

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, БИОТЕХНОЛОГИИ

CHEMICAL ENGINEERING, BIOTECHNOLOGY

УДК 678.046

Е. В. Грабко¹, С. Н. Каюшников¹, Ж. С. Шашок², Е. П. Усс²

¹ОАО «Белшина»

²Белорусский государственный технологический университет

ВУЛКАНИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИРОВАННЫХ КАУЧУКОВ

Исследованы вулканизационные свойства резиновых смесей на основе галогенированных бутадиеновых каучуков. В качестве объектов изучения выступали эластомерные композиции на основе хлорбутадиенового каучука марки ХБК-139 и бромбутадиенового каучука марки ББК-232. Композиции различались содержанием антикорчинга, в качестве которого использовался оксид магния, вводимый в резиновые смеси в дозировках 0,15; 0,30 и 0,50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Исследование кинетических параметров вулканизации проводилось при трех температурах: 143, 153 и 163°C. Определено, что реологические свойства резиновых смесей на основе галогенированных каучуков имеют незначительные различия. Установлено, что при температурах вулканизации 143 и 153°C смеси на основе ХБК-139 по сравнению со смесями на основе ББК-232 имеют более высокие значения показателя максимального крутящего момента, меньшие значения оптимального времени вулканизации и большие показатели разности максимального и минимального крутящих моментов, т. е. при указанных температурах процесс формирования пространственной сетки протекает быстрее в композициях на основе ХБК-139. Выявлено, что с повышением дозировки антикорчинга для композиций на основе ХБК-139 оптимальное время вулканизации увеличивается на 12,7–51,2%, а для композиций на основе ББК-232 увеличение составило 22,4–35,9%. Отмечено замедление процесса вулканизации при более высокой температуре для резиновых смесей на основе ХБК-139, в то время как для композиций на основе ББК-232 определено увеличение индекса скорости вулканизации.

Ключевые слова: хлорбутадиеновый каучук, бромбутадиеновый каучук, антикорчинг, резиновая смесь, вулканизация, индекс скорости вулканизации.

Для цитирования: Грабко Е. В., Каюшников С. Н., Шашок Ж. С., Усс Е. П. Вулканизационные свойства эластомерных композиций на основе галогенированных каучуков // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 5–11.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-1.

E. V. Grabko¹, S. N. Kayushnikov¹, Zh. S. Shashok², E. P. Uss²

¹JSC “Belshina”

²Belarusian State Technological University

VULCANIZATION PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITIONS BASED ON HALOGENATED RUBBERS

The vulcanization properties of rubber compounds based on halogenated butyl rubbers were investigated. The objects of study were elastomer compositions based on chlorobutyl rubber of the HBK-139 brand and bromobutyl rubber of the BBK-232 brand. The compositions differed in the content of antiscorching agent, which was magnesium oxide, introduced into the rubber compounds in dosages of 0.15; 0.30 and 0.50 phr. The study of the kinetic parameters of vulcanization was carried out at three temperatures: 143, 153 and 163°C. It was determined that the rheological properties of rubber compounds based on halogenated rubbers have insignificant differences. It was found that at vulcanization temperatures of 143 and 153°C, the mixtures based on HBK-139, compared to the mixtures based on BBK-232, have higher values of the maximum torque indicator, lower values of the optimal vulcanization time and larger values of the difference between the maximum and minimum torques, i.e. at the specified temperatures, the process of formation of the spatial network occurs faster in the compositions based on HBK-139. It was found that

with an increase in the antiscorching dosage for the compositions based on HBK-139, the optimal vulcanization time increases by 12.7–51.2%, and for the compositions based on BBK-232, the increase was 22.4–35.9%. A slowdown in the vulcanization process at higher temperatures was revealed for rubber compounds based on HBK-139, while for compounds based on BBK-232 an increase in the vulcanization rate index was determined.

Keywords: chlorobutyl rubber, bromobutyl rubber, antiscorching, rubber compound, vulcanization, vulcanization speed index.

