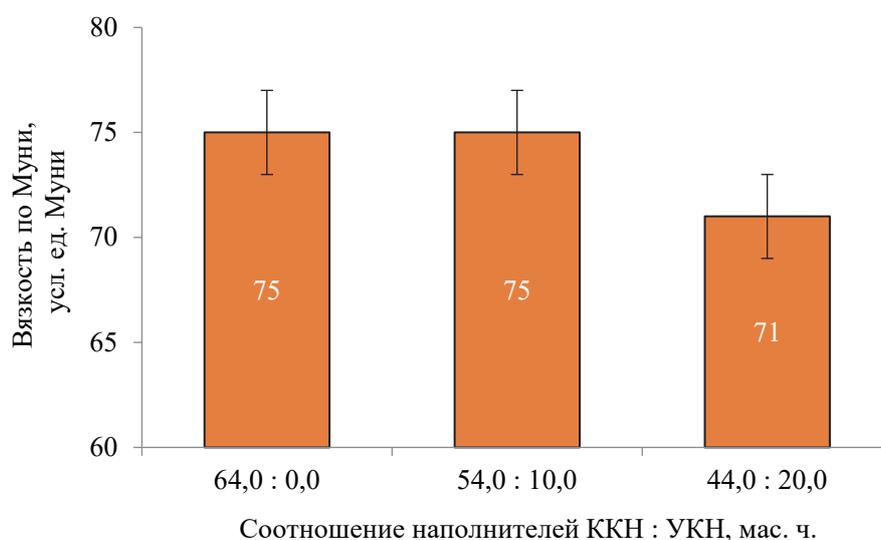


Рис. 1. Зависимость изменения вязкости по Муни резиновых смесей от соотношения наполнителей

Выявленный характер изменения вязкости резиновых смесей при увеличении содержания углерод-кремнистого наполнителя обусловлен различиями в размерах агломератов наполнителя (средний размер агломератов УКН составляет до 26 мкм, а кремнекислотного наполнителя марки Экстрасил ВД150 – до 15 нм). При разнице в размерах агрегатов существенно уменьшается способность к образованию цепочечных структур смесового наполнителя, а следовательно, физических взаимодействий «наполнитель – каучук». Подвижность сегментов макромолекул эластомерной матрицы увеличивается, сдвиговые деформации ее возрастают, облегчается перемещение макромолекул друг относительно друга – вязкость снижается [14, 18, 38]. Кроме того, разница в поверхностной энергии между двумя наполнителями не позволяет им образовывать совместную сеть наполнителей.

Аналогичные результаты были получены в работе [14], где было установлено снижение вязкости по Муни резиновых смесей при использовании в рецептурах шинных резин золы рисовой шелухи по сравнению с резинами, содержащими как технический углерод, так и кремнекислотный наполнитель марки Zeosil 1165MP. Уменьшение вязкости обуславливалось тем, что низкая удельная поверхность золы рисовой шелухи, коррелирующая с пониженным содержанием связанного каучука, является фактором, снижающим влияние структурных образований в полимерной матрице на модуль упругости композитной смеси.

В то время как вязкость определяется как сопротивление пластической деформации, термином «пластичность» (P) называют «легкость деформации» образца резиновой смеси. В некотором отношении «пластичность» и «вязкость» означают одно и то же свойство, но

имеют противоположный смысл [39]. Однако вязкость характеризует сопротивление системы сдвиговым нагрузкам, в то время как показатели пластичности и жесткости – сжимающим. Эластическая восстанавливаемость (R') определяет усадку смесей и полуфабрикатов. Исследование пластичности и эластического восстановления резиновых смесей позволяет прогнозировать их перерабатываемость на технологическом оборудовании. В соответствии со стандартной методологией [40] пластичность и эластическое восстановление исследуемых резиновых смесей определялись при помощи пластометра по Уоллесу марки P.12E (Wallace, Англия). В табл. 3 приведены результаты испытаний по определению P и R' резиновых смесей для протекторной части шины.

Таблица 3. Пластичность и эластическое восстановление исследуемых резиновых смесей

Соотношение наполнителей ККН : УКН, мас. ч.	P	R' , мм
64,0 : 0,0 (промышленная смесь)	$0,39 \pm 0,02$	$0,9 \pm 0,04$
54,0 : 10,0	$0,39 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,04$
44,0 : 20,0	$0,42 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,04$

Как видно из данных табл. 3, частичная замена ККН на УКН в дозировке до 20,0 мас. ч. в резиновых смесях на основе БСК приводит к увеличению пластичности на 7,7%. Полученные данные по определению пластичности коррелируют с данными по определению показателя вязкости по Муни, полученными на сдвиговом вискозиметре.

Установлено, что показатель эластического восстановления для исследуемых резин снижается на 11,1% по сравнению с образцом сравнения, т. е. уменьшается усадка.

Вулканизация – это комплекс физико-химических процессов, протекающих в резиновой смеси, основным из которых является сшивание макромолекул каучука химическими связями различной энергии и природы в пространственную вулканизационную сетку. Образование поперечных связей осуществляется через ряд химических взаимодействий с участием агента вулканизации и ускорителей [36]. На процесс вулканизации оказывают влияние все ингредиенты резиновой смеси. Кинетические параметры вулканизации резиновой смеси определялись путем измерения крутящего момента при сдвиговой деформации, вызванной колебаниями биконического ротора с определенной частотой и амплитудой при заданной температуре образца резиновой смеси [41]. Испытания проводились с использованием ODR 2000 (Alpha Technologies, Hudson, США).

Результаты исследования кинетических параметров переработки резиновых смесей, содержащих углерод-кремнистый наполнитель в качестве частичной замены высокоусиливающего ККН в рецептурах эластомерных композиций, предназначенных для изготовления протекторной части шины, представлены в табл. 4. Из полученных данных видно, что введение в состав исследуемой резиновой смеси УКН в качестве частичной замены высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя в дозировках до 20,0 мас. ч. оказывает влияние на процесс образования поперечных связей.

Таблица 4. Кинетические параметры процесса вулканизации эластомерных композиций

Соотношение наполнителей ККН : УКН, мас. ч.	M_L , дН · м	t_{S2} , мин	t_{90} , мин	ΔM , дН · м
64,0 : 0,0 (промышленная смесь)	2,0	7,2	20,7	14,5
54,0 : 10,0	1,9	6,8	20,3	13,5
44,0 : 20,0	1,6	6,5	18,8	13,2

Примечание. M_L – минимальный крутящий момент, дН · м; t_{S2} – время начала вулканизации, определяемое увеличением минимального крутящего момента на 2 дН · м, мин; t_{90} – оптимальное время вулканизации, мин; ΔM – разность между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН · м.

