

УДК 678.046.3

**В. В. Боброва¹, Н. Р. Прокопчук¹,
С. А. Ефремов², С. В. Нечипуренко²**

¹Белорусский государственный технологический университет

²Казахский национальный университет имени Аль-Фараби

СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОД-КРЕМНИСТЫМ КОМПОЗИТОМ

Основной целью данной работы является исследование влияния замены промышленного полуактивного технического углерода марки N550 на углерод-кремнистый композит (УКК) растительного происхождения, основные пластоэластические и упругопрочностные характеристики промышленных эластомерных композиций, предназначенных для изготовления резинотехнических изделий. Объектами исследования выступали резиновые смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука, наполненные полуактивным техническим углеродом марки N550 и УКК в различных соотношениях. Исследование вязкости по Муни резиновых смесей показало, что замена N550 на УКК приводит к снижению вязкости на 16,5–21,2% независимо от дозировки УКК. Определение кинетических параметров процесса вулканизации резиновых смесей выявило, что при введении УКК происходит увеличение времени достижения оптимума вулканизации на 70,1–75,5%, при этом повышается стойкость резин к преждевременной вулканизации на 29,4–41,7% по сравнению с композицией, содержащей N550. Определение основных упругопрочностных характеристик показало, что использование УКК и N550 в соотношении 10 / 80 и 20 / 70 в эластомерной композиции позволяет получать вулканизаты с уровнем, соответствующим требованиям технических условий на промышленную резиновую смесь по показателям условной прочности при растяжении, относительном удлинении при разрыве, твердости резин по Шору А, относительной остаточной деформации сжатия.

Ключевые слова: углерод-кремнистый композит, бутадиен-нитрильный каучук, пластоэластические свойства, упругопрочностные характеристики.

Для цитирования: Боброва В. В., Прокопчук Н. Р., Ефремов С. А., Нечипуренко С. В. Свойства эластомерных композиций, наполненных углерод-кремнистым композитом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С. 156–164.

**V. V. Bobrova¹, N. R. Prokopchuk¹,
S. A. Efremov², S. V. Nechipurenko²**

¹Belarusian State Technological University

²Al-Farabi Kazakh National University

PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITES FILLED WITH CARBON-SILICON COMPOSITE

The main purpose of this work is to study the effect of replacing industrial semi-active carbon black grade N550 with a carbon-silicon composite (CCS) of plant origin on the main plastoelastic and elastic-strength characteristics of industrial elastomer compositions intended for the manufacture of rubber products. The objects of the study were rubber compounds based on nitrile rubber filled with semi-active carbon black grade N550 and CSS in various proportions. A study of the Mooney viscosity of rubber compounds showed that the replacement of N550 with CSS leads to a decrease in viscosity by 16.5–21.2%, regardless of the dosage of CSS. Determination of the kinetic parameters of the process of vulcanization of rubber compounds revealed that with the introduction of CCC there is an increase in the time to reach the optimum vulcanization by 70.1–75.5%, while the resistance of rubber to premature vulcanization increases by 29.4–41.7% compared with the composition containing N550. The determination of the main elastic-strength characteristics showed that the use of CSS and N550 in the ratio of 10 / 80 and 20 / 70 in the elastomeric composition makes it possible to obtain vulcanizates with a level corresponding to the requirements of the technical specifications for an industrial rubber compound in terms of conditional tensile strength, relative elongation at rupture, hardness of rubbers according to Shore A, relative compression set.

Key words: rice husk, nitrile butadiene rubber, plastoelastic properties, elastic-strength characteristics.

For citation: Bobrova V. V., Prokopchuk N. R., Efremov S. A., Nechipurenko S. V. Properties of elastomer composites filled with carbon-silicon composite. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 2 (259), pp. 156–164 (In Russian).

