

УДК 678.046

**Ж. С. Шашок<sup>1</sup>, Н. Р. Прокопчук<sup>1</sup>, Е. П. Усс<sup>1</sup>, А. В. Лешкевич<sup>1</sup>, О. А. Кротова<sup>1</sup>,  
С. Н. Каюшников<sup>2</sup>, С. А. Перфильева<sup>2</sup>, О. В. Карманова<sup>3</sup>, С. Г. Тихомиров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>ОАО «Белшина»

<sup>3</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий

### **ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК БУТИЛОВОГО РЕГЕНЕРАТА НА СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Определена эффективность применения добавок бутилового регенерата в составе эластомерных композиций на основе комбинации хлорбутилкаучука и натурального каучука. Установлено влияние типа и дозировки бутилового регенерата на пластозластические и вулканизационные свойства резиновых смесей, упруго-прочностные показатели резин и стойкость вулканизатов к термическому старению в среде воздуха. В композиции вводились два типа бутилового регенерата, полученные радиационным методом при дозах облучения 30 и 50 кГр, а также дополнительно подвергшиеся специальной обработке в лабораторном штифтовом экструдере холодного питания. Дозировка регенерата составляла 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука. Показана перспективность использования вторичного продукта в составе эластомерных композиций, что позволит снизить себестоимость выпускаемой продукции при сохранении основных качественных характеристик. Определено, что при введении в эластомерную композицию регенерата в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. вязкость по Муни резиновых смесей изменяется на 2,4%, а время достижения оптимальной степени вулканизации на 1,4% по сравнению с композицией без добавки. При этом использование бутилового регенерата в указанных дозировках не оказывает существенного влияния на упруго-прочностные свойства резин и их стойкость к термическому старению по сравнению с резиной без регенерата.

**Ключевые слова:** бутиловый регенерат, эластомерная композиция, прочность, относительное удлинение, теплостойкость, структура вулканизата.

**Для цитирования:** Шашок Ж. С., Прокопчук Н. Р., Усс Е. П., Лешкевич А. В., Кротова О. А., Каюшников С. Н., Перфильева С. А., Карманова О. В., Тихомиров С. Г. Влияние добавок бутилового регенерата на свойства эластомерных композиций // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 25–32.

**Zh. S. Shashok<sup>1</sup>, N. R. Prokopchuk<sup>1</sup>, E. P. Uss<sup>1</sup>, A. V. Leshkevich<sup>1</sup>, O. A. Krotova<sup>1</sup>,  
S. N. Kayushnikov<sup>2</sup>, S. A. Perfilieva<sup>2</sup>, O. V. Karmanova<sup>3</sup>, S. G. Tikhomirov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University

<sup>2</sup>JSC “Belshina”

<sup>3</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies

### **INFLUENCE OF BUTYL REGENERATE ADDITIVES ON PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS**

The efficiency of application of additives of butyl regenerate in elastomeric compositions based on a combination of chlorobutyl and natural rubber has been investigated. The effect of the type and dosage of butyl regenerate on the plastoelastic and vulcanization properties of rubber compounds, elastic-strength indicators of rubbers and their resistance to thermal aging in air has been established. Two types of butyl regenerate were introduced into compositions, obtained by the radiation method at irradiation doses of 30 kGy (BR (30)) and 50 kGy (BR (50)), as well as additionally subjected to special processing in a laboratory pin type cold feed extruder. The dosage of the regenerate was 5.0; 10.0; 15.0 and 20.0 phr. The prospect of using a secondary product in elastomeric compositions was shown, which will reduce the cost of manufactured products while maintaining the main quality characteristics. It was determined that the introduction of the regenerate into elastomeric composition in dosages of 5.0 and 10.0 phr, the Mooney viscosity of rubber compounds changes by 2.4%, and the time to reach the optimal degree of vulcanization by 1.4% compared to the composition without additive. At the same time, the use of butyl regenerate in the indicated dosages does not significantly affect the elastic-strength properties of rubbers and their resistance to thermal aging in comparison with rubber without regenerate.