Показано, что частичная замена высокоусиливающего ККН на карбонизат рисовой шелухи приводит к снижению показателя минимального крутящего момента (M_L) до 20,0% по сравнению с промышленной композицией. Минимальный крутящий момент указывает на вязкость соединения, которая обычно обусловлена молекулярными цепями полимера и характеристиками, связанными с наполнителем, такими как тип, количество взаимодействий «каучук – наполнитель» или «наполнитель – наполнитель» и сетка наполнителя. С увеличением содержания наполнителя усиливается образование сетки наполнителя и, следовательно, показатель M_L повышается [42]. В случае увеличения содержания углерод-кремнистого наполнителя в исследуемых резиновых смесях данный показатель постепенно уменьшается, что свидетельствует о нарушении взаимодействий в системе «наполнитель – наполнитель». Между тем полярные группы, которые присутствуют на поверхности УКН (COO^- , OH^-), могут взаимодействовать со свободными силанольными группами на поверхности кремнекислотного наполнителя, оставшимися после реакции силанизации, обеспечивая экранирующий эффект [24].

Определено, что при замене ККН на исследуемый углерод-кремнистый наполнитель в дозировке до 20 мас. ч. наблюдается снижение показателя времени начала вулканизации (t_{S2}) до 9,7% и оптимального времени вулканизации (t_{90}) до 9,2% [43, 44]. Параметр ΔM является косвенным показателем, характеризующим степень сшивания макромолекул, при этом выявлено, что при частичной замене ККН на углерод-кремнистый наполнитель данный параметр уменьшается до 9,0% за счет меньшей площади поверхности по сравнению с ККН, что в свою очередь может привести к снижению взаимодействий в системе «наполнитель – наполнитель». Различия в кинетических параметрах вулканизации резиновых смесей обусловлены тем, что поверхность углерод-кремнистого наполнителя характеризуется малым количеством активных функциональных групп, вследствие этого при введении каплинг-агента (силана) в исследуемые композиции часть силана не вступает в химическую реакцию с УКН и может выступать в роли дополнительного вулканизирующего агента. Стоит отметить, что применение углерод-кремнистого наполнителя в дозировке 10,0 мас. ч. способствует получению значений кинетических параметров процесса вулканизации резиновых смесей для протекторной части шины на уровне с промышленной смесью.

Клейкостью называют способность невулканизированной резиновой смеси прилипать к той же смеси или другой смеси за короткое время контакта и при умеренной величине приложенного давления. Это свойство является очень важным для таких резиновых изделий, как шины и конвейерные ленты, которые собираются наложением одного каландрованного или экструдированного слоя на другой. Невулканизированное резиновое изделие не должно распадаться до того, как будет помещено в форму или пресс для вулканизации. Клейкость исследуемых резиновых смесей оценивали путем измерения условного напряжения, необходимого для разделения двух идентичных образцов, изготовленных из резиновой смеси, после предварительного контакта в течение 30 с при контактной нагрузке 16 унций и скорости деформирования 25,44 мм/мин. Испытание проводилось с помощью прибора Tel-Tak (Monsanto, США).

Проведенные исследования показали, что исследуемый углерод-кремнистый наполнитель оказывает существенное влияние на показатель клейкости эластомерных композиций. Установлено, что введение 10,0 и 20,0 мас. ч. УКН в рецептуры для протекторной части шины приводит к увеличению прочности сцепления дублируемых образцов на 31,3 и 34,4% соответственно по сравнению с промышленной смесью (рис. 2).

Выявленный характер изменения клейкости резиновых смесей, вероятно, обусловлен тем, что при использовании углерод-кремнистого наполнителя наблюдается снижение сетчатой структуры наполнителя, что в свою очередь облегчает диффузию макромолекул каучука и ингредиентов с одного слоя в другой. При этом образуется межфазный слой, что приводит к исчезновению границы раздела фаз и увеличивает клейкость.

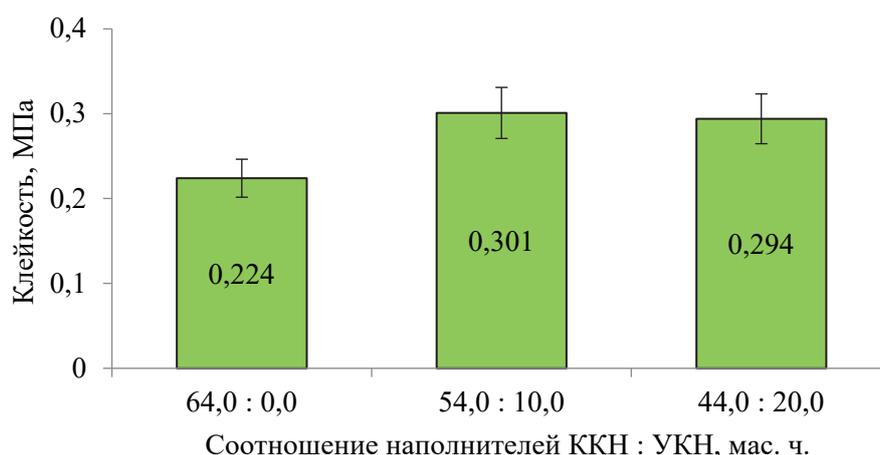


Рис. 2. Зависимость изменения показателя клейкости резиновых смесей от соотношения наполнителей

На прочность резины большое влияние оказывают химический состав и конфигурация макромолекул каучука, тип вулканизирующей системы и характер образующихся при вулканизации структур, концентрация и морфологические характеристики наполнителей и других ингредиентов [38]. Физико-механические показатели эластомерных композиций оценивались по параметрам условной прочности при растяжении (f_p), относительному удлинению при разрыве (ϵ_p), а также твердости по Шору А. Испытания по определению упруго-прочностных свойств резин проводились согласно ГОСТ 270–75 [45] на тензомере T2020 DC10 SH (Alpha Technologies, Hudson, США) и твердости по Шору А – в соответствии с ГОСТ 263–75 [46] с помощью твердомера марки DIGI-TEST (Bareiss, Oberdischingen, Германия). Стойкость образцов к ускоренному старению оценивали по изменению упруго-прочностных показателей после выдержки их в термостате при температуре $(120 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение $(12 \pm 0,25)$ ч. Испытание проводили по стандартной методике [47].