For citation: Grabko E. V., Kayushnikov S. N., Shashok Zh. S., Uss E. P. Vulcanization properties of elastomer compositions based on halogenated rubbers. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 5–11 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-1.

Введение. Бутилкаучук (БК) и полученные на его основе галобутилкаучуки (ГБК) – хлорбутилкаучук (ХБК) и бромбутилкаучук (ББК) – обладают уникальными свойствами и в настоящее время весьма востребованы на мировом рынке синтетических каучуков. Благодаря молекулярной структуре они имеют хорошую стойкость к воздействию температуры, также им присуща повышенная стойкость к влаге и воздуху. БК применяют в производстве автомобильных камер, камер форматоров-вулканизаторов, которые являются оборудованием шинного производства и не могут быть изготовлены из другого материала, теплоустойчивых конвейерных лент, кровельных материалов, в том числе безбитумных мастик [1].

Основным потребителем галогенированных бутилкаучуков выступает шинная промышленность. Их используют для изготовления внутреннего слоя бескамерных шин (гермослоя), камер для большегрузных автомобилей, боковин шин [2].

Недостатком ГБК являются неудовлетворительные технологические свойства смесей на их основе из-за склонности данных смесей к подвулканизации вследствие повышенной реакционной способности каучуков.

С повышением температуры смешения свойства смесей на основе ГБК ухудшаются, в результате термомеханического воздействия увеличивается вязкость, снижается пластичность смесей, что обуславливает их повышенную усадку. Смесей на основе ГБК имеют более высокую адгезию к холодным валкам, поэтому при переработке на вальцах смесь часто переходит на задний валок [3].

Главное отличие ГБК от других каучуков, применяемых в производстве шин, состоит в том, что основным вулканизующим агентом их выступает оксид цинка. В процессе вулканизации происходит дегидрогалогенирование каучука с выделением галогенида цинка и образуются связи С–С, вследствие чего вещества с кислой реакцией ускоряют вулканизацию, а со щелочной – замедляют, и поэтому каждый ингредиент должен быть рассмотрен с этой точки зрения. Вследствие большей реакционной способности ББК требования к выбору ингредиентов резиновых смесей на его основе более жесткие по сравнению с ХБК.

Рекомендуют исключить бензойную и салициловую кислоту, фталевый ангидрид и др. В качестве антискорчинга наиболее эффективным для ББК является высокодисперсный оксид магния, служащий акцептором кислоты [4].

Основная часть. Цель работы – определить влияние дозировки антискорчинга на вулканизационные свойства резиновых смесей на основе галогенированных каучуков.

В качестве объектов исследования использовались резиновые смеси на основе хлорбутилкаучука ХБК-139 [5] и бромбутилкаучука ББК-232 [6].

Эластомерные композиции различались содержанием антискорчинга, которым являлся оксид магния в дозировке 0,15; 0,30 и 0,50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Вулканизация смесей проводилась при температурах 143, 153 и 163°C.

Исследование кинетических параметров процесса вулканизации эластомерных композиций осуществлялось на реометре ODR 2000 по ГОСТ 12535–84 [7].

Вулканизационные характеристики резиновых смесей, получаемые на реометре, могут применяться для определения индекса скорости вулканизации, что позволит оценить влияние состава эластомерной композиции на процесс формирования пространственной структуры [8–10]. Величина индекса скорости вулканизации рассчитывается по формуле

$$CRI = 100 / (t_{(c90)} - t_{s2}),$$

где $t_{(c90)}$ – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; t_{s2} – время, необходимое для увеличения минимального крутящего момента на 2 ед., мин.