**Key words:** butyl regenerate, elastomeric composition, strength, elongation, heat resistance, vulcanizate structure.

**For citation:** Shashok Zh. S., Prokopchuk N. R., Uss E. P., Leshkevich A. V., Krotova O. A., Kayushnikov S. N., Perfilieva S. A., Karmanova O. V., Tikhomirov S. G. Influence of butyl regenerate additives on properties of elastomeric compositions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 25–32 (In Russian).

**Введение.** Регенерат – пластичный материал, получаемый путем переработки изношенных резиновых изделий и отходов резинового производства, способный к вулканизации благодаря наличию в молекулах двойных связей. Он представляет собой смесь гель- и золь-фракций, где гель-фракция состоит из фрагментов вулканизационной сетки, а золь-фракция из фрагментов каучуковых цепей линейного и разветвленного строения [1].

Основным процессом получения регенерата является девулканизация, заключающаяся в деструкции вулканизационной сетки и макромолекул каучука при воздействии внешних факторов. При этом важным является достижение максимально возможной степени деструкции поперечных связей и минимально возможной деструкции основной цепи. Воздействие может осуществляться под действием кислорода воздуха, высоких температур, механической обработки и под воздействием специальных химических пластификаторов, а также посредством ионизирующего излучения. Возможность реакции как по серным или иным поперечным связям, так и по двойным связям главной цепи свидетельствует о сложности физико-химических процессов, лежащих в основе регенерации резины [2, 3].

Бутилкаучук (БК) получают сополимеризацией изобутилена и изопрена, причем содержание изопрена не превышает 3,0% мол. В связи с этим резины на основе БК обладают уникальными свойствами, такими как низкая газопроницаемость, хорошая термическая стабильность, высокая устойчивость к кислороду, озону и действию солнечной радиации. В результате наблюдается большое потребление данного полимера во всем мире, что обуславливает развитие технологии рециклинга. Вторичная переработка резин на основе бутилкаучука может быть проблематичной из-за наличия различных видов резин, полученных с использованием разнообразных вулканизирующих систем [4].

Источником получения бутилового регенерата являются отработанные диафрагменные камеры шинных заводов, представляющие собой смоляные вулканизаты бутилкаучука [5].

Известно [6], что бутилкаучук и его вулканизаты, имеющие в строении основной цепи четвертичный атом углерода, подвергаются в процессе радиационного излучения деструкции с разрывом макромолекул по закону случая. Это позволяет получать регенерат бутилкаучу-

ка методом радиационной деструкции. Пласто-эластические свойства регенерата определяются поглощенной дозой радиации. Вследствие отсутствия дополнительных агентов регенерации и мягчителей данный регенерат идентичен по составу исходной резине, что обуславливает его более высокое качество по сравнению с продуктами термомеханической переработки отходов бутилкаучука.

**Основная часть.** Целью работы являлось исследование влияния добавок бутилового регенерата на свойства эластомерных композиций на основе комбинации хлорбутилкаучука и натурального каучука (ХБК + НК) в соотношении 80:20.

Объектами исследования являлись наполненные эластомерные композиции, применяемые для производства герметизирующего слоя шин. В композиции вводились два типа бутилового регенерата, полученные путем радиационного воздействия дозами облучения 30 кГр (БР (30)) и 50 кГр (БР (50)), а также дополнительно подвергшиеся специальной обработке в лабораторном штифтовом экструдере холодного питания марки ЕЕК 45.14 М-12/70. Дозировка регенерата составляла 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука.

Определение вязкости по Муни осуществляли методом ротационной вискозиметрии в соответствии с ГОСТ Р 54552–2011 [7], кинетических параметров вулканизации – по ГОСТ Р 54547–2011 [8]. Упруго-прочностные характеристики образцов определяли на разрывной машине «Тензомер Т 220 DC» согласно ГОСТ 270–75 [9]. Стойкость образцов к термическому старению в среде воздуха оценивали по изменению относительного удлинения при разрыве и условной прочности при растяжении после выдержки их в термостате при температуре 100°C в течение 72 ч, испытание проводили в соответствии с ГОСТ 9.024–74 [10]. Относительная погрешность измерений вышеуказанных методик не превышала 4,5% с вероятностью 0,95.