Результаты определения упруго-прочностных характеристик резин на основе БСК до и после теплового старения, содержащих УКН в различных дозировках, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Упруго-прочностные свойства исследуемых резин до и после теплового старения

Соотношение наполнителей ККН : УКН, мас. ч.	f_p , МПа		ϵ_p , %	
	до старения	12 ч старения	до старения	12 ч старения
64,0 : 0,0 (промышленная смесь)	16,4	15,9	430	390
54,0 : 10,0	14,3	14,2	420	370
44,0 : 20,0	12,7	11,6	420	370

Примечание. f_p – условная прочность при растяжении, МПа; ϵ_p – относительное удлинение при разрыве, %.

Определено, что резины, содержащие в своем составе углерод-кремнистый наполнитель в качестве частичной замены высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя, характеризуются меньшими прочностными показателями резин как до (до 22,6%), так и после (до 31,3%) воздействия высоких температур и кислорода воздуха. Значения показателя условной прочности при растяжении резин с ККН до теплового старения составляют 16,4 МПа, а для композиций с УКН находятся в интервале 12,7–14,3 МПа. Стоит отметить, что наименьшим изменением прочностных показателей характеризуются резины, содержащие 10,0 мас. ч. углерод-кремнистого наполнителя. В то же время введение исследуемого наполнителя в резиновые смеси для протекторной части шины фактически не оказывает влияния на показатель относительного удлинения при разрыве резин.

Некоторое снижение прочностных показателей резин, содержащих углерод-кремнистый наполнитель взамен ККН, видимо, происходит не только в результате пластифицирующего эффекта, но и вследствие более низкой дисперсности и поверхностной активности УКН по сравнению с ККН. Кроме того, такое уменьшение прочностных показателей при увеличении загрузки углерод-кремнистого наполнителя может быть обусловлено неспособностью наполнителя формировать прочную связь с полимерной матрицей и создавать пространственную сетку, которая перераспределяет механические напряжения [18].

Установлено, что применение углерод-кремнистого наполнителя в составе эластомерных композиций, предназначенных для изготовления протекторной части летней шины, в качестве частичной замены высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя фактически не оказывает влияния на показатель твердости по Шору А (рис. 3), так как изменение данного показателя составляет не более 2 усл. ед. Шор как до, так и после теплового старения при 100°C.

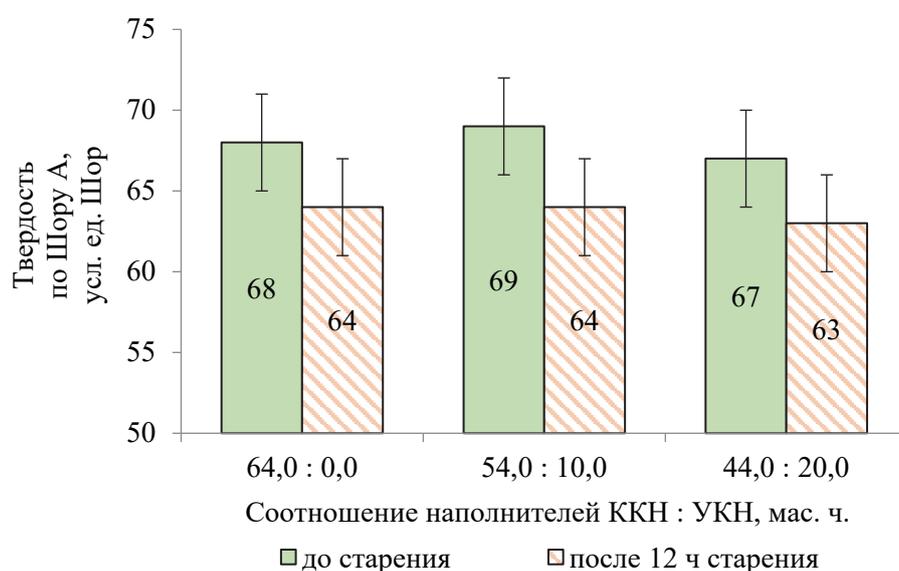


Рис. 3. Зависимость изменения показателя твердости по Шору А вулканизатов от соотношения наполнителей

Выбор резин с оптимальными свойствами применительно к конкретным особенностям динамического режима, реализуемого при эксплуатации того или иного изделия, должен базироваться на знании комплекса показателей, характеризующих: взаимосвязь между напряжением и деформацией при циклическом нагружении (упруго-гистерезисные свойства); взаимосвязь между динамическими напряжениями и выносливостью резин, т. е. число циклов нагружения, которые может выдержать образец данного материала, не разрушаясь [48]. К сравнительно кратковременным испытаниям по нахождению упруго-гистерезисных свойств можно отнести: определение эластичности по отскоку, измерение теплообразования и усталостной выносливости, определение гистерезисных потерь [34]. Определение эластичности по отскоку эластомерных композиций проводили согласно ГОСТ 27110–86 [49] на упругометре типа Шоба; измерение теплообразования исследуемых резин выполняли по ГОСТ 20418–75 [50] на флексометре модели RHU-3000N. Для количественной оценки упруго-гистерезисных свойств резины в условиях гармонического динамического нагружения широко используются модуль упругости (E') и модуль потерь (E''), определение которых осуществляли на динамическом механическом анализаторе DMA GABO Eplexor 500N (Netzsch, Германия) согласно ISO 6721 [51].

Зависимость модуля упругости E' при 60°C исследуемых резин от соотношения наполнителей представлена на рис. 4.

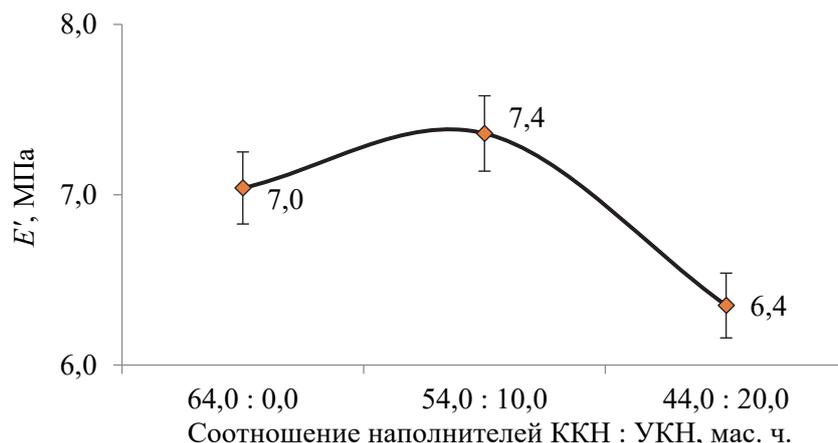


Рис. 4. Зависимость модуля упругости от соотношения наполнителей

Из полученных данных видно, что при замене 10 мас. ч. ККН на углерод-кремнистый наполнитель увеличивается модуль упругости резин на 4,5%, что может привести к некоторому улучшению сопротивления протектора механическим повреждениям. В случае увеличения дозировки УКН до 20 мас. ч. данный показатель снижается на 9,8%, а следовательно, повышается эластичность материала, что может оказывать влияние на сцепление шины с дорогой.