Вулканизация эластомерных композиций представляет собой процесс взаимодействия каучука с вулканизующим агентом, в результате чего образуется пространственная сетчатая структура. При вулканизации происходит снижение пластических свойств и увеличение высокоэластических и прочностных показателей. На начальной стадии вулканизации резиновая смесь теряет свою способность к текучести (подвулканизация), затем происходит резкий рост прочностных свойств (главный период) и в оптимуме вулканизации

резина достигает наилучшего сочетания физико-механических показателей, которые сохраняет в течение некоторого времени (плато вулканизации). При дальнейшем временном увеличении процесса вулканизации происходит реверсия, или перевулканизация, сопровождающаяся ухудшением свойств вулканизатов. Определение кинетических параметров вулканизации резиновых смесей с помощью реометров позволяет получать информацию обо всех основных стадиях формирования вулканизационной структуры [11, 12].

В таблице приведены результаты определения кинетических параметров процесса вулканизации резиновых смесей на основе галогенированных каучуков.

Из таблицы видно, что при температуре 143°C резиновые смеси на основе различных галогенированных каучуков незначительно отличаются по реологическим свойствам, поскольку значение минимального крутящего момента для композиций на основе ХБК-139 составляет 5,1–5,5 дН·м, а для композиций на основе ББК – 5,3–5,4 дН·м. В данном случае не выявлено заметного влияния дозировки оксида магния на значения минимального крутящего момента.

Определено, что значения максимального крутящего момента для резиновых смесей на основе ХБК-139 выше на 10,2–11,1% по сравнению с композициями из ББК-232. Повышение содержания оксида магния в составе эластомерных композиций на основе ХБК-139 приводит к увеличению

времени начала структурирования в 1,8 раза, а для композиций на основе ББК-232 – всего в 1,25 раза. Следует отметить, что значения показателя t_{s2} для резиновых смесей на основе ББК-232 несколько выше, чем для смесей из ХБК-139 при всех исследуемых дозировках антискоринга. Так, при дозировке 0,15 мас. ч. оксида магния время начала структурирования для композиции на основе ХБК-139 составляет 7,1 мин, а для композиции на основе ББК-232 указанный показатель равен 11,5 мин.

Повышение дозировки оксида магния приводит не только к росту периода начала структурирования, но и увеличивает время достижения оптимальной степени вулканизации для композиций на основе исследуемых галогенированных бутилкаучуков. Установлено, что с повышением содержания замедлителя подвулканизации для композиций на основе ХБК-139 показатель $t_{c(90)}$ увеличивается на 12,7–51,2%, а для композиций на основе ББК-232 – на 22,4–35,9%. Такой характер изменения свойств может быть связан как с различной реакционной способностью эластомера при вулканизации, так и с влиянием оксида магния на стадии формирования пространственной сетки при различных температурах вулканизации. Следует отметить, что значение ΔM , косвенно характеризующее плотность поперечного сшивания, для композиций на основе ББК-232 меньше на 14,2–15,4% по сравнению с композициями на основе ХБК-139.

Кинетические параметры процесса вулканизации резиновых смесей на основе галогенированных каучуков с различным содержанием замедлителя подвулканизации

Наименование каучука	Содержание оксида магния, мас. ч.	M_L , дН·м	M_H , дН·м	t_{s2} , мин	$t_{c(50)}$, мин	$t_{c(90)}$, мин	R_v , дН·м/мин	ΔM , дН·м
143°C·60 мин								
ХБК-139	0,15	5,5	18,4	7,1	12,9	21,2	1,2	12,9
	0,30	5,2	18,4	8,2	14,9	23,9	1,0	13,3
	0,50	5,5	19,0	12,8	21,3	32,2	0,8	13,5
ББК-232	0,15	5,3	16,6	11,5	19,2	34,3	0,6	11,3
	0,30	5,3	16,7	13,6	23,2	42,0	0,5	11,4
	0,50	5,4	17,1	14,4	26,0	46,6	0,6	11,7
153°C·60 мин								
ХБК-139	0,15	5,1	18,1	3,9	6,7	12,1	2,0	13,0
	0,30	4,9	18,0	4,6	7,6	13,0	2,0	13,1
	0,50	5,1	18,9	6,4	10,6	16,9	1,5	13,8
ББК-232	0,15	5,0	16,7	5,9	9,8	18,2	1,2	11,7
	0,30	5,4	17,6	7,0	11,9	22,4	1,1	12,2
	0,50	5,6	18,1	7,8	13,6	25,4	0,9	12,5
163°C·60 мин								
ХБК-139	0,15	5,0	17,9	2,5	3,9	12,5	3,7	12,9
	0,30	5,0	18,2	2,7	4,2	13,9	3,6	13,3
	0,50	5,2	20,7	3,8	6,0	19,3	3,0	15,5
ББК-232	0,15	4,8	16,0	3,8	5,6	9,4	2,3	11,2
	0,30	4,7	16,9	4,5	7,0	12,7	1,8	12,2
	0,50	4,7	17,3	4,7	7,8	13,5	1,6	12,6