Вязкость перерабатываемого материала определяет динамику процесса переработки, т. е. служит мерой усилия, которое необходимо приложить к материалу для осуществления течения его с заданной скоростью на различных стадиях процесса [1]. Результаты исследований вязкости по Муни резиновых смесей на основе комбинации ХБК + НК с добавками регенерата представлены в табл. 1.

Таблица 1  
**Вязкость по Муни резиновых смесей  
на основе ХБК + НК с добавками регенерата**

Дозировка регенерата	Начальная вязкость резиновой смеси, усл. ед. Муни	Вязкость резиновой смеси, усл. ед. Муни
Без регенерата	104,0	53,9
5,0 мас. ч. БР (30)	88,5	55,2
5,0 мас. ч. БР (50)	87,9	55,0
10,0 мас. ч. БР (30)	83,9	57,7
10,0 мас. ч. БР (50)	80,7	57,8
15,0 мас. ч. БР (30)	84,0	60,4
15,0 мас. ч. БР (50)	84,2	60,2
20,0 мас. ч. БР (30)	84,2	61,1
20,0 мас. ч. БР (50)	85,2	61,5

Из представленных данных видно, что при введении в резиновую смесь на основе ХБК + НК добавок бутилового регенерата начальная вязкость по Муни уменьшается, но при этом с увеличением дозировки вторичного компонента вязкость по Муни резиновых смесей увеличивается. При этом выявлено, что при введении минимальной дозировки (5,0 мас. ч.) регенератов БР (50) и БР (30) вязкость смесей изменяется менее чем на 2,0 усл. ед. Муни. С увеличением содержания бутилового регенерата вязкость по Муни увеличивается на 7,0% (при введении 10,0 мас. ч.) и на 14,1% (при введении 20,0 мас. ч.).

Следует отметить, что использование в составе смесей бутилового регенерата, полученного при воздействии различных доз облучения, не приводит к существенным отличиям показателей вязкости по Муни резиновых смесей. Так, при введении регенерата БР (30) в дозировке 20,0 мас. ч. вязкость по Муни смеси составляет 61,1 усл. ед. Муни, а при использовании БР (50) в указанной дозировке – 61,5 усл. ед. Муни.

Изменение вязкости по Муни резиновых смесей на основе ХБК + НК при введении бутилового регенерата может быть связано с затруднением течения материала в направлении деформации сдвига из-за наличия в эластомерной матрице компонента, характеризующегося большим значением вязкости по Муни по сравнению с используемым каучуком.

Вулканизация – это комплекс физико-химических процессов, которые протекают в резиновой смеси, основным из которых является сшивание макромолекул каучука химическими связями различной энергии и природы в пространственную вулканизационную сетку [11]. На процесс вулканизации оказывают влияние все ингредиенты резиновой смеси. Исследуемые компоненты, полученные из сшитых

вулканизатов, могут оказывать влияние на процесс образования химических и физических связей на различных стадиях процесса. В табл. 2 приведены результаты исследований кинетики вулканизации резиновых смесей на основе ХБК + НК с добавками регенерата.

Таблица 2  
**Кинетические параметры вулканизации  
резиновых смесей на основе ХБК + НК  
с добавками регенерата**

Дозировка регенерата	$M_L$	$M_H$	$t_{s2}$	$t_{90}$	$\Delta S$
Без регенерата	5,1	21,7	5,5	27,9	16,6
5,0 мас. ч. БР (30)	5,1	21,1	5,5	27,9	16,0
5,0 мас. ч. БР (50)	5,1	21,2	5,6	27,8	16,1
10,0 мас. ч. БР (30)	5,5	20,8	5,7	27,5	15,3
10,0 мас. ч. БР (50)	5,4	20,5	5,7	27,6	15,1
15,0 мас. ч. БР (30)	5,6	20,2	5,7	27,5	14,6
15,0 мас. ч. БР (50)	5,5	19,9	5,8	27,4	14,4
20,0 мас. ч. БР (30)	5,8	19,8	5,9	27,6	14,0
20,0 мас. ч. БР (50)	5,6	19,5	5,8	27,5	13,9

*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;  $\Delta S$  – разница между максимальным и минимальным крутящим моментом, дН·м.

