

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ SCIENTIFIC PUBLICATIONS

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, БИОТЕХНОЛОГИИ CHEMICAL ENGINEERING, BIOTECHNOLOGIES

УДК 678.046

Ж. С. Шашок

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БУТИЛОВОГО РЕГЕНЕРАТА

Определено влияние условий термомеханической обработки на технологические свойства эластомерных композиций из бутилового регенерата. Объектами исследования являлись эластомерные композиции на основе двух типов бутилового регенерата, которые получены радиационным методом с дозами облучения 30 кГр (БР (30)) и 50 кГр (БР (50)) и прошли термомеханическую обработку в штифтовом экструдере. Условия обработки различались температурой в экструзионной головке (70 и 80°C) и частотой вращения шнека (20 и 40 об./мин). Определено, что вязкость по Муни резиновых смесей на основе регенерата БР (50) в 1,31–1,46 раза меньше, чем вязкость композиций на основе регенерата БР (30). Установлено, что с повышением температуры и интенсивности механического воздействия вязкость по Муни увеличивается до 16% для смесей на основе БР (30) и до 6,7% для БР (50), что может быть связано с увеличением скорости процесса структурирования в объеме материала в условиях повышенной температуры обработки. Определено, что с увеличением температуры обработки бутилового регенерата оптимальное время вулканизации резиновых смесей на его основе уменьшается на 14,7–16,3% для композиций на основе БР (30) и до 9,9% для БР (50). При этом резины на основе регенерата БР (50) характеризуются в 1,46–1,61 раза большим показателем поперечного сшивания. Характер изменения параметров вулканизации эластомерных композиций обусловлен неопределенностью регенерата и его способностью взаимодействовать с компонентами вулканизирующей системы для формирования пространственной структуры резин.

Ключевые слова: бутиловый регенерат, эластомерная композиция, вязкость по Муни, оптимальное время вулканизации, плотность сшивания.

Для цитирования: Шашок Ж. С. Влияние условий термомеханической обработки на технологические свойства композиций на основе бутилового регенерата // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 5–10.

Zh. S. Shashok

Belarusian State Technological University

INFLUENCE OF BUTYL REGENERATE ADDITIVES ON PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITIONS

The influence of the conditions of thermomechanical treatment on the technological properties of elastomeric compositions from butyl reclaim was determined. The objects of the study were elastomeric compositions based on two types of butyl reclaim, which were obtained by the radiation method with radiation doses of 30 kGy (BR (30)) and 50 kGy (BR (50)) and underwent thermal mechanical treatment in a pin extruder. The processing conditions differed in the temperature in the extrusion head (70 and 80°C) and the screw speed (20 and 40 rpm). It was determined that the Mooney viscosity of rubber compounds

based on BR (50) reclaim is 1.31–1.46 times lower than the viscosity of compositions based on BR reclaim (30). It was found that with an increase in the temperature and intensity of mechanical action, the Mooney viscosity increases to 16% for mixtures based on BR (30) and up to 6.7% for BR (50), which may be associated with an increase in the rate of the structuring process. In the volume of material under conditions of elevated processing temperatures. It was determined that with an increase in the processing temperature of butyl regenerate, the optimal vulcanization time of rubber compounds based on it decreases by 14.7–16.3% for compositions based on BR (30) and to 9.9% for BR (50). At the same time, rubbers based on BR (50) regenerate are characterized by a 1.46–1.61 times higher crosslinking index. The nature of the change in the parameters of the vulcanization of elastomeric compositions is due to the indefiniteness of the regenerate and its ability to interact with the components of the vulcanizing system to form the spatial structure of rubbers.

Key words: butyl reclaimed, elastomeric composition, Mooney viscosity, optimal vulcanization time, crosslinking density.

For citation: Shashok Zh. S. Influence of butyl regenerate additives on properties of elastomer compositions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 5–10 (In Russian).

Введение. Подавляющее большинство способов регенерации резин (в основном изношенных покрышек и камер, отходов производства резинотехнических изделий) основано на двух последовательных процессах, включающих механическое измельчение отходов резиновых изделий в крошку и получение из нее регенерата. Общими недостатками указанных процессов являются: измельчение и переработка сопровождаются значительными затратами энергии; процесс регенерации требует использования металлоемкого оборудования (смесители, экструдеры, вальцы и др.); конечным продуктом является регенерат, дальнейшая вулканизация которого позволяет получать резины с заведомо худшими физико-механическими свойствами, нежели резины на основе каучука; процесс регенерации сопровождается выбросом в окружающую среду паров и дымов, содержащих, в частности, серу [1].

