

**К. Н. Слободкина, Т. В. Макаров, С. И. Вольфсон, К. Б. Вернигоров,
Р. М. Гарипов, В. И. Машуков, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов**

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ И УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ «БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫЙ КАУЧУК-ТИОКОЛ»

Ключевые слова: бутадиен-нитрильный каучук, тиокол, модификация, эластичность, мягчитель, реологические и релаксационные свойства.

В работе исследованы релаксационные характеристики композиций на основе БНК и тиокола, определены их основные упруго-прочностные свойства, что является важным для оценки их эксплуатации в реальных условиях. Рассмотрена зависимость свойств эластомерных композиций на основе БНК от содержания тиокола. Выявлено, что введение тиокола в композиции на основе БНК приводит к значительному снижению вязкости по сравнению с аналогичной композицией, содержащей дибутилфталат. Показано, что температура стеклования снижается незначительно, максимально на 3 °С при содержании тиокола 20 мас. ч., и в данном случае в композиции на основе БНК тиокол выступает в роли мягчителя. Выявлено, что введение тиокола от 20 мас. ч. композициях на основе БНК приводит к значительному увеличению эластичности материала, и дальнейшее увеличение содержания тиокола в системе приводит к снижению показателей эластичности, что связано с уменьшением степени сшивки материала. Определено, что введение тиокола в систему приводит к незначительному увеличению модуля при 100 % растяжении, при этом прочностные характеристики снижаются не более, чем в 1,5 раза, также повышаются эластические свойства композиций и твердость по Шору А снижается. Установлено, что введение тиокола приводит к улучшению технологических свойств композиций на основе БНК, а также способствует повышению эластичности, что важно для материалов герметизирующего назначения. Таким образом, введение тиокола является перспективным методом улучшения эксплуатационных свойств материалов на основе БНК.

**K. N. Slobodkina, T. V. Makarov, S. I. Volfson, K. B. Vernigоров,
R. M. Garipov, V. I. Mashukov, Yu. M. Kazakov, O. V. Stoyanov**

RELAXATION AND ELASTIC-STRENGTH CHARACTERISTICS OF COMPOSITIONS BASED ON BUTADIENE-NITRILE RUBBER-THIOL MIXTURES

Keyword: butadiene-nitrile rubber, thiokol, modification, elasticity, softener, rheological and relaxation properties.

The paper studies the relaxation characteristics of butadiene-nitrile rubber (BNR) and thiokol-based compositions, determines their main elastic-strength properties, which is important for assessing their operation under real conditions. The dependence of the properties of elastomeric compositions based on BNR on the thiokol content is considered. It is revealed that the introduction of thiokol into BNR-based compositions leads to a significant decrease in viscosity compared to a similar composition containing dibutyl phthalate. It is shown that the glass transition temperature decreases insignificantly, by a maximum of 3 °C at a thiokol content of 20 parts by weight, and in this case, in the BNR-based composition, thiokol acts as a softener. It is revealed that the introduction of thiokol from 20 parts by weight into BNR-based compositions leads to a significant increase in the elasticity of the material, and a further increase in the thiokol content in the system leads to a decrease in elasticity, which is associated with a decrease in the degree of crosslinking of the material. It was determined that the introduction of thiokol into the system leads to a slight increase in the modulus at 100% elongation, while the strength characteristics are reduced by no more than 1.5 times, the elastic properties of the compositions also increase and the Shore A hardness decreases. It was found that the introduction of thiokol leads to an improvement in the technological properties of BNR-based compositions, and also contributes to an increase in elasticity, which is important for sealing materials. Thus, the introduction of thiokol is a promising method for improving the operational properties of BNR-based materials.

Введение

В настоящее время благодаря умеренной стоимости, доступности и сочетанию технических и физико-химических свойств бутадиен-нитрильный каучук является одним из самых востребованных каучуков специального назначения [1].

Эластомерные композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука широко применяются для изготовления различных уплотнений и материалов герметизирующего назначения. Но, как известно, свойства бутадиен-нитрильного каучука (БНК) существенно зависят от содержания в них акрилонитрильных (АН) групп [2-3]. С увеличением содержания в БНК АН звеньев улучшается прочность, масло- и бензостойкость, твердость, но

при этом снижаются эластичность и наблюдается ухудшение технологических свойств.