Результаты исследования модуля потерь E'' исследуемых вулканизатов приведены на рис. 5.

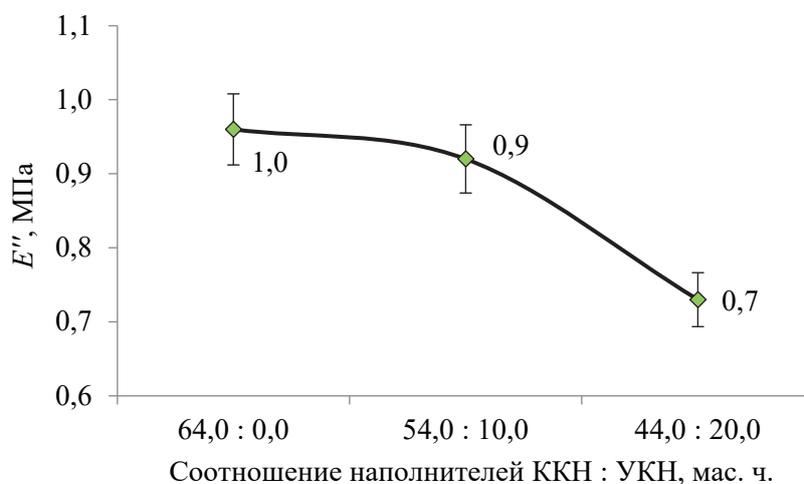


Рис. 5. Зависимость модуля потерь от соотношения наполнителей

Установлено, что применение углерод-кремнистого наполнителя в композициях для протекторной части шины в качестве частичной замены высокоусиливающего ККН в дозировке 20,0 мас. ч. приводит к уменьшению показателя модуля потерь на 24,0%. В случае замены 10,0 мас. ч. данный показатель изменяется незначительно (изменение составляет 4,2%). Следовательно, применение в исследуемой эластомерной композиции УКН позволяет снизить потери тепла в окружающую среду.

Для лабораторной проверки характеристик протекторной резины используются значения тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ при 60°C, полученные из динамического механического анализа, который указывает на потерю энергии, связанной с сопротивлением качению шин, из-за гистерезиса при динамических деформациях [52, 53]. На рис. 6 представлены зависимости изменения $\text{tg}\delta$ от соотношения наполнителей в исследуемых эластомерных композициях.

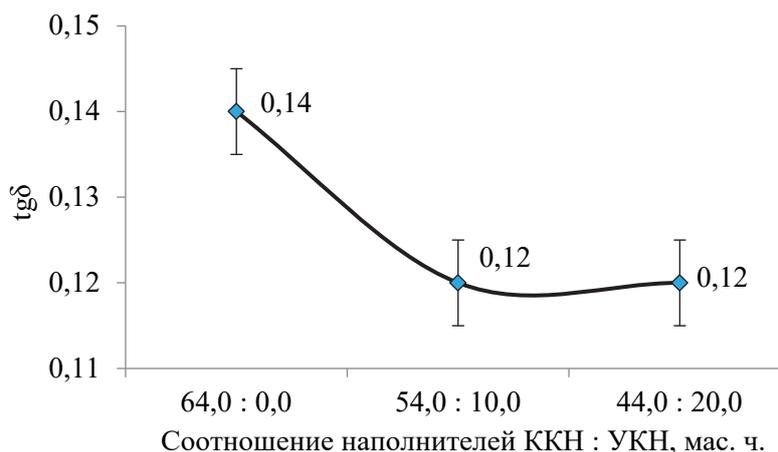


Рис. 6. Зависимость тангенса угла механических потерь от соотношения наполнителей

Из полученных данных видно, что с увеличением дозировки УКН снижается тангенс угла механических потерь на 7,1–14,3% по сравнению с композицией, наполненной только ККН. Из этого следует, что эластомерные композиции, содержащие в своем составе углерод-кремнистый наполнитель, обладают более низкими гистерезисными потерями. Снижение модуля эластичности, модуля потерь и тангенса угла механических потерь резин, содержащих УКН, обусловлено меньшей удельной поверхностью и низкой концентрацией активных функциональных групп на поверхности натурального наполнителя по сравнению с высокоусиливающим кремнекислотным наполнителем, что приводит к слабому взаимодействию УКН с полимерной матрицей [54–56].

Результаты исследования влияния дозировки УКН на упруго-гистерезисные свойства протекторных резин эластомерных композиций приведены в табл. 6.

Выявлено, что введение в протекторные резиновые смеси УКН во всех исследуемых дозировках способствует незначительному увеличению эластичности по отскоку резин как при нормальных условиях ($(23 \pm 2)^\circ\text{C}$), так и при высоких температурах ($(100 \pm 1)^\circ\text{C}$) до 6,3 и до 3,5% соответственно. При меньшей удельной площади поверхности можно ожидать уменьшение взаимодействий «наполнитель – наполнитель» с уменьшением потери энергии и меньшим гистерезисом, связанным с более эластичным материалом.

Таблица 6. Упруго-гистерезисные свойства эластомерных композиций для протекторной части шины

Показатель	Соотношение наполнителей ККН : УКН, мас. ч.		
	64,0 : 0,0	54,0 : 10,0	44,0 : 20,0
Эластичность по отскоку при $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, %	32	33	34
Эластичность по отскоку при $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$, %	57	57	59
Теплообразование по Гудричу:			
– температура внутри образца, $^\circ\text{C}$	148	146	141
– теплообразование, $^\circ\text{C}$	100	94	92
– усталостная выносливость, количество циклов до разрушения, тыс. циклов	21,6	22,5	24,3

Результаты определения теплообразования по Гудричу показали, что введение УКН в протекторные резины в качестве частичной замены кремнекислотного наполнителя в дозировках 10,0 и 20,0 мас. ч. способствует снижению температуры внутри образца. Так, температура внутри образца промышленной смеси составляет 148°C , а для композиций, содержащих углерод-кремнистый наполнитель, находится в диапазоне 141 – 146°C . Также при

замене промышленного наполнителя на УКН уменьшается теплообразование до 8%. Стоит отметить, что протекторные резины, содержащие в своем составе УКН, обладают лучшей усталостной выносливостью (22,5 и 24,3 тыс. циклов) по сравнению с промышленной смесью (21,6 тыс. циклов). Выявленный характер изменения свойств обусловлен тем, что при уменьшении концентрации поперечных связей снижается жесткость резины, что приводит к повышению динамической выносливости в режиме постоянных нагрузений [38].