Время, необходимое для увеличения минимального крутящего момента на 2 единицы ( $t_{s2}$ ), косвенно свидетельствует о стойкости резины к подвулканизации [11]. По результатам исследования выявлено, что с введением регенерата значение  $t_{s2}$  незначительно повышается, для смеси без регенерата значение показателя равно 5,5 мин, а для смеси с дозировкой регенерата 20,0 мас. ч. показатель  $t_{s2}$  равен 5,9 мин (с регенератом БР (30)) и 5,8 мин (с регенератом БР (50)). Наименьшее изменение стойкости резиновых смесей к подвулканизации выявлено при введении 5,0 мас. ч. бутилового регенерата, полученного с различной дозой облучения.

Анализ кинетических параметров процесса вулканизации показал, что введение в резиновую смесь на основе ХБК + НК бутилового регенерата приводит к незначительному уменьшению времени достижения оптимальной степени вулканизации резины. Так, в случае введения регенерата БР (30) в количестве 10,0 и 20,0 мас. ч. значения  $t_{90}$  составляют 27,5 и 27,6 мин, а для образца без регенерата показатель  $t_{90}$  равен 27,9 мин (изменение времени достижения оптимальной степени вулканизации составляет 1,4%).

По разности максимального и минимального крутящих моментов ( $\Delta S$ ) можно косвенно

судить о плотности сшивания вулканизатов. Установлено, что данный показатель в наибольшей степени уменьшается (на 16,4%) при использовании регенерата БР (50) в дозировке 20,0 мас. ч. по сравнению с образцом без регенерата (16,6 дН·м). При этом введение регенератов БР (30) и БР (50) в количестве 5,0 мас. ч. оказывает минимальное влияние на данный показатель (уменьшение составляет 3,6%).

Таким образом, результаты исследования кинетических параметров вулканизации резиновых смесей показали, что характер изменения процесса формирования пространственной структуры резин практически не имеет существенных отличий при использовании бутилового регенерата, полученного при дозах облучения 30 и 50 кГр. При введении 5,0 мас. ч. бутилового регенерата основные параметры процесса структурирования изменяются незначительно (изменение составляет менее 2,0 %). Однако с увеличением содержания вторичного продукта в составе эластомерных композиций установлено уменьшение степени сшивания резин, что может оказывать отрицательное влияние на упруго-прочностные свойства вулканизатов и их стойкость к тепловому старению. В данном случае наличие в эластомерной матрице добавок бутилового регенерата, выполняющих функцию разбавителей, несколько затруднит процесс образования поперечных связей между макромолекулами каучука.

Поведение шитых эластомеров при деформировании характеризуется преобладанием упругой и высокоэластической деформации над пластической. Для сравнительной оценки упруго-прочностных показателей при введении в состав резиновых смесей новых ингредиентов определяют такие основные характеристики, как условное напряжение при заданном удлинении, условную прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве и относительное остаточное удлинение после разрыва [11]. В табл. 3 приведены результаты определения основных упруго-прочностных свойств резин с исследуемыми добавками бутилового регенерата.

Установлено, что введение бутилового регенерата в эластомерные композиции независимо от его дозировки не оказывает существенного влияния на показатель условного напряжения при удлинении 300%. Значение условного напряжения для резины без регенерата составляет 4,7 МПа, а для резин с регенератом находится в пределах 4,6–5,1 МПа. В то же время показатель условной прочности при растяжении с увеличением содержания регенерата в резине с 10,0 до 20,0 мас. ч. уменьшается на 4,0–9,0%. При этом введение 5,0 мас. ч. ре-

генерата практически не оказывает влияния на прочность резин по сравнению с резиной без его добавки (показатель условной прочности при растяжении равен 10,0 МПа).