В работах [4-16] изложены результаты многочисленных (отечественных и зарубежных) исследований, направленных на поиск путей модификации полимерных материалов функционального назначения с целью улучшения их свойств, в частности, технологических. Однако исследования, касающиеся исследований релаксационных, вязкоупругих и физико-механических свойств композиций на основе смесей «БНК – тиокол» в литературе не описаны.

Поэтому представляло интерес исследовать процессы физической релаксации, вязкоупругие и прочностные свойства таких композиций, так как

важно для оценки их эксплуатации в реальных условиях.

Целью данной работы являлось изучение влияния тиокола на релаксационные свойства его композиций с БНК.

Объекты и методы исследования

В данной исследовательской работе были использованы эластомерные композиции на основе БНК марки БНКС-40 АМН и жидкого тиокола марки НВБ-2.

Резиновые смеси готовили в лабораторном смесителе-пластикордере «Brabender» (Германия), при температуре 100 °С, со скоростью вращения 60 об/мин. [17].

Рецептура ненаполненной модельной эластомерной композиции приведена в табл. 1 [18].

Таблица 1 – Рецепт ненаполненной модельной эластомерной композиции

Table 1 – Recipe of unfilled model elastomeric composition

Ингредиент	Дозировка, мас. ч.
БНК	100
Технический углерод П-324	45
Оксид цинка	5
Стеариновая кислота	1,5

В остальных случаях в композиции на основе БНК был введен тиокол от 10 до 40 масс. ч. непосредственно в смеситель-пластикордер.

В качестве вулканизирующей системы выступала комбинация *n*-хинондиоксида (*n*-ХДО) и диоксида марганца (MnO₂) [19]. Соотношение ингредиентов в окислительно-восстановительной системе составляло 3:6.

Вулканизация проводилась в гидравлическом прессе при температуре 150 °С в течение 30 минут [20].

В данной работе представлены результаты реологических, физико-механических свойств резиновой смеси на основе БНК и тиокола. Реологические свойства композиций были изучены на вискозиметре расплава полимеров RHEOGRAPH 75 при следующих параметрах: интервал температур 80°С, скорость деформации - 1-1000 с⁻¹. Исследование физико-механических показателей были произведены по ГОСТ 270-75, эластичности по ГОСТ 27110-86, твердости по Шору по ГОСТ 263-75. Упруго-релаксационные свойства были исследованы на приборе DMA 242 C/1/G фирмы Netzsch (Германия) (ГОСТ Р 57739-2017).

Результаты и обсуждения

Первоначально мы также исследовали реологические свойства модельных (ненаполненных) композиций на основе БНК с традиционным пластификатором - дибутилфталатом, широко используемым в резиновой промышленности.

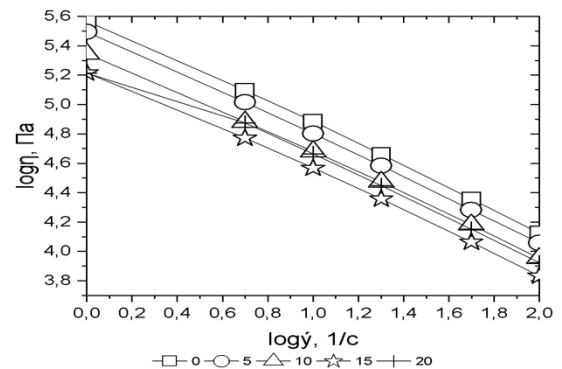


Рис. 1 – Зависимость вязкости от скорости сдвига для композиций на основе БНК с различным содержанием ДБФ (t = 80 °С)

Fig. 1 – Dependence of viscosity on shear rate for butadiene-nitrile rubber (BNR)-based compositions with different dibutyl phthalate (DBP) content (t = 80°C)

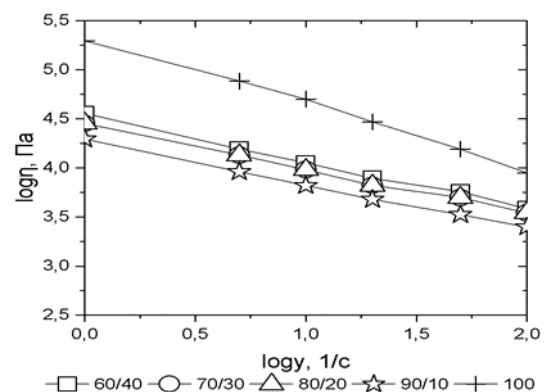


Рис. 2 – Зависимость вязкости от скорости сдвига для композиций на основе БНК и тиокола (t = 80°С)

Fig. 2 – Dependence of viscosity on shear rate for compositions based on BNR and thiokol (t = 80 °C)

Анализ данных рис. 1 и 2 показал, что введение тиокола (рис.2) в композиции на основе БНК приводит к значительному снижению вязкости по сравнению с аналогичной композицией, содержащей дибутилфталат (рис.1). Этот факт, безусловно, положителен с точки зрения переработки предлагаемых материалов.