Введение. Каучуки являются важными промышленными материалами, широко применяемыми в различных областях благодаря своей высокоэластичности [1]. Использование упрочняющих наполнителей повышает механические показатели резиновых композитов, расширяя возможности их применения [2]. Промышленные наполнители, такие как технический углерод и диоксид кремния, получили широкое распространение благодаря своей способности образовывать физические связи с макромолекулами каучука и передавать энергию от молекулярных цепей к наполнителю.

В последние годы исследователи привлекает синергетический эффект взаимодействия технического углерода и диоксида кремния для получения гибридного наполнителя для упрочнения резин [3–5]. Однако высокая стоимость производства и экологические проблемы ограничивают использование технического углерода, диоксида кремния или их гибридного наполнителя. Ввиду этого становится актуальной тема поиска новых упрочняющих наполнителей из экологически чистых источников для резиновой промышленности.

Зола рисовой шелухи, получаемая путем карбонизации рисовой шелухи и стебля, – углерод-кремнистый композит (УКК), обладает большими преимуществами, такими как низкая стоимость, возобновляемость, экологичность. Ввиду этого изучение потенциального применения УКК в качестве упрочняющего материала является приоритетным направлением [6, 7]. Ранее были проведены исследования [8–11], которые выявили возможность использования УКК, полученного при определенных условиях карбонизации, в качестве полуактивного армирующего наполнителя эластомерных композиций на основе бутадиен-стирольного каучука (БСК) и натурального каучука (НК). Введение УКК не влияло на показатели процесса вулканизации, однако приводило к более низким физико-механическим показателям резиновых вулканизатов по сравнению с другими упрочняющими наполнителями, такими как технический углерод и диоксид кремния [12, 13]. Стоит отметить, что количественное содержание диоксида кремния в УКК превышает 50%, а он, в свою очередь, имеет высокую полярность и гидрофильную поверхность из-за силанольных групп на поверхности. Ввиду этого УКК несовместим с неполярными каучуками, что, в свою очередь, приводит к слабому взаимодействию каучука и УКК [14–16].

Основная часть. Цель данной работы – исследование влияния замены среднеактивного технического углерода марки N550 углерод-кремнистым композитом в различных дозировках

на пластозластические и упругопрочностные показатели эластомерных композиций, предназначенных для изготовления резинотехнических изделий.

Для оценки усиливающего действия УКК были изготовлены промышленные резиновые смеси на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНК) (табл. 1) с различной дозировкой УКК (табл. 2).

Таблица 1

Рецептура эластомерных композиций на основе БНК

Наименование ингредиентов	Содержание ингредиентов, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука
БНКС-18 АМН	100,00
Сера	2,60
Ускорители вулканизации	2,45
Белила цинковые	5,00
Противостарители	2,00
Наполнитель	90,00
Пластификатор	35,00
Стеариновая кислота	1,00
Общее	238,05

Наполнение смесей осуществляли техническим углеродом марки N550 и УКК в разном соотношении (табл. 2).

Исследуемый УКК представляет собой смесь измельченного на роторно-ножевой мельнице рисового стебля и рисовой шелухи до фракции 5,0 мм. Высушенная композиция подвергалась процессу карбонизации в пиролизной печи без доступа кислорода при температуре 550–600°C. Далее полученный карбонизат измельчали до фракции ниже 25,0 мкм.

Таблица 2

Соотношение наполнителей в исследуемой резиновой смеси

№ образца	Соотношение УКК / N550, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука
1	0 / 90
2	10 / 80
3	20 / 70
4	30 / 60
5	40 / 50
6	50 / 40
7	60 / 30
8	70 / 20
9	80 / 10
10	90 / 0

Полученный дисперсный материал – углерод-кремнистый композит – является готовым продуктом для использования в качестве наполнителя

для эластомерных композиций, а также в виде углеродного наполнителя для композиционных материалов и имеет химический состав, который определен рентгеноспектральным анализом (табл. 3) [17].