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; $t_{c(50)}$ – время достижения заданной степени вулканизации (50%) при заданной температуре, мин; $t_{c(90)}$ – оптимальное время вулканизации, мин; R_v – показатель скорости вулканизации, дН·м/мин; ΔM – разность между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН·м.

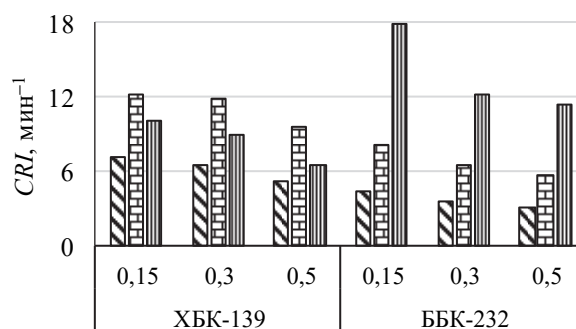
При росте температуры вулканизации до 153°C определено, что для композиций на основе ХБК повышение содержания замедлителя подвулканизации оказывает неоднозначное влияние на показатель минимального крутящего момента. В то же время для композиций на основе ББК повышение содержания оксида магния несколько увеличивает значение показателя M_L . Аналогичная зависимость выявлена и для показателя максимального крутящего момента. Сравнительный анализ результатов определения времени начала вулканизации показал, что композиции на основе ББК-232 имеют более длительный индукционный период по сравнению с композициями на основе ХБК-139. Так, значение t_{s2} для смесей на основе ХБК находится в пределах 3,9–6,4 мин, а для смесей на основе ББК t_{s2} составляет 5,9–7,8 мин. Показатель оптимального времени вулканизации также имеет большие значения для композиций на основе ББК. В данном случае значение $t_{c(90)}$ выше на 50,3–72,3% для смесей на основе бромбутилкаучука, чем для смесей хлорбутилкаучука. При этом с повышением содержания замедлителя подвулканизации оптимальное время вулканизации увеличивается в 1,40 раза как для смесей на основе ХБК, так и для смесей на основе ББК. Значение разности между минимальным и максимальным крутящими моментами меньше на 10,4–11,1% для композиций на основе ББК-232 по сравнению с композициями на основе ХБК-139.

Определение кинетических параметров исследуемых резиновых смесей при температуре 163°C показало, что композиции на основе бромбутилкаучука характеризуются несколько меньшими показателями реологических свойств по сравнению с композициями на основе хлорбутилкаучука. Значения минимального крутящего момента для смесей на основе ХБК-139 находятся в пределах 5,0–5,2 дН·м, а для композиций на основе ББК-232 данный показатель составляет 4,7–4,8 дН·м. В представленном случае не выявлено заметного влияния дозировки оксида магния на значения минимального крутящего момента. При этом показатели максимального крутящего момента также имеют более высокие значения (на 11,9–19,7%) для композиций на основе ХБК, чем композиции из ББК. Установлено, что при исследуемой температуре вулканизации время начала вулканизации меньше для резиновых смесей на основе ХБК в 1,30–1,67 раза по сравнению с резиновыми смесями на основе ББК. Однако оптимальное время вулканизации в 1,09–1,43 раза меньше для композиций на основе бромбутилкаучука по сравнению с композициями на основе хлорбутилкаучука, т. е. процесс структурирования для композиций на основе ББК начинается позже, а оптимальная степень вулканизации достигается быстрее по сравнению со смесями на основе ХБК.