Таблица 3

**Упруго-прочностные свойства резин на основе ХБК + НК с добавками регенерата**

Дозировка регенерата	$f_e$ , МПа	$f_p$ , МПа	$\epsilon_{\text{разр}}$ , %
Без регенерата	4,7	10,0	640
5,0 мас. ч. БР (30)	4,8	10,1	640
5,0 мас. ч. БР (50)	4,7	10,0	635
10,0 мас. ч. БР (30)	5,1	9,9	620
10,0 мас. ч. БР (50)	4,7	9,6	620
15,0 мас. ч. БР (30)	4,7	9,5	610
15,0 мас. ч. БР (50)	4,7	9,3	580
20,0 мас. ч. БР (30)	4,8	9,3	590
20,0 мас. ч. БР (50)	4,6	9,1	570

*Примечание.*  $f_e$  – условное напряжение при 300%-ном удлинении (модуль 300%), МПа;  $f_p$  – условная прочность при растяжении, МПа;  $\epsilon_{\text{разр}}$  – относительное удлинение при разрыве, %.

Использование бутилового регенерата в составе резиновых смесей на основе ХБК + НК приводит к снижению эластических свойств резин, за исключением дозировки 5,0 мас. ч. Так, для резин с 10,0 мас. ч. регенерата показатель относительного удлинения при разрыве составляет 620%, а для резины без регенерата – 640%. В то же время для резин с 20,0 мас. ч. БР (30) показатель относительного удлинения при разрыве составляет 590%, а для БР (50) – 570%.

Таким образом выявлено, что использование бутилового регенерата в композициях на основе ХБК + НК в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. не оказывает существенного влияния на упруго-прочностные свойства резин по сравнению с резиной без регенерата. Вулканизаты характеризуются практически равноценными показателями условного напряжения при удлинении 300% и условной прочностью при растяжении, уменьшение показателя относительного удлинения при разрыве составляет не более 4,7%.

Определяющим фактором, оказывающим влияние на прочностные свойства резин, является структура пространственной сетки вулканизатов, формируемая в процессе вулканизации [12, 13]. В связи с этим проведены исследования по определению показателей структуры резин, содержащих бутиловый регенерат (табл. 4).

Установлено, что введение в эластомерные композиции на основе комбинации каучуков ХБК + НК бутилового регенерата приводит к уменьшению плотности поперечного сшивания

резин. Так, для резины без регенерата показатель плотности поперечного сшивания составляет  $3,49 \cdot 10^{-4}$  моль/см<sup>3</sup>, а для резин с 5,0 мас. ч. регенерата типа БР (50) –  $3,45 \cdot 10^{-4}$  моль/см<sup>3</sup> и БР (30) –  $3,42 \cdot 10^{-4}$  моль/см<sup>3</sup>. Следует отметить, что с увеличением содержания в композициях вторичного продукта переработки до 20,0 мас. ч. плотность поперечного сшивания резин уменьшается в 1,10 раза.

Таблица 4

**Показатели пространственной сетки резин на основе ХБК + НК с добавками регенерата**

Дозировка регенерата	$M_c$ , кг/моль	$n \cdot 10^{-19}$ , см <sup>3</sup>	$\nu \cdot 10^4$ , моль/см <sup>3</sup>
Без регенерата	3421,8	1,58	3,49
5,0 мас. ч. БР (30)	3501,9	1,54	3,45
5,0 мас. ч. БР (50)	3521,1	1,52	3,42
10,0 мас. ч. БР (30)	3882,7	1,39	3,37
10,0 мас. ч. БР (50)	3987,4	1,37	3,31
15,0 мас. ч. БР (30)	4011,5	1,35	3,34
15,0 мас. ч. БР (50)	4029,7	1,36	3,30
20,0 мас. ч. БР (30)	4119,6	1,34	3,18
20,0 мас. ч. БР (50)	4200,6	1,33	3,16

*Примечание.*  $M_c$  – средняя молекулярная масса отрезка молекулярной цепи, заключенного между двумя поперечными связями, кг/моль;  $n$  – количество поперечных связей в 1 см<sup>3</sup> вулканизата, см<sup>3</sup>;  $\nu$  – плотность поперечного сшивания, моль/см<sup>3</sup>.