Таблица 3

Химический состав углерод-кремнистого композита

Химический состав	Содержание, %
Углерод	47,26
SiO ₂	50,38
Na ₂ O	0,04
MgO	0,16
Al ₂ O ₃	0,01
P ₂ O ₅	0,11
K ₂ O	1,72
CaO	0,28
TiO ₂	0,01
MnO	0,02
Fe ₂ O ₃	0,01

Как видно из таблицы, УКК содержит 47,26% углерода и 50,38% диоксида кремния, что позволяет вводить его для усиления эластомерных композиций в качестве гибридного наполнителя [18].

Определение пластоэластических свойств резиновых смесей проводилось на сдвиговом дисковом вискозиметре MV2000 в соответствии с ГОСТ 10722–76 [19], исследование кинетики вулканизации – на реометре ODR2000 согласно ГОСТ 12535–84 [20], определение упругопрочностных свойств при растяжении осуществлялось в соответствии с ГОСТ 270–75 [21], исследование на стойкость к старению при статической деформации сжатия выполнялось согласно ГОСТ 9.029–74 [22], определение твердости по Шору А проводилось в соответствии с ГОСТ 263–75 [23].

Показатель вязкости эластомерных композиций оказывает влияние на производительность технологического процесса, а также на качество готовой продукции. Определение вязкости по Муни является одним из наиболее распространенных способов исследования молекулярной структуры эластомерных композиций. На рис. 1 приведены результаты исследований по определению вязкости по Муни эластомерных композиций с различным содержанием УКК.

Исследование резиновых смесей на основе бутадиен-нитрильного каучука показало, что введение в резиновую смесь УКК способствует снижению (16,5–21,2%) показателя вязкости по Муни эластомерных композиций по сравнению с резиновой смесью, наполненной техническим углеродом. Это связано с тем, что УКК имеет средний размер частиц больше,

чем технический углерод (6–10 мкм), за счет чего происходит снижение поверхности наполнителя, контактирующей с каучуком, и как следствие – более слабое взаимодействие с эластомерной матрицей [24]. В то же время введение УКК в резиновую смесь в дозировках от 10 до 90 мас. ч. незначительно изменяет вязкость по Муни. Выявленный характер изменения вязкости резиновой смеси может быть обусловлен увеличением содержания в объеме эластомерной композиции более полярного наполнителя, что обуславливает улучшение диспергирования наполнителя в каучуке, а также повышением взаимодействия с полимером [25].

Кроме того, неоднородная поверхность (шероховатость) УКК также может притягивать низкомолекулярные компоненты резиновой смеси, что может привести к изменению характера и интенсивности взаимодействия в системе эластомер – наполнитель [26].

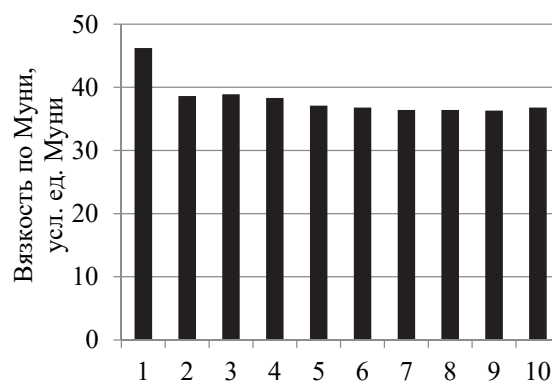


Рис. 1. Вязкость по Муни резиновых смесей, наполненных УКК / N550, с различной дозировкой исследуемого наполнителя (нумерация согласно табл. 2)

Вулканизация представляет собой процесс образования трехмерной пространственной сетки цепных макромолекул. При этом в полимерной матрице возникают химические связи между макромолекулами, обусловленные химической реакцией агента вулканизации или энергетического фактора. Процесс вулканизации приводит к образованию вулканизационных узлов (поперечных связей). Поперечные связи ограничивают перемещения макромолекул при механическом воздействии [27].

В табл. 4 представлены кинетические параметры процесса вулканизации промышленных эластомерных композиций на основе бутадиеннитрильного каучука с исследуемым наполнителем.