При этом скорость вулканизации композиций на основе ББК при всех исследуемых температурах вулканизации меньше, чем для композиций на основе ХБК. Такое отличие в протекании процесса вулканизации резиновых смесей на основе галогенированных каучуков будет приводить к различиям в структуре вулканизационной сетки и, как следствие, к возможным различиям физико-механических и упруго-динамических свойств. Данное предположение косвенно подтверждается сведениями о разности между минимальным и максимальным крутящими моментами [13], показатель которых различается для композиций на основе ББК-232 и ХБК-139. Следует отметить, что дозировка замедлителя подвулканизации в составе резиновых смесей оказывает влияние не только на величину индукционного периода, но и на процесс формирования пространственной сетки вулканизата.

Индекс скорости вулканизации позволяет судить о влиянии различных компонентов резиновой смеси на скорость формирования поперечных связей между макромолекулами эластомера [14, 15].

На рисунке приведены результаты определения индекса вулканизации резиновых смесей на основе галогенированных бутилкаучуков при различных температурах.



Дозировка оксида магния, мас. ч.

■ 143°C ■ 153°C ■ 163°C

Изменение индекса вулканизации резиновых смесей на основе галогенированных каучуков в зависимости от содержания оксида магния

Из представленных данных видно, что для композиций на основе ХБК-139 индекс скорости вулканизации возрастает при температуре от 143 до 153°C, причем наибольшее значение индекса скорости вулканизации выявлено при минимальном содержании замедлителя подвулканизации. Так, при температуре 143°C значение CRI для композиций с различными дозировками антискоринга находится в пределах 5,2–7,1 мин⁻¹, а при 153°C – 9,5–12,2 мин⁻¹. В то же время при температуре 163°C установлено замедление процесса структурирования, поскольку индекс скорости вулканизации меньше для резиновых смесей, чем

при температуре 153°C. Выявленный характер изменения скорости протекания реакций формирования пространственной сетки вулканизатов может быть связан с увеличением скорости протекания побочных и нежелательных реакций при вулканизации, что будет оказывать влияние на вулканизационную структуру резины и, как следствие, на физико-механические и упруго-динамические свойства.

Установлено, что для композиций на основе ББК-232 индекс скорости вулканизации с увеличением ее температуры повышается при всех исследуемых температурах вулканизации. При этом также выявлены наибольшие значения указанного показателя при минимальной дозировке антискорчинга. Следует отметить, что в данном случае активность протекания процесса формирования пространственной сетки вулканизатов в композициях на основе ББК-232 при наибольшей температуре (163°C) выше, чем у композиций на основе ХБК-139. Такой характер изменения свойств может быть обусловлен влиянием компонентов эластомерной композиции на скорость образования действительного агента вулканизации и его способности в образовании поперечных связей при различных температурах вулканизации [12].

Заключение. Таким образом, на основании проведенных исследований определено, что при изучаемых температурах вулканизации резиновые смеси на основе галогенированных каучуков незначительно отличаются по реологическим свойствам, поскольку значения минимального крутя-

щего момента для композиций не имеют существенных различий. В то же время установлено, что при температурах вулканизации 143 и 153°C резиновые смеси на основе ХБК-139 имеют более высокие значения показателя максимального крутящего момента, меньшие значения оптимального времени вулканизации и большие показатели разности максимального и минимального крутящих моментов, т. е. при указанных температурах процесс формирования пространственной сетки протекает быстрее в композициях на основе ХБК-139. При температуре 163°C выявлено замедление процесса вулканизации резиновых смесей на основе ХБК-139, в то время как для композиций на основе ББК-232 определен аналогичный характер изменения кинетических параметров вулканизации, как и при температуре 153°C (значения индекса скорости вулканизации увеличиваются). Следует отметить, что при названной температуре показатель разности максимального и минимального крутящих моментов, косвенно характеризующий плотность поперечного сшивания, для композиций на основе ХБК-139 несколько выше, чем для композиций на основе ББК-232.