При действии на эластомеры повышенной температуры происходит сшивание и деструкция макромолекул, деполимеризация, изменение степени насыщенности, выделение летучих продуктов, а на воздухе – также окисление, образование карбонильных и других кислородсодержащих групп. Характер и скорость этих процессов зависят от типа каучука, состава резиновой смеси, температуры. Воздействие температуры и кислорода воздуха приводит к распаду полисульфидных связей, при этом данный процесс происходит несоизмеримо быстрее окислительного распада макромолекул каучука. Термический распад полисульфидных связей сопровождается снижением степени их сульфидности и выделением серы, которая может в дальнейшем участвовать в образовании новых связей [1]. Введение бутилового регенерата оказывает непосредственное влияние на процессы изменения сульфидности связи и плотности пространственной сетки резин как на стадии вулканизации, так и при термическом старении.

Основная причина изменения свойств каучуков и резин под действием температуры – окисление и образование радикалов. Этот про-

цесс может быть охарактеризован по степени изменения физико-механических показателей [14, 15]. В табл. 5 приведены результаты исследования упруго-прочностных свойств резин после теплового старения.

Таблица 5

**Упруго-прочностные свойства резин на основе ХБК + НК с добавками регенерата после теплового старения**

Дозировка регенерата	$f_e$ , МПа	$f_p$ , МПа	$\epsilon_{\text{разр}}$ , %
Без регенерата	4,7	10,0	640
5,0 мас. ч. БР (30)	4,8	10,1	640
5,0 мас. ч. БР (50)	4,7	10,0	635
10,0 мас. ч. БР (30)	5,1	9,9	620
10,0 мас. ч. БР (50)	4,7	9,6	620
15,0 мас. ч. БР (30)	4,7	9,5	610
15,0 мас. ч. БР (50)	4,7	9,3	580
20,0 мас. ч. БР (30)	4,8	9,3	590
20,0 мас. ч. БР (50)	4,6	9,1	570

*Примечание.*  $f_e$  – условное напряжение при 300%-ном удлинении, МПа;  $f_p$  – условная прочность при растяжении, МПа;  $\epsilon_{\text{разр}}$  – относительное удлинение при разрыве, %.

В результате проведенных исследований выявлено, что при воздействии повышенной температуры для резин на основе ХБК + НК значение показателя условного напряжения при удлинении повышается в среднем на 17,0%.

Упруго-прочностные свойства вулканизатов с 5,0 и 10,0 мас. ч. регенерата практически не изменяются при воздействии температурно-силовых полей по сравнению с резиной без добавки (значение показателя условной прочности при растяжении для резины без регенерата составляет 10,0 МПа, а для резин с указанными дозировками – 9,6–10,1 МПа; показатель относительного удлинения при разрыве для резины без регенерата равен 640%, а для резин с добавками регенерата – 640–620%). При дальнейшем увеличении содержания регенерата в композиции определено ухудшение прочностных и эластических свойств.

На основании полученных данных выявлены изменения основных упруго-прочностных показателей резин при тепловом старении (табл. 6). Определено, что введение регенерата в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. позволяет получать резины, не уступающие по стойкости к тепловому старению резине без регенерата (исключение составляет вулканизат, содержащий регенерат типа БР (50) в дозировке 10,0 мас. ч.). Так, значение изменения условной прочности при растяжении для резины без регенерата составляет +2,0%, в то время как для резин,

содержащих регенерат в дозировке 5,0 мас. ч. условная прочность при растяжении после воздействия повышенной температуры не изменилась, а при дозировке 10,0 мас. ч. значение  $S_{\sigma}$  находится в пределах 1,0–2,1%.

Таблица 6

**Изменение относительного удлинения при разрыве и условной прочности при растяжении исследуемых резин на основе ХБК + НК с добавками регенерата после теплового старения**

Дозировка регенерата	Изменение относительного удлинения при разрыве $S_{\epsilon}$ , %	Изменение условной прочности при растяжении $S_{\sigma}$ , %
Без регенерата	-9,4	+2,0
5,0 мас. ч. БР (30)	-10,9	-
5,0 мас. ч. БР (50)	-10,2	-
10,0 мас. ч. БР (30)	-10,9	+1,0
10,0 мас. ч. БР (50)	-10,5	+2,1
15,0 мас. ч. БР (30)	-11,5	+4,2
15,0 мас. ч. БР (50)	-10,3	+3,2
20,0 мас. ч. БР (30)	-13,6	+4,3
20,0 мас. ч. БР (50)	-8,8	-