Из полученных данных видно, что введение в резиновую смесь УКК в различных дозировках приводит к снижению на 24,2–45,5%

минимального (M_L) крутящего момента с увеличением дозировки УКК по сравнению с композицией с техническим углеродом. Минимальный крутящий момент косвенно позволяет охарактеризовать вязкоупругие свойства резиновых смесей [28], 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 [29]. Введение в резиновые смеси исследуемого УКК вызывает снижение (13,4–34,4%) максимального крутящего момента по сравнению с резиновыми смесями, содержащими технический углерод.

Таблица 4

Кинетические параметры процесса вулканизации эластомерных композиций с разным наполнением УКК

Образец	M_L , дН·м	M_H , дН·м	t_{S2} , мин	R_v , дН·м/мин	ΔM , дН·м
1	6,6	38,9	1,7	26,9	32,3
2	5,0	33,7	2,2	21,0	28,7
3	4,9	33,4	2,2	18,8	28,5
4	4,6	32,4	2,3	17,3	27,4
5	4,2	30,8	2,3	13,4	26,5
6	4,1	30,2	2,3	12,1	25,9
7	4,0	29,6	2,3	11,3	25,6
8	3,9	27,5	2,2	11,0	23,6
9	3,8	26,6	2,3	10,9	22,6
10	3,6	25,5	2,4	9,9	21,9

Примечание. 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; R_v – показатель скорости вулканизации, дН·м/мин; ΔM – разность между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН·м.

Следует отметить, что разница между максимальным и минимальным крутящими моментами (ΔM) характеризует плотность поперечного сшивания резин [25]. Эластомерные композиции, наполненные УКК, имеют меньшие значения данного показателя по сравнению с резиновой смесью содержащей технический углерод. Введение в резиновые смеси исследуемого УКК в соотношении 10 / 80, 20 / 70 – УКК / N550 приводит к снижению ΔM на 11,1–11,8%. При увеличении содержания УКК от 30 до 90 мас. ч. в резиновой смеси данный показатель уменьшается более значительно на 15,2–32,2%. Снижение ΔM , вероятно, связано с тем, что применение УКК в составе эластомерной композиции оказывает влияние на процесс формирования поперечных связей в резине.

Введение УКК в исследуемых дозировках приводит к повышению стойкости к преждевременной подвулканизации на 29,4–41,7% по сравнению с композицией, содержащей технический углерод, о чем свидетельствует показатель времени увеличения минимального крутящего момента на 2 единицы (t_{S2}).

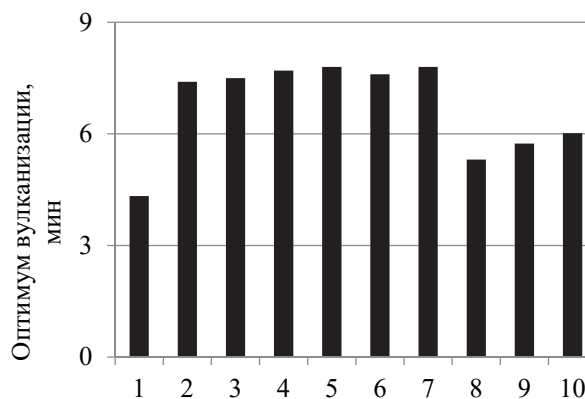


Рис. 2. Оптimum вулканизации резиновых смесей, наполненных УКК / N550, с различным наполнением

Определение оптimumа вулканизации резиновых смесей на основе бутадиен-нитрильного каучука при температуре 160°C показало, что замена N550 на УУК в дозировках от 10 до 60 мас. ч. приводит к увеличению на 70,1–75,5% времени достижения оптimumа вулканизации (рис. 2) по сравнению с резиновой смесью, наполненной техническим углеродом. При этом оптимальное время вулканизации резиновой смеси при содержании УКК в дозировках от 10 до 60 мас. ч практически не изменяется. Это, вероятно, связано с тем, что УКК имеет более развитую поверхность, которая может адсорбировать компоненты вулканизирующей системы, тем самым замедляя процесс вулканизации [26]. Полученные данные свидетельствуют о том, что для ускорения процесса вулканизации необходима корректировка вулканизирующей системы.