Заключение. Применение золы рисовой шелухи в резиновых смесях на основе бутадиен-стирольного каучука в случае частичной замены коммерческого высокоусиливающего кремнекислотного наполнителя (ККН) Экстрасил 150ВД приводит к снижению вязкости по Муни резиновых смесей до 5,3% и времени достижения оптимумов вулканизации до 9,2%, что, в свою очередь, сократит энергоемкость процесса переработки данных изделий. Выявлено, что введение золы рисовой шелухи во всех исследуемых дозировках способствует повышению пластической деформации до 7,7% и клейкости резиновых смесей на 31,3–34,4%, что будет приводить к увеличению прочности сцепления дублируемых слоев шины при ее сборке. Показано, что частичная замена ККН на золу рисовой шелухи вызовет снижение модуля потерь до 24,0% и тангенса механических потерь до 14,3%, что позволит уменьшить теплообразование в шине.

Исследования эксплуатационных характеристик резин для протекторной части шины показали повышение усталостной выносливости до 2,7 тыс. циклов и снижение температуры внутри образца при использовании в их составе углерод-кремнистого наполнителя, что связано с уменьшением взаимодействий «наполнитель – наполнитель», сокращением потерь энергии на внутреннее трение и меньшим гистерезисом. В то же время определено некоторое снижение прочностных показателей резин, а именно условная прочность при растяжении как до, так и после теплового старения снижается на 10,7–27,0%.

Результаты, полученные в данном исследовании, показали, что практическое применение золы рисовой шелухи в качестве частичной замены кремнекислотного наполнителя в протекторных резинах возможно только в низких дозировках (не более 10,0 мас. ч.), где негативное влияние на прочностные показатели будет компенсировано корректировкой состава вулканизирующей группы.

Список литературы

1. Singh M., Zulkifli M. Special issue on current progresses in rubber technology // *Journal of Rubber Research*. 2022. Vol. 24, no. 4. P. 1–2. DOI: 10.1007/s42464-021-00144-1.
2. Rodgers B., D’Cruz B. Tire technology // *Rubber compounding: Chemistry and applications*. CRC Press, Boca Raton, 2016. P. 579–598. DOI: 10.1201/b18931.
3. Rubber compound and tires based on such a compound: Patent EP 0501227A1 / R. Rauline. Publ. 02.09.1992.
4. Luginland H. D., Niedermeier W. New reinforcing materials for rising tire performance demands // *Rubber World*. 2003. Vol. 22. P. 34–45.
5. Khasraghi S. S., Shojaei A., Momenilandi M. Enhancing tire tread performance with combined nano- and micro-silica particles in styrene butadiene rubber/butadiene rubber compound // *Journal of Elastomers & Plastics*. 2023. Vol. 55, no. 7. P. 1–23.
6. Improved Silica Dispersibility in Silica-rubber Compounds for a Tire Tread by Using an Itaconic Acid-based Polymeric Dispersant / W. S. Shin [et al.] // *Fibers and Polymers*. 2021. Vol. 22, no. 1. P. 196–204.
7. Chen Z., Xu Y., Shivkumar S. Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 98, no. 3. P. 1061–1070. DOI: 10.1002/jsfa.8556.
8. Singh J. K., Rout A. K. Study on the physical, mechanical, and thermal behaviour of RHN blend epoxy hybrid composites reinforced by *Borassus flabellifer* L. fibers // *Cellulose*. 2023. Vol. 30. P. 5033–5049. DOI: 10.1007/s10570-023-05191-y.

9. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications / M. Li [et al.] // *Composites. Part B: Engineering*. 2020. Vol. 200, no. 2. Article 108254. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.10.
10. The Effect of Rice Husk Powder on Standard Malaysian Natural Rubber Grade L (SMR L) and Epoxidized Natural Rubber (ENR 50) Composites / S. Attharangsana [et al.] // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2012. Vol. 51, no. 3. P. 231–237.
11. Arayaprane W., Rempel G. L. A comparative study of the cure characteristics, processability, mechanical properties, ageing, and morphology of rice husk ash, silica and carbon black filled 75 : 25 NR/EPDM blends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2008. Vol. 109, no. 2. P. 932–941.
12. Iluppalla D., Ranatunga S., Siriwardena S. Silica/white rice husk ash hybrid filler for rubber composites for the manufacture of low speed castor wheel rubber treads // *Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka*. 2020. Vol. 100. P. 38–54. DOI: 10.4038/jrrisl.v100i0.1898.
13. Rice husk ash filled natural rubber compounds – the use of rheometric data to qualitatively estimate optimum filler loading / H. M. Costa [et al.] // *International Journal of Polymeric Materials*. 2004. Vol. 53, no. 6. P. 475–497. DOI: 10.1080/00914030490450100.
14. Fernandes M. R. S., Sousa A. M. F. de, Furtado C. R. G. Rice husk ash as filler in tread compounds to improve rolling resistance // *Polímeros*. 2017. Vol. 27, no. 1. P. 55–61. DOI: 10.1590/0104-1428.2385.
15. Chen Z., Xu Y., Shivkumar S. Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 98, no. 3. P. 1061–1070. DOI: 10.1002/jsfa.8556.
16. Fabrication of Rice Husk Ash/Natural Rubber Composite / Z. Q. Zeng [et al.] // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 393. P. 92–96. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.393-395.92.
17. Role of SiO_x in rice-husk-derived anodes for Li-ion batteries / Y. Abe [et al.] // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-022-04979-5.
18. Kaewsakul W. Silica – reinforced natural rubber for low rolling resistance energy-saving tires: Diss. of doctor at the University of Twente. Netherlands, 2013. 199 p.
19. Li M. C., Zhang Y., Cho U. R. Mechanical, thermal and friction properties of rice bran carbon/nitrile rubber composites: Influence of particle size and loading // *Materials & Design*. 2014. Vol. 63. P. 565–574. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.032.
20. Sae-Oui P., Rakdee C., Thanmathorn P. Use of rice husk ash as filler in natural rubber vulcanizates: In comparison with other commercial fillers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. Vol. 83, no. 11. P. 2485–2493. DOI: 10.1002/app.10249.
21. Jembere A. L., Fanta S. F. Studies on the Synthesis of Silica Powder from Rice Husk Ash as Reinforcement Filler in Rubber Tire Tread Part: Replacement of Commercial Precipitated Silica // *International Journal of Materials Science and Applications*. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 37–44.
22. Comparative Study of Different Pretreatment and Combustion Methods on the Grindability of Rice-Husk-Based SiO₂ / M. Yunhai [et al.] // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. Article 2951.
23. Bakar R. A., Yahya R., Gan S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk // *Procedia Chemistry*. 2016. Vol. 19. P. 189–195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092.
24. Green Tire Technology: Effect of Rice Husk Derived Nanocellulose (RHNC) in Replacing Carbon Black (CB) in Natural Rubber (NR) Compounding / M. Dominic [et al.] // *Carbohydrate Polymers*. 2019. Vol. 230, no. 41. Article 115620. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115620.
25. Preparation and properties of rice husk ash silica filled natural rubber / Z. Guojie [et al.] // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45. P. 438–447.
26. Characterization of silica produced from rice husk ash: comparison of purification and processing methods / I. J. Fernandes [et al.] // *Journal of Materials Research*. 2017. Vol. 20. P. 512–518.