В то же время анализ показателей изменения относительного удлинения при разрыве резин показал, что наименьшее ухудшение эластических свойств при использовании бутилового регенерата в составе эластомерных композиций на основе комбинации ХБК + НК выявлено при введении бутилового регенерата, полученного при дозе облучения 50 кГр. Показатель изменения относительного удлинения при разрыве для резины без добавки регенерата составляет -9,4%, а для композиций с указанным типом бутилового регенерата значение  $S_{\epsilon}$  находится в пределах от -10,2% для композиций с БР (50) в дозировке 5,0 мас. ч. до -8,8% в дозировке 20,0 мас. ч.

Таким образом, результаты исследований упруго-прочностных свойств резин и их стой-

кости к тепловому старению показали, что при введении в состав эластомерных композиций на основе комбинации каучуков ХБК + НК в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. бутилового регенерата, полученного при дозах облучения 30 и 50 кГр, не происходит существенных ухудшений прочностных и эластических показателей вулканизатов, а также их стойкости к воздействию повышенной температуры.

**Заключение.** Доказана возможность использования бутилового регенерата в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. в составе эластомерных композиций на основе комбинации ХБК + НК. Показано, что при введении регенерата в эластомерную композицию вязкость по Муни резиновых смесей увеличивается на 2,4%, а время достижения оптимальной степени вулканизации – на 1,4% по сравнению с композицией без добавки. Выявлено, что использование бутилового регенерата в указанных дозировках не оказывает существенного влияния на упруго-прочностные свойства резин по сравнению с резиной без регенерата: вулканизаты характеризуются практически равноценными показателями условного напряжения при удлинении 300% и условной прочности при растяжении, уменьшение показателя относительного удлинения при разрыве составляет не более 4,7%. Определено, что при введении в состав эластомерных композиций на основе ХБК + НК и БР в дозировках 5,0 и 10,0 мас. ч. бутилового регенерата не происходит ухудшения стойкости резин к тепловому старению. Использование вторичного продукта в составе эластомерных композиций позволяет снизить себестоимость выпускаемой продукции при сохранении основных качественных характеристик.

Данная работа проведена в рамках выполнения задания ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», а также технического сотрудничества с федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

### Список литературы

1. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: Истек, 2009. 504 с.
2. Тимофеева С. С. Защита литосферы и обращение с опасными отходами. Иркутск: ИрГТУ, 2012. 159 с.
3. Kenawy S. H., Khalil A. M. Reclaiming Waste Rubber for a Green Environment // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. Vol. 11, issue 1. P. 8413–8423.
4. Sandra R. Scagliusi, Elisabeth C. L. Cardoso, Ademar B. Lugao. Radiation-induced degradation of butyl rubber vulcanized by three different crosslinking systems // Radiation Physics and Chemistry. 2012. Vol. 88. P. 991–994.
5. Хакимуллин Ю. Н. Структура, свойства и применение радиационных регенератов резин на основе бутилкаучука: монография. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2011. 187 с.

6. Zaharescu T., Cazac C., Jipa S. Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber // *Nucl. Meth. in Phys. Res.* 2001. No. 185. P. 360–364.
7. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартиформ, 2013. 22 с.
8. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров: ГОСТ Р 54547–2011. Введ. 29.11.2011. М.: Стандартиформ, 2015. 16 с.
9. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении: ГОСТ 270–75. Взамен ГОСТ 270–64. Введ. 01.01.76. М.: Изд-во стандартов, 1975. 29 с.
10. Резины. Методы испытаний на стойкость к термическому старению: ГОСТ 9.024–74. Взамен ГОСТ 271–67. Введ. 01.07.75. М.: Изд-во стандартов, 1974. 12 с.
11. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. М.: САНТ-ТМ, 2001. 400 с.
12. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.
13. Mark J. E., Burak E., Eirich F. R. *Science and Technology of Rubber*. San Diego, Academic Press, 2005. 768 p.
14. Шутилин Ю. Ф. *Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров*. Воронеж: Воронеж. гос. тех. акад., 2003. 871 с.
15. *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance* / edited by John S. Dick. Munich: Hanser Publishers, 2001. 567 p.