В табл. 5 представлены результаты определения показателей пространственной сетки вулканизатов, наполненных N550 и УКК в различном соотношении на основе БНК.

Анализ данных показал, что введение УКК в дозировке до 50 мас. ч. приводит к незначительному снижению (на 3,2–4,5%) плотности поперечного сшивания резин по сравнению с композицией, содержащей N550. Дальнейшее увеличение содержания УКК в эластомерных композициях вызывает более существенное снижение плотности поперечного сшивания резин (на 8,1–15,34%). Уменьшение плотности поперечного сшивания резин при использовании в их составе УКК обусловлено влиянием исследуемого наполнителя на процесс взаимодействия сшивающего агента с

макромолекулами каучука.

Таблица 5

**Показатели пространственной сетки
промышленных резин на основе БНК**

Образец	M_c , кг/моль	$n \cdot 10^{-19}$, см ³	$v \cdot 10^4$, моль/см ³
1	5477,7	10,6	1,8
2	5658,6	10,2	1,7
3	5724,4	10,1	1,7
4	5730,1	10,1	1,7
5	5732,6	10,1	1,7
6	5725,3	10,1	1,7
7	5956,1	9,7	1,6
8	6786,4	8,5	1,4
9	6726,7	8,6	1,4
10	6470,4	8,9	1,4

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

В табл. 6 представлены упругопрочностные показатели резин, наполненных исследуемым УКК, такие как условная прочность резин при растяжении (f_p) и относительное удлинение при разрыве (ε_p) (табл.6).

Таблица 6

Физико-механические свойства исследуемых резин

Образец	f_p , МПа	ε_p , %
1	13,6	290
2	12,1	300
3	10,3	310
4	9,3	310
5	6,8	320
6	6,5	330
7	5,1	330
8	3,7	370
9	3,4	330
10	2,6	270

Результаты определения физико-механических характеристик резин на основе БНК с различным соотношением исследуемого УКК и технического углерода марки N550 показали, что введение в резиновую смесь исследуемого УКК и N550 в соотношении 10 / 80 и 20 / 70 позволяет получать вулканизаты с уровнем основных физико-механических показателей, соответствующих требованиям технических условий на промышленную резиновую смесь. В то же время при увеличении содержания УКК от 30 до 90 мас. ч. условная прочность при растяжении уменьшается на 31,6–80,1% по сравнению с композицией, наполненной техническим углеродом. Это свя-

зано с тем, что высокое содержание УКК приводит к неоднородности структуры, агломерации частиц наполнителя, тем самым создавая пустоты (очаги разрушения) и их дальнейший рост, вызывающий разрушение эластомерных композиций [26].

В табл. 7 представлены результаты исследований твердости резин на основе БНК, наполненных УКК.

Таблица 7

**Твердость промышленных резиновых смесей
на основе БНК**

Образец	Твердость по Шору А, усл. ед. Шор
1	63,7
2	60,1
3	60,3
4	58,9
5	58,4
6	57,7
7	57,0
8	55,5
9	53,9
10	51,1

Из представленных данных видно, что увеличение содержания УКК в эластомерных композициях выше 20 мас. ч. приводит к получению резин, характеризующихся меньшей (7,5–19,8%) твердостью по сравнению с композициями, наполненными техническим углеродом.