Определено, что увеличение дозировки антискорчинга приводит к повышению оптимального времени вулканизации для композиций на основе ХБК-139 на 12,7–51,2%, а для композиций на основе ББК-232 – на 22,4–35,9%, что обусловлено влиянием оксида магния на начальную стадию формирования пространственной сетки при различных температурах вулканизации.

Список литературы

1. Аверко-Антонович Ю. О., Давлетбаева И. М., Кирпичников П. А. Химия и технология синтетического каучука. М.: КолосС, 2008. 357 с.
2. Имамутдинов И. В., Галимзянова Р. Ю., Хакимуллин Ю. Н. Тенденции развития мирового рынка бутилкаучуков // Промышленное производство и использование эластомеров. 2011. № 1. С. 10–11.
3. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания. СПб.: НОТ, 2010. 620 с.
4. Занавескин Л. Н. Химия и технология промышленного синтеза галогенированных бутилкаучуков. Ч. 2. Бромированный бутилкаучук // Каучук и резина. 2011. № 1. С. 26–34.
5. Хлорбутилкаучук (ХБК-139). URL: <https://proton-v.ru/catalog/kauchuki/khlorbutilkauchuk-khbk-139> (дата обращения: 23.04.2025).
6. Бромбутилкаучук ББК-232. Нижнекамскнефтехим. URL: <https://metatorg.ru/shop/polimernoe-syre/kauchuk-sinteticheskij/brombutilkauchuk-bbk-232-nizhnekamskneftekhim> (дата обращения: 23.04.2025).
7. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканметре: ГОСТ 12535–84. М.: Стандартинформ, 1985. 33 с.
8. Vulcanization characteristics and dynamic mechanical behavior of natural rubber reinforced with silane modified silica / W. Chonkaew [et al.] // Journal of Nanoscience and Nano-technology. 2010. Vol. 10. P. 2018–2024.
9. Facilitating high-temperature curing of natural rubber with a conventional accelerated-sulfur system using a synergistic combination of bismaleimides / S. G. Sathi [et al.] // eXPRESS Polymer Letters. 2021. Vol. 15, no. 1. P. 16–27.
10. Rheometer evidences for the co-curing effect of a bismaleimide in conjunction with the accelerated sulfur on natural rubber/chloroprene rubber blends / M. Pöschl [et al.] // Polymers. 2021. Vol. 13, no. 1510. P. 1–11. DOI: 10.3390/polym13091510.
11. Шутилин Ю. Ф. Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров. Воронеж: ВГТА, 2003. 871 с.

12. Шутилин Ю. Ф. Физикохимия полимеров. Воронеж: ГУП ВО «Воронежская областная типография», 2012. 838 с.
13. Овчаров В. И., Бурмистр М. В., Тютин В. А. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация. М.: Санкт-ТМ, 2001. 400 с.
14. Wang K., Lv H., Liu Z. Vulcanization Characteristics and Static/Dynamic Mechanical Properties of Chlorinated Butyl Rubber Matrix Materials // *Polymers*. 2025. Vol. 17. P. 708. DOI: 10.3390/polym17060708.
15. Enhancing the efficiency of zinc oxide vulcanization in brominated poly (isobutylene-co-isoprene) rubber using structurally different bismaleimides / G. S. Shibulal [et al.] // *Journal of Polymer Research*. 2018. Vol. 25. P. 1–14.