В связи с этим разрабатываются различные методы регенерации резин посредством ионизирующего излучения. В общем, к их преимуществам относятся [2]: высокая эффективность инициирования; возможность проведения процесса при низких температурах; проведение процессов без добавок специальных инициаторов или катализаторов, благодаря чему можно получать продукты повышенной чистоты; регулирование скорости инициирования с получением желаемого распределения центров инициирования в объеме.

Для большинства каучуков, склонных к структурированию под действием радиации, применение данного метода невозможно. Однако ввиду того, что бутилкаучук под воздействием гамма-излучения склонен к деструкции, его регенерацию радиационным методом можно осуществлять. Это связано с тем, что в бутиловом каучуке преобладают четвертичные атомы углерода. Объясняется преимущественная деструкция тем, что при воздействии радиации образуются свободные радикалы, при этом разрыв идет как по связям С–С,

так и С–Н. При этом в высоконенасыщенных каучуках возможна рекомбинация образующихся при отрыве углерода радикалов, обуславливающая преобладание разрыва по связям С–Н. Итогом данного процесса является структурирование полимера. В случае же высоконенасыщенного каучука, такого как БК, преобладает не рекомбинация, а диспропорционирование. В результате происходит деструкция полимера [3, 4].

Простейший радиационный вулканизат содержит только каучук и наполнитель. На практике радиационной вулканизации подвергают резины, содержащие различные ингредиенты: наполнители, антиоксиданты, сенсибилизаторы, красители и др. Эффективность радиационного сшивания таких многокомпонентных систем оценивается по величине дозы (или интервалу доз), при которой достигаются оптимальные свойства вулканизатов. Для подавляющего большинства каучуков скорость сшивания в присутствии наполнителя увеличивается, причем сенсибилизирующее действие зависит как от природы наполнителя, так и от его концентрации [5, 6].

Механической обработкой девулканизата заканчиваются все известные методы получения регенерата. При этом наиболее существенно свойства регенерата изменяются в течение первых десяти минут обработки. При значительной длительности обработки достигается такая степень относительной стабильности, при которой дальнейшая обработка малоэффективна. При механической обработке возрастает содержание растворимой фракции и пластичность, причем максимальный эффект достигается при низкотемпературной пластикации [7].

Бутилрегенерат используют в качестве заменителя бутилкаучука в композициях различного назначения. Основной трудностью, с которой сталкиваются потребители радиационного бутилрегенерата, не подвергнутого механической обработке, является его плохая растворимость [8].

Применение бутилрегенерата с высокими поглощенными дозами (200 кГр и выше) позволяет решить проблему растворения. Однако, во-первых, стоимость регенерата с ростом поглощенной дозы значительно повышается. Во-вторых, высокие дозы облучения приводят к большим разрушениям основной цепи полимера, что отрицательно сказывается на конечных физико-механических свойствах композиций [9].

Несмотря на то, что наибольшая эффективность механодеструкции достигается при низкотемпературной пластикации, пострадиационная обработка при повышенных температурах позволяет усилить эффект за счет применения дополнительных источников радикалов [10, 11].

Основная часть. Целью работы являлось исследование влияния условий термомеханической обработки на технологические свойства эластомерных композиций из бутилового регенерата.

В качестве объектов исследования использовались два типа бутилового регенерата, полученные радиационным методом путем радиационного воздействия с дозами облучения 30 кГр (БР (30)) и 50 кГр (БР (50)), а также дополнительно подвергшиеся специальной обработке в лабораторном штифтовом экструдере холодного питания типа ЕЕК 45.14 М-12/70. Условия обработки бутилового регенерата в экструдере: температура в зоне загрузки (T_z) – 40°C; температура в зоне разогрева (T_p) – 60°C; температура в зоне пластикации (T_n) – 70°C; температура в экструзионной головке (T_r) – 70 и 80°C; частота вращения шнека – 20 и 40 об./мин. После термомеханической обработки на экструдере бутилового регенерата при различных условиях на его основе были изготовлены резиновые смеси, рецептура которых представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Рецептура резиновой смеси
на основе бутилового регенерата**

Наименование ингредиентов	Содержание ингредиентов на 100 мас. ч. каучука, мас. ч.
Бутиловый регенерат	100,0
Сера	2,0
Акселератор MBT	0,5
Акселератор TMTD	1,0
Цинковые белила	5,0

В соответствии с ГОСТ Р 54552–2011 [12] вязкость по Муни определяли методом ротационной вискозиметрии, а кинетические параметры вулканизации устанавливали по ГОСТ Р 54547–2011 [13].