27. Natural Rubber Composites Reinforced with Green Silica from Rice Husk: Effect of Filler Loading on Mechanical Properties / N. Choophun [et al.] // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, no. 12. P. 369–377.
28. Sustainable Reinforcement of Silicone Rubber: Comparative Analysis of Biosilica from Rice Husk and Conventional Silica / H. W. Jeong [et al.] // *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 3. P. 406–418.
29. Silica-derived materials from agro-industrial wastebiomass: characterization and comparative studies / C. A. Morales-Paredesa [et al.] // *Environmental Research*. 2023. Vol. 231, no. 2. Article 116002.
30. Mark J. *Science and Technology of Rubber*. New York: Academic Press, 2005. 768 p.
31. Пичугин А. М. *Материаловедческие аспекты создания шинных резин*. М.: Научное издание, 2008. 383 с.
32. Применение углерод-кремнистого композита в качестве наполнителя: пат. KZ 045499 / А. Ф. Антипов, С. А. Ефремов, С. В. Нечипуренко, Б. Н. Бектемисов, А. В. Касперович. Оpubл. 29.11.23.
33. Углерод-кремнистый наполнитель для эластомерных композиций / В. В. Боброва [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. 2022. № 1 (253). С. 89–95.
34. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. *Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация*. М.: САНТ-ТМ, 2001. 400 с.
35. Шутилин Ю. Ф. *Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров*. Воронеж: ВГТА, 2003. 871 с.
36. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. *Технология эластомерных материалов*. М.: Истек, 2009. 502 с.
37. *Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011*. М.: Стандартинформ, 2013. 9 с.
38. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. *Структура и свойства материалов на основе эластомеров*. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.
39. Дик Дж. *Технология резины: рецептуростроение и испытания*. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
40. *Каучуки и резиновые смеси. Метод определения пластоэластических свойств на пластометре: ГОСТ 415–75*. М.: Изд-во стандартов, 2002. 5 с.
41. *Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканметре: ГОСТ 12535–84*. М.: Изд-во стандартов, 1985. 33 с.
42. Elucidating the role of clay-modifier on the properties of silica- and silica/nanoclay-reinforced natural rubber tire compounds / S. Sattayanurak [et al.] // *EXPRESS Polymer Letters*. 2021. Vol. 15, no. 7. P. 666–684.
43. Fernandes M. R. S., Furtado C. R. G., de Sousa A. M. F. Evaluation of rice husk ash as filler in tread compounds // *AIP Conference Proceedings*. 2014. Vol. 1593. P. 512–515.
44. Гришин Б. С. *Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития: монография*. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.
45. *Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75*. М.: Изд-во стандартов, 1975. 29 с.
46. *Метод определения твердости по Шору А: ГОСТ 263–75*. М.: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
47. *Резина и термоэластопласты. Испытания на ускоренное старение и теплостойкость: ГОСТ ISO 188-2013*. М.: Изд-во стандартов, 2014. 37 с.
48. Исследование упруго-гистерезисных свойств протекторных шинных резин с кремнекислотными наполнителями / О. А. Кротова [и др.] // *Вестник ВГУИТ*. 2021. Т. 83, № 1. С. 330–335. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-1-330-335.

49. Метод определения эластичности по отскоку на приборе типа Шоба: ГОСТ 27110–86. М.: Изд-во стандартов, 1987. 6 с.
50. Резина. Методы определения теплообразования, остаточной деформации и усталостной выносливости при многократном сжатии: ГОСТ 20418–75. М.: Изд-во стандартов, 1981. 12 с.
51. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении: ГОСТ Р 56801–2015. М.: Стандартинформ, 2016. 18 с.
52. Correlations between the hysteresis parameters determining the rolling resistance in rubber composites / T.-W. Xu [et al.] // *International Polymer Processing*. 2020. Vol. 35. P. 16–25.
53. Silica-Reinforced Natural Rubber: Synergistic Effects by Addition of Small Amounts of Secondary Fillers to Silica-Reinforced Natural Rubber Tire Tread Compounds / S. Sattayanurak [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–8.
54. Gerges N., Issa C., Fawaz S. Rubbers: Mechanical and dynamical properties // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 9. P. 128–129.
55. Study on the mechanical properties of rubber asphalt by molecular dynamics simulation / F. Guo [et al.] // *Journal of molecular modeling*. 2019. Vol. 25, no. 12. P. 1–8. DOI: 10.1007/s00894-019-4250-x.
56. Mousavi H., Sandu C. Sensitivity analysis of tire-ice friction coefficient as affected by tire rubber compound properties // *Journal of Terramechanics*. 2020. Vol. 91. P. 319–328. DOI: 10.1016/j.jterra.2020.08.004.