References

1. Averko-Antonovich Yu. O., Davletbaeva I. M., Kirpichnikov P. A. *Khimiya i tekhnologiya sinteticheskogo kauchuka* [Chemistry and technology of synthetic rubber]. Moscow, KolosS Publ., 2008. 357 p. (In Russian).
2. Imamutdinov I. V., Galimzyanova R. Yu., Khakimullin Yu. N. Development trends of the world market of butyl rubbers. *Promyshlennoye proizvodstvo i ispol'zovaniye elastomerov* [Industrial production and use of elastomers], 2011, no. 1, pp. 10–11 (In Russian).
3. Dik Dzh. S. *Tekhnologiya reziny: retsepturostroyeniye i ispytaniya* [Rubber technology: formulation development and testing]. St. Petersburg, NOT Publ., 2010. 620 p. (In Russian).
4. Zhanaveskin L. N. Chemistry and technology of industrial synthesis of halogenated butyl rubbers. Part 2. Brominated butyl rubber. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2011, no. 1, pp. 26–34 (In Russian).
5. Chlorobutyl rubber (HBK-139). Available at: <https://proton-v.ru/catalog/kauchuki/khlorbutilkauchuk-khbk-139> (accessed 23/04/2025) (In Russian).
6. Bromobutyl rubber BBK-232. Nizhnekamskneftekhim. Available at: <https://metatorg.ru/shop/polimernoe-syre/kauchuk-sinteticheskii/brombutilkauchuk-bbk-232-nizhnekamskneftekhim> (accessed 23/04/2025) (In Russian).
7. GOST 12535–84. Rubber compounds. Method for determining vulcanization characteristics using a vulcanometer. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 33 p. (In Russian).
8. Chonkaew W., Mingvanish W., Kunglian U., Rochanawipart N., Brostow W. Vulcanization characteristics and dynamic mechanical behavior of natural rubber reinforced with silane modified silica. *Journal of Nanoscience and Nano-technology*, 2010, vol. 10, pp. 2018–2024.
9. Sathi S. G., Harea E., Machů A., Stoček R. Facilitating high-temperature curing of natural rubber with a conventional accelerated-sulfur system using a synergistic combination of bismaleimides. *EXPRESS Polymer Letters*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 16–27.
10. Pöschl M., Sathi S. G., Stoček R., Kratina O. Rheometer evidences for the co-curing effect of a bismaleimide in conjunction with the accelerated sulfur on natural rubber/chloroprene rubber blends. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 1510, pp. 1–11. DOI: 10.3390/polym13091510.
11. Shutilin Yu. F. *Spravochnoye posobiye po svoystvam i primeneniyu elastomerov* [Handbook of Properties and Applications of Elastomers]. Voronezh, VGTA Publ., 2003. 871 p. (In Russian).
12. Shutilin Yu. F. *Fizikokhimiya polimerov* [Physicochemistry of polymers]. Voronezh, GUP VO “Voronezhskaya oblastnaya tipografiya” Publ., 2012. 838 p. (In Russian).
13. 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, Sankt-TM Publ., 2001. 400 p. (In Russian).
14. Wang K., Lv H., Liu Z. Vulcanization Characteristics and Static/Dynamic Mechanical Properties of Chlorinated Butyl Rubber Matrix Materials. *Polymers*, 2025, vol. 17, pp. 708. DOI: 10.3390/polym17060708.
15. Shibulal G. S., Jinseok J., Joohye W., Changwoon N. Enhancing the efficiency of zinc oxide vulcanization in brominated poly (isobutylene-co-isoprene) rubber using structurally different bismaleimides. *Journal of Polymer Research*, 2018, vol. 25, pp. 1–14.

Информация об авторах

Грабко Юлия Владимировна – начальник исследовательского сектора центральной заводской лаборатории инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (ул. Минское шоссе, 213824, г. Бобруйск, Республика Беларусь). E-mail: yuliya.kalinovskaya.86@mail.ru

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

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

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

Information about the authors

Grabko Yulia Vladimirovna – Head of the Research Sector of the Central Laboratory of Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: yuliya.kalinovskaya.86@mail.ru

Kayushnikov Sergey Nikolayevich – PhD (Engineering), Head of Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoe shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: ksn@belshina.by

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), 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

Uss Elena Petrovna – 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: uss@belstu.by

Поступила 30.04.2025