В технологической практике для оценки вязкостных свойств полимеров и композитов применяются различные условные показатели, соответствующие вязкости в определенных, строго регламентируемых условиях (температура и

режим деформирования), позволяющих производить оценку текучести материала. Для оценки вязкости каучуков и резиновых смесей широкое распространение получили ротационные вискозиметры [14]. Результаты исследования вязкости по Муни эластомерных композиций на основе бутилового регенерата приведены в табл. 2.

Из представленных данных видно, что композиции на основе регенерата, полученного с большей дозой облучения, характеризуются меньшей (в 1,31–1,46 раза) вязкостью по Муни по сравнению с композициями на основе регенерата БР (30). Аналогичная зависимость выявлена и для показателей начальной вязкости по Муни композиций. Следует отметить, что с повышением интенсивности механического воздействия (при увеличении скорости вращения шнека с 20 до 40 об./мин) вязкость резиновой смеси несколько увеличивается. Значение вязкости по Муни композиции на основе БР (30) при температуре в экструзионной головке, равной 70°C, и скорости вращения 20 об./мин составляет 82,2 усл. ед. Муни, а при скорости вращения 40 об./мин – 88,0 усл. ед. Муни. В случае композиций на основе БР (50) изменение скорости вращения шнека приводит к увеличению вязкости по Муни резиновых смесей на 5,0%.

Таблица 2

**Вязкость по Муни резиновых смесей
на основе бутилового регенерата**

Тип регенерата	Начальная вязкость, усл. ед. Муни	Вязкость по Муни, усл. ед. Муни
Режим обработки: $T_r = 70^\circ\text{C}$, 20 об./мин		
БР (30)	177,0	82,2
БР (50)	118,4	61,5
Режим обработки: $T_r = 70^\circ\text{C}$, 40 об./мин		
БР (30)	171,6	88,0
БР (50)	145,9	64,6
Режим обработки: $T_r = 80^\circ\text{C}$, 20 об./мин		
БР (30)	182,3	83,1
БР (50)	139,8	63,6
Режим обработки: $T_r = 80^\circ\text{C}$, 40 об./мин		
БР (30)	183,1	95,5
БР (50)	127,6	65,6

Анализ результатов определения вязкости по Муни резиновых смесей на основе бутиловых регенератов показал, что с увеличением температуры термомеханической обработки вязкость композиции также увеличивается. Наибольшие значения вязкости по Муни резиновых смесей установлены при условиях скорости вращения 40 об./мин и температуре 80°C. В данном случае для композиции на основе БР (30) значение вязкости по Муни составляет 95,5 усл. ед. Муни, а для композиции на основе БР (50) – 65,6 усл. ед. Муни.

Выявленный характер изменения реологических свойств композиций на основе бутилового регенерата может быть обусловлен увеличением скорости процесса структурирования в объеме материала в условиях повышенной температуры обработки и более интенсивного механического воздействия, что также будет приводить к увеличению внутреннего трения и повышению температуры резиновой смеси.

При воздействии ионизирующего излучения на бутилрезину в объеме материала протекают одновременно два химических процесса: сшивание и разрыв цепи с дальнейшим ее разрушением. Ввиду особенностей строения бутилового каучука процесс разрыва цепи преобладает [15].

В результате деструкции основной цепи и поперечных связей происходит снижение молекулярной массы полимера [16, 17]. Одновременно с этим возрастает неопределенность каучука вследствие образования концевых винилиденных групп.

В процессе вулканизации регенерата бутилкаучука возможно не только образование трехмерной сетки, но и восстановление основной цепи путем взаимодействия концевых винилиденных связей с серой, а также уменьшение скорости сшивания за счет наличия сшитого полимера [16, 18, 19], что и оказывает влияние на протекание процесса структурирования эластомерной композиции.