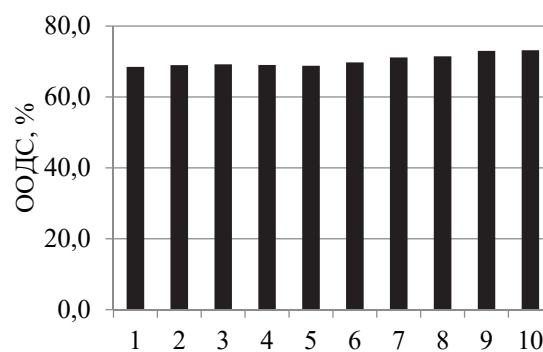


Рис. 3. Относительная остаточная деформация сжатия резин

Исследование влияния различного содержания УКК на показатель относительной остаточной деформации сжатия (рис. 3) резин (ООДС) по сравнению с эластомерными композициями, наполненными техническим углеродом, показал, что введение в резиновую смесь УКК и N550 в соотношении до 10 / 80–40 / 50 не изменяет данный показатель. По-

следующее увеличение содержания УКК приводит к незначительному повышению (3,9–6,9%) значения ООДС. Выявленный характер изменения ООДС исследуемых резин обусловлен различной природой поперечных связей и плотностью поперечного сшивания, образующихся при вулканизации в присутствии наполнителей.

Заключение. Замена полуактивного технического углерода марки N550 на более дешевый гибридный наполнитель – углерод-кремнистый

композит наиболее целесообразна в дозировках 10 и 20 мас. ч. Данная замена обеспечивает снижение вязкости по Муни резиновых смесей, что уменьшает энергозатраты при переработке эластомерных композиций. При этом получают вулканизаты с удовлетворительным комплексом физико-механических свойств. Замена технического углерода на более дешевый наполнитель растительного происхождения позволит снизить себестоимость готового изделия.

Список литературы

1. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent / H. Qiao [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 356–364.
2. A facile ball milling method to produce sustainable pyrolytic rice husk biofiller for reinforcement of rubber mechanical property / B. Xue [et al.] // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 141. 111791. DOI: org/10.1016/j.indcrop.2019.111791.
3. Song Y., Zeng L., Zheng Q. Understanding the reinforcement and dissipation of natural rubber compounds filled with hybrid filler composed of carbon black and silica // *Chinese Journal of Polymer Science*. Vol. 35, no. 11. P. 1436–1446. DOI: 10.1007/s10118-017-1987-5.
4. Tire tread compounds with reduced rolling resistance and improved wet grip / V. D. Velga [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 134, no. 3. 45334.
5. Synergistic Effect of Carbon Black and Carbon–Silica Dual Phase Filler in Natural Rubber Matrix / X. Xiong [et al.] // *Polymer Composites*. 2014. Vol. 35, no. 8. P. 1466–1472.
6. Chemical and nanomechanical analysis of rice husk modified by ATRP-grafted oligomer / S. M. Morsi [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 360, no. 2. P. 377–385.
7. Shcherbakova T. P., Vaseneva I. N. A Biogenic Silica Synthesis Method // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 54. P. 297–303.
8. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk Ash–Filled Natural Rubber Compounds / H. M. Da Costa [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. Vol. 83. P. 2331–2346. DOI: 10.1002/app.10125.
9. Rice Husk Ash Filled Natural Rubber. I. Overall Rate Constant Determination for the Vulcanization Process from Rheometric Data / H. M. Da Costa [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. Vol. 87. P. 1194–1203. DOI: 10.1002/app.11452.
10. Natural rubber compositions with the partial/total replacement of carbon black/naphthenic oil by renewable additives: Rice husk ash and cashew nut oil / S. Moresco [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. Vol. 137, no. 4. 48134. DOI: 10.1002/app.48314.
11. 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. 115620. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115620.
12. Rice Husk Ash Filled Natural Rubber. III. Role of Metal Oxides in Kinetics of Sulfur Vulcanization / H. M. Da Costa [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. Vol. 90. P. 1519–1531. DOI: 10.1002/APP.12684.
13. A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash / L. Xinyu [et al.] // *Research on Chemical Intermediates*. 2015. Vol. 42, no. 2. P. 893–913. DOI: org/10.1007/s11164-015-2061-y.
14. 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. P. 2485–2493. DOI: 10.1002/app.10249.
15. Rice Husk Ash as Raw Material for the Synthesis of Silicon and Potassium Slow-Release Fertilizer / A. A. França [et al.] // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2017. Vol. 28, no. 11. P. 2211–2217.
16. Comparison between rice husk ash grown in different regions for stabilizing fly ash from a solid waste incinerator / L. Benassi [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 159. P. 128–134.
17. 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.
18. Lui Z., Zhang Y. Enhanced mechanical and thermal properties of SBR composites by introducing graphene oxide nanosheets decorated with silica particles // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 102. P. 236–242.