References

1. Singh M., Zulkifli M. Special issue on current progresses in rubber technology. *Journal of Rubber Research*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 1–2. DOI: 10.1007/s42464-021-00144-1.
2. Rodgers B., D’Cruz B. Tire technology. *Rubber compounding: Chemistry and applications*. CRC Press, Boca Raton, 2016, pp. 579–598. DOI: 10.1201/b18931.
3. Rauline R. Rubber compound and tires based on sucha compound. Patent EP 0501227A1, 1992.
4. Luginsland H. D., Niedermeier W. New reinforcing materials for rising tire performance demands. *Rubber World*, 2003, vol. 22, pp. 34–45.
5. Khasraghi S. S., Shojaei A., Momenilandi M. Enhancing tire tread performance with combined nano- and micro-silica particles in styrene butadiene rubber/butadiene rubber compound. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2023, vol. 55, no. 7, pp. 1–23.
6. Shin W. S., Kwon Y. R., Kim J. S., Hong S. J., Kim Y. J., Lim S. H., Kim D. H. Improved Silica Dispersibility in Silica-rubber Compounds for a Tire Tread by Using an Itaconic Acid-based Polymeric Dispersant. *Fibers and Polymers*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 196–204.
7. Chen Z., Xu Y., Shivkumar S. Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, vol. 98, no. 3, pp. 1061–1070. DOI: 10.1002/jsfa.8556.
8. Singh J. K., Rout A. K. Study on the physical, mechanical, and thermal behaviour of RHN blend epoxy hybrid composites reinforced by *Borassus flabellifer* L. fibers. *Cellulose*, 2023, vol. 30, pp. 5033–5049. DOI: 10.1007/s10570-023-05191-y.
9. Li M., Pu Y., Thomas V. M., Yoo C. G., Ozcan S., Deng Y., Ragauskas A. J. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications. *Composites. Part B: Engineering*, 2020, vol. 200, no. 2, article 108254. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.10.
10. Attharangsana S., Ismail H., Bakar M. A., Ismail J. The Effect of Rice Husk Powder on Standard Malaysian Natural Rubber Grade L (SMR L) and Epoxidized Natural Rubber (ENR 50) Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 231–237.

11. Arayapraneer W., Rempel G. L. A comparative study of the cure characteristics, processability, mechanical properties, ageing, and morphology of rice husk ash, silica and carbon black filled 75 : 25 NR/EPDM blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 109, no. 2, pp. 932–941.
12. Iluppalla D., Ranatunga S., Siriwardena S. Silica/white rice husk ash hybrid filler for rubber composites for the manufacture of low speed castor wheel rubber treads. *Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka*, 2020, vol. 100, pp. 38–54. DOI: 10.4038/jrrisl.v100i0.1898.
13. Costa H. M., Visconte L. L. Y., Nunes R. C. R., Furtado C. R. G. Rice husk ash filled natural rubber compounds – the use of rheometric data to qualitatively estimate optimum filler loading. *International Journal of Polymeric Materials*, 2004, vol. 53, no. 6, pp. 475–497. DOI: 10.1080/00914030490450100.
14. Fernandes M. R. S., Sousa A. M. F. de, Furtado C. R. G. Rice husk ash as filler in tread compounds to improve rolling resistance. *Polímeros*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 55–61. DOI: 10.1590/0104-1428.2385.
15. Chen Z., Xu Y., Shivkumar S. Microstructure and tensile properties of various varieties of rice husk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, vol. 98, no. 3, pp. 1061–1070. DOI: 10.1002/jsfa.8556.
16. Zeng Z. Q., Yu H. P., Liu H. C., Liao S. Q., Peng Z. Fabrication of Rice Husk Ash/Natural Rubber Composite. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 393, pp. 92–96. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.393-395.92.
17. Abe Y., Tomioka M., Kabir M., Kumagai S. Role of SiO_x in rice-husk-derived anodes for Li-ion batteries. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-022-04979-5.
18. Kaewsakul W. Silica – reinforced natural rubber for low rolling resistance energy-saving tires: Dissertation DSc. Netherlands, 2013. 199 p.
19. Li M. C., Zhang Y., Cho U. R. Mechanical, thermal and friction properties of rice bran carbon/nitrile rubber composites: Influence of particle size and loading. *Materials & Design*, 2014, vol. 63, pp. 565–574. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.032.
20. Sae-Oui P., Rakdee C., Thanmathorn P. Use of rice husk ash as filler in natural rubber vulcanizates: In comparison with other commercial fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, vol. 83, no. 11, pp. 2485–2493. DOI: 10.1002/app.10249.
21. Jembere A. L., Fanta S. F. Studies on the Synthesis of Silica Powder from Rice Husk Ash as Reinforcement Filler in Rubber Tire Tread Part: Replacement of Commercial Precipitated Silica. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 37–44.
22. Yunhai M., Shengwang Y., Zichao M., Yihao H., Shichao N., Li L., Guoqin L., Feipeng C. Comparative Study of Different Pretreatment and Combustion Methods on the Grindability of Rice-Husk-Based SiO₂. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, article 2951.
23. Bakar R. A., Yahya R., Gan S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*, 2016, vol. 19, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.proche.2016.03.092.
24. Dominic M., Joseph R., Sabura Begum P., Kanoth B. P., Chandra J., Thomas S. Green Tire Technology: Effect of Rice Husk Derived Nanocellulose (RHNC) in Replacing Carbon Black (CB) in Natural Rubber (NR) Compounding. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 230, no. 41, article 115620. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115620.
25. Guojie Z., Ge W., Yang J., Shifeng W., Yong Z. Preparation and properties of rice husk ash silica filled natural rubber. *Polymer Composites*, 2024, vol. 45, pp. 438–447.
26. Fernandes I. J., Calheiro D., Sánchez F. A. L., Camacho A. L. D., Rocha T. L. A. de C., Moraes C. A. M., Sousa V. C. de. Characterization of silica produced from rice husk ash: comparison of purification and processing methods. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 20, pp. 512–518.
27. Choophun N., Chaiammart N., Sukthavon K., Veranitisagul C., Laobuthee A., Wattanaphanit A., Panomsuwan G. Natural Rubber Composites Reinforced with Green Silica from Rice

Husk: Effect of Filler Loading on Mechanical Properties. *Journal of Composites Science*, 2022, vol. 6, no. 12, pp. 369–377.

28. Jeong H. W., Park K. T., Oh S. M., Shim S. E., Qian Y. Sustainable Reinforcement of Silicone Rubber: Comparative Analysis of Biosilica from Rice Husk and Conventional Silica. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 406–418.