Основные показатели кинетических параметров вулканизации резиновых смесей на основе бутилового регенерата приведены в табл. 3.

Таблица 3
Кинетические параметры вулканизации
резиновых смесей на основе
бутилового регенерата

Тип регенерата	M_L	M_H	t_{s2}	t_{90}	ΔS
Режим обработки: $T_r = 70^\circ\text{C}$, 20 об./мин					
БР (30)	6,4	14,6	2,7	14,3	8,2
БР (50)	4,5	16,6	3,0	20,2	12,0
Режим обработки: $T_r = 70^\circ\text{C}$, 40 об./мин					
БР (30)	6,6	15,9	2,9	15,3	9,3
БР (50)	5,0	18,2	3,2	20,7	13,2
Режим обработки: $T_r = 80^\circ\text{C}$, 20 об./мин					
БР (30)	7,1	16,2	2,5	12,2	9,1
БР (50)	5,6	18,6	2,6	18,2	13,0
Режим обработки: $T_r = 80^\circ\text{C}$, 40 об./мин					
БР (30)	7,5	15,8	2,6	12,8	8,3
БР (50)	4,8	18,0	3,1	20,5	13,2

Примечание. M_L – минимальный крутящий момент, дН·м; M_H – максимальный крутящий момент, дН·м; t_{s2} – время, за которое минимальный крутящий момент изменяется на 2 единицы, мин; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; ΔS – разница между максимальным и минимальным крутящим моментом, дН·м.

На основании полученных данных выявлено, что повышение температуры термомеханической обработки эластомерных композиций на основе бутилового регенерата приводит к незначительному уменьшению стойкости резиновых смесей к подвулканизации. При температуре 70°C и скорости вращения 20 об./мин значение показателя времени увеличения минимального крутящего момента на 2 ед. составляет 2,7 мин, а при температуре 80°C показатель t_{s2} равен 2,5 мин. Аналогичная зависимость определена и для композиций на основе БР (50).

Важнейшим из показателей, получаемых при исследовании кинетики вулканизации резиновой смеси, является оптимальное время вулканизации. Исходя из экспериментальных данных видно, что оптимальное время вулканизации изменяется в основном в зависимости от температуры в головке экструдера, при которой проводилась пластикация, а также от дозы облучения, при которой был получен пластицируемый регенерат. Композиции на основе регенерата типа БР (30) при температуре в экструзионной головке, равной 70°C , имеют значение оптимального времени вулканизации в пределах 14,3–15,3 мин, а при температуре 80°C – 12,2–12,8 мин. Для композиций на основе регенерата БР (50) выявлена аналогичная зависимость, но в данном случае значения t_{90} выше в 1,35–1,60 раза по сравнению с композициями на основе БР (30).

Повышенные показатели времени достижения оптимальной степени вулканизации композиций, полученных при более высокой дозе облучения, могут быть обусловлены меньшим содержанием сшитого эластомера в объеме резиновой смеси, что позволяет повысить глубину протекания процесса структурирования эластомера. Данное предположение подтверждается результатами определения показателя ΔS (разница между максимальным и минимальным крутящим моментом), по которому можно косвенно судить о плотности сшивания вулканизатов [20]. Значение ΔS для композиций, полученных на основе бутилового регенерата БР (50), при всех исследуемых режимах термомеханической обработки находится в пределах 12,0–13,2 дН·м, а для композиций на основе БР (30) – 8,2–9,3 дН·м.

Закключение. Таким образом, результаты исследования влияния условий термомеханической обработки на технологические свойства эластомерных композиций из бутилового регенерата показали, что вязкость по Муни резиновых смесей с повышением температуры и интенсивности механического воздействия увеличивается до 16% для смесей на основе БР (30) и до 6,7% для БР (50). Изменение вязкости по Муни резиновых смесей обусловлено степенью деструкции полимера, полученного при различных дозах облучения, а также

возможностью дополнительного образования связей между цепями полимера в объеме смеси за счет протекания процессов структурирования при воздействии повышенной температуры.