19. Метод определения вязкости и способности к преждевременной вулканизации: ГОСТ 10722–76. Введ. 01.07.77. М.: Изд-во стандартов, 1976. 9 с.
20. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре: ГОСТ 12535–84. Введ. 06.02.1984. М.: Изд-во стандартов, 1985. 33 с.
21. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 1975. 29 с.
22. Методы испытаний на стойкость к старению при статической деформации сжатия ГОСТ 9.029–74. Введ. 01.01.74. М.: Изд-во стандартов, 1982. 7 с.
23. Метод определения твердости по Шору А: ГОСТ 263–75. Введ. 21.01.1975. М.: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
24. Cataldo F. Evaluation of pyrolytic oil from scrap tires as plasticizer of rubber compounds // *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2006. Vol. 22, no. 4. P. 243–252.
25. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: КНИТУ, 2016. 420 с.
26. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Киров: ВятГУ; Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.
27. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. М.: Химия, 1978. 287 с.
28. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. М.: Сант-ТМ, 2001. 400 с.
29. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.

References

1. Qiao H., Chao M., Hui D., Lui J., Zheng J., Lei W., Zhou X., Wang R., Zhang L. Enhanced interfacial interaction and excellent performance of silica/epoxy group-functionalized styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites without any coupling agent. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 114, pp. 356–364.
2. Xue B., Wang X., Sui J., Xu D., Zhu Y., Liu X. A facile ball milling method to produce sustainable pyrolytic rice husk biofiller for reinforcement of rubber mechanical property. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 141, 111791. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111791.
3. Song Y., Zeng L., Zheng Q. Understanding the reinforcement and dissipation of natural rubber compounds filled with hybrid filler composed of carbon black and silica. *Chinese Journal of Polymer Science*, vol. 35, no. 11, pp. 1436–1446. DOI: 10.1007/s10118-017-1987-5.
4. Velga V. D., Rossignol T. M., Crespo J. da S., Carli L. N. Tire tread compounds with reduced rolling resistance and improved wet grip. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, no. 39, 45334.
5. Xiong X., Wang J., Jia H., Ding L., Dai X., Fei X. Synergistic Effect of Carbon Black and Carbon–Silica Dual Phase Filler in Natural Rubber Matrix. *Polymer Composites*, 2014, vol. 35, no. 8, pp. 1466–1472.
6. Morsi S. M., Pakzad A., Amin A., Yassar R. S., Heiden P. A. Chemical and nanomechanical analysis of rice husk modified by ATRP-grafted oligomer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 360, no. 2, pp. 377–385.
7. Shcherbakova T. P., Vaseneva I. N. A Biogenic Silica Synthesis Method. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol. 54, pp. 297–303.
8. Da Costa H. M., Visconte L. L. Y., Nunes R. C. R., Furtado C. R. G. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, vol. 83, pp. 2331–2346. DOI: 10.1002/app.10125.
9. Da Costa H. M., Visconte L. L. Y., Nunes R. C. R., Furtado C. R. G. Rice Husk Ash Filled Natural Rubber. I. Overall Rate Constant Determination for the Vulcanization Process from Rheometric Data. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, vol. 87, pp. 1194–1203. DOI: 10.1002/app.11452.
10. Moresco S., Scarton C. T., Giovanela M., Carli L. N., Bielinski D. M., Crespo J. S. Natural rubber compositions with the partial/total replacement of carbon black/naphthenic oil by renewable additives: Rice husk ash and cashew nut oil. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 137, no. 4, 48134. DOI: 10.1002/app.48314.
11. 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, 115620. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115620.
12. Da Costa H. M., Visconte L. L. Y., Nunes R. C. R., Furtado C. R. G. Rice Husk Ash Filled Natural

Rubber. III. Role of Metal Oxides in Kinetics of Sulfur Vulcanization. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, vol. 90, pp. 1519–1531. DOI: 10.1002/APP.12684.