29. Morales-Paredesa C. A., Rodríguez-Linzán I., Saquetea M. D., Luquee R., Osmang S. M., Boluda-Botellaa N., Rodríguez-Díaz J. M. Silica-derived materials from agro-industrial waste-biomass: characterization and comparative studies. *Environmental Research*, 2023, vol. 231, no. 2, article 116002.

30. Mark J. *Science and Technology of Rubber*. New York, Academic Press, 2005. 768 p.

31. Pichugin A. M. *Materialovedcheskiye aspekty sozdaniya shinnykh rezin* [Materials science aspects of tire rubber creation]. Moscow, Nauchnoye izdaniye Publ., 2008. 383 p. (In Russian).

32. Antipov A. F., Efremov S. A., Nechipurenko S. V., Bektemisov B. N., Kasperovich A. V. Application of carbon-silica composite as a filler. Patent KZ 045499, 2023 (In Russian).

33. Bobrova V. V., Prokopchuk N. R., Efremov S. A., Nechipurenko S. V. Carbon-silica filler for elastomer compounds. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical technologies, biotechnology, geocology, 2022, no. 2, pp. 89–95 (In Russian).

34. 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).

35. Shutilin Yu. F. *Spravochnoye posobiye po svoystvam i primeneniyu elastomerov* [Handbook of the properties and application of elastomers]. Voronezh, VGTA Publ., 2003. 871 p. (In Russian).

36. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov* [Technology of elastomeric materials]. Moscow, Istek Publ., 2009. 502 p. (In Russian).

37. GOST R 54552–2011. Rubbers and Rubber Compounds. Determination of Viscosity, Stress Relaxation, and Scorch Characteristics Using a Mooney Viscometer. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 9 p. (In Russian).

38. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of elastomer-based materials]. Omsk, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p. (In Russian).

39. Dick J. *Tekhnologiya reziny: retsepturostroeniye i ispytaniya* [Rubber technology: formulation and testing]. St. Petersburg, Nauchnyye osnovy i tekhnologii Publ., 2010. 620 p. (In Russian).

40. GOST 415–75. Rubbers and rubber compounds. Method for determining plastoelastic properties on a plastometer. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 5 p. (In Russian).

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

42. Sattayanurak S., Sahakaro K., Kaewsakul W., Dierkes W. K., Reuvekamp L. A. E. M., Blume A., Noordermeer J. W. M. Elucidating the role of clay-modifier on the properties of silica- and silica/nanoclay-reinforced natural rubber tire compounds. *EXPRESS Polymer Letters*, 2021, vol. 15, no. 7, pp. 666–684.

43. Fernandes M. R. S., Furtado C. R. G., de Sousa A. M. F. Evaluation of rice husk ash as filler in tread compounds. *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1593, pp. 512–515.

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

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

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

47. GOST ISO 188-2013. Rubber and thermoplastic elastomers. Accelerated ageing and heat resistance tests. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2014. 37 p. (In Russian).
48. Krotova O. A., Shashok Zh. S., Uss E. P., Lyushtyk A. Yu., Karmanova O. V. Study of elastic-hysteresis properties of tire tread rubbers with silica fillers. *Vestnik VGUIT* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2021, vol. 83, no. 1, pp. 330–335. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-1-330-335 (In Russian).
49. GOST 27110–86. Method for determining elasticity by rebound on a Shoba type device. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1987. 6 p. (In Russian).
50. GOST 20418–75. Rubber. Methods for determining heat generation, residual deformation, and fatigue endurance under repeated compression. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1981. 12 p. (In Russian).
51. GOST R 56801–2015. Plastics. Determination of mechanical properties under dynamic loading. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 18 p. (In Russian).
52. Xu T.-W., Jia Z.-X., Chen Y.-J., Jia D.-M., Wang Y.-Q. Correlations between the hysteresis parameters determining the rolling resistance in rubber composites. *International Polymer Processing*, 2020, vol. 35, pp. 16–25.
53. Sattayanurak S., Noordermeer J. W. M., Sahakaro K., Kaewsakul W., Dierkes W. K., Blume A. Silica-Reinforced Natural Rubber: Synergistic Effects by Addition of Small Amounts of Secondary Fillers to Silica-Reinforced Natural Rubber Tire Tread Compounds. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 2019, pp. 1–8.
54. Gerges N., Issa C., Fawaz S. Rubbers: Mechanical and dynamical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, vol. 9, pp. 128–129.
55. Guo F., Zhang J., Pei J., Zhou B., Hu Zh. Study on the mechanical properties of rubber asphalt by molecular dynamics simulation. *Journal of molecular modeling*, 2019, vol. 25, no. 12, pp. 1–8. DOI: 10.1007/s00894-019-4250-x.
56. Mousavi H., Sandu C. Sensitivity analysis of tire-ice friction coefficient as affected by tire rubber compound properties. *Journal of Terramechanics*, 2020, vol. 91, pp. 319–328. DOI: 10.1016/j.jterra.2020.08.004.

Информация об авторах

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.

Ефремов Сергей Анатольевич – академик Казахстанской национальной академии естественных наук, доктор химических наук, профессор, заместитель директора Центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский национальный университет имени аль-Фараби (пр-т Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Республика Казахстан). E-mail: efremsa@mail.ru. Scopus ID: 7801646138. ORCID: 0000-0002-3542-4140. ResearcherID: B-1178-2015.

Нечипуренко Сергей Витальевич – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией композиционных материалов Центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский

национальный университет имени аль-Фараби (пр-т Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Республика Казахстан). E-mail: nechipurenkos@mail.ru. Scopus ID: 56195843600. ORCID: 0000-0002-7463-1679. ResearcherID: A-4695-2015.

Information about the authors

Kasperovich Andrei 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 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. SPIN code: 9899-4087. Scopus ID: 57216373854. ORCID: 0009-0005-7417-194X. ResearcherID: MCJ-2869-2025.

Efremov Sergey Anatol'yevich – Academician of Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, DSc (Chemistry), Professor, Deputy Director of the Center for Physico-Chemical Methods of Research and Analysis. Al-Farabi Kazakh National University (71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan). E-mail: efremosa@mail.ru. Scopus ID: 7801646138. ORCID: 0000-0002-3542-4140. ResearcherID: B-1178-2015.

Nechipurenko Sergey Vital'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Composite Materials of the Center for Physico-Chemical Methods of Research and Analysis. Al-Farabi Kazakh National University (71 Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan). E-mail: nechipurenkos@mail.ru. Scopus ID: 56195843600. ORCID: 0000-0002-7463-1679. ResearcherID: A-4695-2015.

Поступила 05.11.2025