#### References

1. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov* [Technology of elastomeric materials]. Moscow, Istek Publ., 2009. 504 p.
2. Timofeyeva S. S. *Zashchita litosfery i obrashcheniye s opasnymi otkhodami* [Lithosphere protection and hazardous waste management]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2012. 159 p.
3. Kenawy S. H., Khalil A. M. Reclaiming Waste Rubber for a Green Environment. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, vol. 11, issue 1, pp. 8413–8423.
4. Sandra R. Scagliusi, Elisabeth C. L. Cardoso, Ademar B. Lugao. Radiation-induced degradation of butyl rubber vulcanized by three different crosslinking systems. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, vol. 88, pp. 991–994.
5. Khakimullin Yu. N. *Struktura, svoystva i primeneniye radiatsionnykh regeneratov rezin na osnove butilkauchuka: monografiya* [Structure, properties and application of radiation regenerators of rubbers based on butyl rubber]. Kazan, Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2011. 187 p.
6. Zaharescu T., Cazac C., Jipa S. Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber. *Nucl. Meth. in Phys. Res.* 2001, no. 185, pp. 360–364.
7. GOST 54552–2011. Rubbers and Rubber Compounds. Determination of the viscosity, the stress relaxation, and the preure characteristics of a rubber with the use of a Mooney viscosimeter. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).
8. GOST 54547–2011. Rubber mixtures. Determination of vulcanization characteristics using rotorless rheometers. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. (In Russian).
9. GOST 270–75. Rubber. Method for determining elastic tensile properties. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1975. 29 p. (In Russian).
10. GOST 9.024–74. Rubber. Test methods for resistance to thermal aging. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1974. 12 p. (In Russian).
11. Ovcharov V. I., Burmistr M. V., Tyutin V. A. *Svoystva rezinovykh smesey i rezin: otsenka, regulirovaniye, stabilizatsiya* [Properties of rubber compounds and rubber: assessment, management, stabilization]. Moscow, SАНТ-ТМ Publ., 2001. 400 p.
12. 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.
13. Mark J. E., Burak E., Eirich F. R. *Science and Technology of Rubber*. San Diego, Academic Press, 2005. 768 p.
14. Shutilin Yu. F. *Spravochnoye posobiye po svoystvam i primeneniyu elastomerov* [Handbook on the properties and use of elastomers]. Voronezh, Voronezhskaya gosudarstvennaya tekhnicheskaya akademiya Publ., 2003. 871 p.
15. *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance*. Edited by John S. Dick. Munich, Hanser Publishers, 2001. 567 p.

### Информация об авторах

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

**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

**Усс Елена Петровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: uss@belstu.by

**Лешкевич Анастасия Владимировна** – ассистент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nastyonke@mail.ru

**Кротова Ольга Александровна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: o.krotova@belstu.by

**Каюшников Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, начальник инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: vdv90@mail.ru

**Перфильева Светлана Александровна** – заместитель начальника лаборатории. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: svetaperfileva12@gmail.com

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

**Тихомиров Сергей Германович** – доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем. Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19, Российская Федерация). E-mail: tikhomirov\_57@mail.ru

### Information about the authors

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

**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

**Uss Elena Petrovna** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uss@belstu.by

**Leshkevich Anastasiya Vladimirovna** – Assistant Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastyonke@mail.ru

**Krotova Olga Aleksandrovna** – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.krotova@belstu.by

**Kayushnikov Sergey Nikolaevich** – PhD (Engineering), Head of Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoe shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: vdv90@mail.ru

**Perfileva Svetlana Aleksandrovna** – Deputy Head of the Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: svetaperfileva12@gmail.com

**Karmanova Olga Viktorovna** – DSc (Engineering), Head of the Department of Organic Compounds Technology, Polymer Processing and Technological Safety. Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: karolga@mail.ru

**Tikhomirov Sergey Germanovich** – DSc (Engineering), Professor, the Department of Organic Compounds Technology, Polymer Processing and Technological Safety. Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolutsii Ave., 394036, Voronezh, Russian Federation). E-mail: tikhomirov\_57@mail.ru

*Поступила 12.04.2021*