13. Xinyu L., Xiaodong C., Liu Y., Hongzhuo C., Yumei T., Zichen W. A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash. *Research on Chemical Intermediates*, 2015, vol. 42, no. 2, pp. 893–913. DOI: 10.1007/s11164-015-2061-y.

14. 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, pp. 2485–2493. DOI: 10.1002/app.10249.

15. França A. A., Schultz J., Borges R., Wypych F., Mangrich A. S. Rice Husk Ash as Raw Material for the Synthesis of Silicon and Potassium Slow-Release Fertilizer. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2017, vol. 28, no. 11, pp. 2211–2217.

16. Benassi L., Bosio A., Dalipi R., Borgese L., Rodella N., Pasquali M., Depero L. E., Bergese P., Bontempi E. Comparison between rice husk ash grown in different regions for stabilizing fly ash from a solid waste incinerator. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 159, pp. 128–134.

17. Bobrova V. V., Prokopchuk N. R., Efremov S. A., Nechipurenko S. V. Carbon-silicon filler for elastomer compositions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geocology, 2022, no. 1 (253), pp. 89–95 (In Russian).

18. Lui Z., Zhang Y. Enhanced mechanical and thermal properties of SBR composites by introducing graphene oxide nanosheets decorated with silica particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 102, pp. 236–242.

19. GOST 10722–76. Method for determining the viscosity and the ability to premature vulcanization / Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1976. 9 p. (In Russian).

20. GOST 12535–84. A mixture of rubber. Method for the determination of vulcanization characteristics vulcameter. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985. 33 p. (In Russian).

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

22. GOST 9.029–74. Test methods for aging resistance under static compression deformation. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1982. 7 p. (In Russian).

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

24. Cataldo F. Evaluation of pyrolytic oil from scrap tires as plasticizer of rubber compounds. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2006, vol. 22, no. 4, pp. 243–252.

25. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan', KNITU Rubl., 2016. 420 p. (In Russian).

26. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Hlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov*. [Structure and properties of materials based on elastomers]. Kirov, VyatGU Publ.; Omsk, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p. (In Russian).

27. Dontsov A. A. *Protsessy strukturirovaniya elastomerov* [Structuring processes for elastomers]. Moscow, Khimiya Rubl., 1978. 287 p. (In Russian).

28. 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 Rubl., 2001. 400 p. (In Russian).

29. Averko-Antonovich I. Yu., Bikmullin R. T. *Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov* [Methods for studying the structure and properties of polymers]. Kazan', KGTU Rubl., 2002. 604 p. (In Russian).

Информация об авторах

Боброва Валерия Владимировна – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lerik_bobrik94@mail.ru

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

Ефремов Сергей Анатольевич – академик Казахтанской национальной академии естественных наук, доктор химических наук, профессор, зам еститель директора Центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский национальный университет имени Аль-Фараби (050040, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71, Республика Казахстан). E-mail: efremsa@mail.ru

Нечипуренко Сергей Витальевич – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, заведующий лаборатории композиционных материалов Центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский национальный университет имени Аль-Фараби (050040, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71, Республика Казахстан). E-mail: nechipunrenkos@mail.ru

Information about the authors

Bobrova Valeriya Vladimirovna – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lerik_bobrik94@mail.ru

Prokopchuk Nikolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

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

Nechipurenko Sergey Vital'yevich – leading researcher, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratories of Composite Materials of the Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis. Al-Farabi Kazakh National (71, Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan). E-mail: nechipunrenkos@mail.ru

Поступила 08.06.2022