Определено, что с увеличением температуры обработки бутилового регенерата оптимальное время вулканизации резиновых смесей на его основе уменьшается на 14,7–16,3% для композиций на основе БР (30) и до 9,9% для БР (50). Установлено, что резины на основе регенерата, полученного при воздействии дозы облучения в 50 Гр, характеризуются в 1,46–1,61 раза большим

показателем поперечного сшивания. В данном случае изменение кинетических параметров вулканизации эластомерных композиций обусловлено, прежде всего, неопределенностью регенерата и его способностью взаимодействовать с компонентами вулканизирующей системы для формирования поперечных сшивок между цепями полимера. Различия в показателях плотности сшивания резин позволяют прогнозировать получение вулканизатов, отличающихся упруго-прочностными свойствами и стойкостью к тепловому старению.

Список литературы

1. Шаховец С. Е., Смирнов Б. Л. Интенсивная технология регенерации резин // Каучук и резина. 2006. № 1. С. 34–38.
2. Мирясова Ф. К. Применения радиационно-химических и ионизирующих модулей для переработки полимеров в изделия с высокими физико-химическими свойствами: монография. Казань: Каз. гос. ун-т, 2005. 67 с.
3. Вагизова Р. Р. Некоторые особенности вулканизации радиационного регенерата бутилкаучука // Вестник Казанского технологического университета. 2006. № 2. С. 144–147.
4. Feng W., Isayev A. I. Recycling of tire-curing bladder by ultrasonic devulcanization // Polym. Eng. Sci. 2005. Vol. 46. P. 8–18.
5. Myhre M. J., MacKillop D. A. Rubber Recycling // Rubber Chemistry and Technology. 2002. Vol. 75, no. 3. P. 429–474.
6. Zaharescu T., Cazac C., Jipa S. Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber // Nucl. Meth. in Phys. Res. B. 2001. Vol. 15. P. 360–364.
7. Radiation-induced graft copolymerization of some vinyl monomers onto waste rubber powder / E. M. Abdel-Bary [et al.] // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2004. Vol. 36. P. 241–256.
8. Recycling of gamma irradiated inner tubes in butyl based rubber compounds / B. Karaagac [et al.] // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research: Sect. B. 2006. Vol. 65, no. 1. P. 290–293.
9. Manuel H. J. Verwendung von regeneriertem Butylkautschuk in Mischungen für die Innenschicht von Reifen // Kautschuk. Gummi. Kunststoffe. 2000. Vol. 53, no. 12. P. 730–734.
10. Şen M., Uzun C., Kantoğlu Ö. Effect of gamma irradiation conditions on the radiation-induced degradation of isobutylene-isopren rubber // Nucl. Meth. in Phys. Res. B. 2003. No. 1. P. 480–484.
11. Особенности вторичной переработки амортизованных варочных камер и диафрагм / С. В. Усачев [и др.] // Каучук и резина. 2005. № 1. С. 24–31.
12. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.
13. Смесей резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров: ГОСТ Р 54547–2011. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
14. Реологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций / И. А. Новаков [и др.]. М.: Академкнига, 2006. 322 с.
15. Scagliusi S. R., Cardoso E. C. L., Lugão A. B. Effect of gamma-radiation on thermal ageing of butyl rubber compounds // 4th Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro, July 22nd–25th, 2018. DOI: 10.21452/bccm4.2018.04.03.
16. Scagliusi S. R., Cardoso E. C. L., Lugão A. B. Radiation Effects on Crosslinking of Butyl Rubber Compounds // Acta Scientific Microbiology. 2019. Vol. 2, no. 9. P. 160–164.
17. Оптимизация свойств радиационного регенерата, применяемого в эластомерных кровельных материалах / Ю. Ф. Шутилин [и др.] // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 4. С. 185–190.
18. Santhosh A. A., Kuruvila J., Sabu T. Recent developments in cross-linking of elastomers // Rubber Chemistry and Technology. 2005. Vol. 78, issue 3. P. 458–488.
19. Хакимуллин Ю. Н. Структура, свойства и применение радиационных регенератов в резинах на основе бутилкаучука: монография. Казань: Казан. гос. ун-т, 2011. 187 с.
20. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.

References

1. Shahovets S. E., Smirnov B. L. Intensive rubber recycling technology. *Kauchuk i rezina* [Kauchuk and rubber], 2006, no. 1, pp. 34–38 (In Russian).

2. Miryasova F. K. *Primeneniya radiatsionno-khimicheskikh i ioniziruyushchikh moduley dlya pererabotki polimerov v izdeliya s vysokimi fiziko-khimicheskimi svoystvami* [Application of radiation-chemical and ionizing modules for the processing of polymers into products with high physical and chemical properties]. Kazan, KGU Publ., 2005. 67 p. (In Russian).
3. Vagizova R. R. Some features of the vulcanization of radiation regenerated butyl rubber. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2006, no. 2, pp. 144–147 (In Russian).
4. Feng W., Isayev A. I. Recycling of tire-curing bladder by ultrasonic devulcanization. *Polym. Eng. Sci.*, 2005, vol. 46, pp. 8–18.
5. Myhre M. J., MacKillop D. A. Rubber Recycling. *Rubber Chemistry and Technology*, 2002, vol. 75, no. 3, pp. 429–474.
6. Zaharescu T., Cazac C., Jipa S. Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber. *Nucl. Meth. in Phys. Res. B*, 2001, vol. 15, pp. 360–364.
7. Abdel-Bary E. M., Dessouki A. M., El-Nesr E. M., Hassan M. M. Radiation-Induced Graft Copolymerization of Some Vinyl Monomers onto Waste Rubber Powder. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2004, vol. 36, pp. 241–256.
8. Karaagac B., Sen M., Deniz V., Guven O. Recycling of gamma irradiated inner tubes in butyl based rubber compounds. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research: Sect. B*, 2006, vol. 65, no. 1, pp. 290–293.
9. Manuel H. J. Verwendung von regeneriertem Butylkautschuk in Mischungen für die Innenschicht von Reifen. *Kautschuk. Gummi. Kunststoffe*, 2000, vol. 53, no. 12, pp. 730–734.
10. Şen M., Uzun C., Kantoğlu Ö. Effect of gamma irradiation conditions on the radiation-induced degradation of isobutylene-isopren rubber. *Nucl. Meth. in Phys. Res. B*, 2003, no. 1, pp. 480–484.
11. Usachev S. V., Solov'eva O. Ju., Voronov V. M., Galybin G. M., Sergeeva N. L. Features of the recycling of amortized cooking chambers and diaphragms. *Kauchuk i rezina* [Kauchuk and rubber], 2005, no. 1, pp. 24–31 (In Russian).
12. GOST R 54552–2011. Rubbers and Rubber Compounds. Determination of the viscosity, the stress relaxation, and the precure characteristics of a rubber with the use of a Mooney viscosimeter. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).
13. GOST R 54547–2011. Rubber mixtures. Determination of vulcanization characteristics using rotorless rheometers. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. (In Russian).
14. Novakov I. A., Volfson S. I., Novopol'tseva O. M., Krakshin M. A. *Reologicheskiye i vulkanizatsionnyye svoystva elastomernykh kompozitsiy* [Rheological and vulcanization properties of elastomeric compositions]. Moscow, Akademkniga Publ., 2006. 322 p. (In Russian).
15. Scagliusi S. R., Cardoso E. C. L., Lugão A. B. Effect of gamma-radiation on thermal ageing of butyl rubber compounds. *4th Brazilian Conference on Composite Materials*. Rio de Janeiro, July 22nd–25th, 2018. DOI:10.21452/bccm4.2018.04.03.
16. Scagliusi S. R., Cardoso E. C. L., Lugão A. B. Radiation Effects on Crosslinking of Butyl Rubber Compounds. *Acta Scientific Microbiology*, 2019, vol. 2, no. 9, pp. 160–164.
17. Shutilin Ju. F., Tikhomirov S. G., Semenova Je. E., Karmanov A. V., Vlasova L. A. Optimization of the properties of radiation reclaimed material used in elastomeric roofing materials. *Vestnik VGUIT* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2017, vol. 79, no. 4, pp. 185–190 (In Russian).
18. Santhosh A. A., Kuruvila J., Sabu T. Recent developments in cross-linking of elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 2005, vol. 78, issue 3, pp. 458–488.
19. Khakimullin Yu. N. *Struktura, svoystva i primeneniye radiatsionnykh regeneratov v rezinakh na osnove butilkauchuka: monografiya* [Structure, properties and application of radiation regenerators of rubbers based on butyl rubber]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 187 p. (In Russian).
20. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of materials based on elastomers]. Omsk, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p. (In Russian).

Информация об авторе

Шашок Жанна Станиславовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Information about the author

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Поступила 29.11.2021