Что касается пластифицирующего действия тиокола по отношению к БНК, то оно незначительно: судя по результатам динамического механического анализа (ДМА), температура стеклования БНК в двухфазной смеси «БНК – тиокол» снижается незначительно, максимально на 3 °С при содержании тиокола 20 масс. ч. (табл. 2). Следовательно, можно ожидать, что в композиции на основе БНК тиокол выступит в роли в мягчителя.

Влияние содержания тиокола на эластичность по отскоку ненаполненных композиций на основе смеси БНК и тиокола представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, увеличение содержания тиокола от 20% в ненаполненных композициях приводит к значительному увеличению эластичности материала. В большей степени это характерно для композиций с содержанием тиокола 20-30 %.

Дальнейшее увеличение тиокола в системе приводит к снижению показателей эластичности, что связано с уменьшением степени сшивки материала. Таким образом, тиокол оказывает «эластифицирующее» действие на материал.

Таблица 2 – Данные ДМА для композиций на основе БНК с различным содержанием тиокола

Table 2 – Dynamic mechanical analysis (DMA) data for BNR-based compositions with different thiokol contents

БНК-тиокол, мас. ч.	T _g , °C
БНКС-40	-9,2
90:10	-8,5
80:20	-12,5
70:30	-11
60:40	-5,3

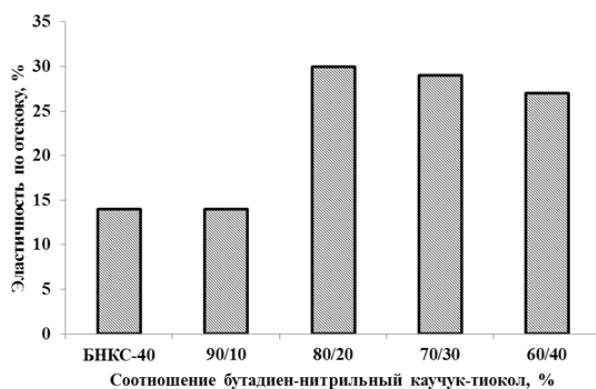


Рис. 3 – Влияние содержания тиокола на эластичность ненаполненных композиций на основе БНК и его смесей с тиоколом

Fig. 3 – Influence of thiokol content on elasticity of unfilled compositions based on BNR and its mixtures with thiokol

Таблица 3 – Упруго-прочностные характеристики композиций на основе смеси БНК – тиокол

Table 3 – Elastic-strength characteristics of composites based on BNR - thiokol mixture

Ингредиенты	Показатели			
	Показатели при 100 % растяжении (σ_{100}), МПа	Условная прочность при растяжении (σ), МПа	Относительное удлинение при разрыве (ϵ), %	Твердость (Н), ед. Шор А
БНКС-40	0,76	4,58	580	79
90:10	0,65	3,81	870	71
80:20	0,87	2,9	700	64
70:30	0,88	2,59	600	55,5
60:40	0,71	2,38	550	50

Как видно из таблицы 3, введение тиокола приводит к незначительному увеличению модуля при 100 % растяжении, при этом прочностные снижаются незначительно, не более, чем в 1,5 раза,

оставаясь на достаточном эксплуатационном уровне. При этом следует отметить, что при увеличении содержания тиокола в смеси улучшаются эластические свойства композиций одновременно с твердостью по Шору А до 30%-ного содержания тиокола. В дальнейшем твердость незначительно снижается, что обусловлено «эластифицирующим» влиянием тиокола в смеси.

Заключение

Установлено, что введение тиокола приводит к улучшению технологических свойств композиций на основе БНК, а также способствует повышению эластичности, что важно для материалов герметизирующего назначения. Таким образом, введение тиокола является перспективным методом улучшения эксплуатационных свойств материалов на основе БНК.

Литература

1. Н. В. Шадрин, В. Д. Гоголев. Реологические и физико-механические свойства морозостойких смесевых эластомеров / Материаловедение. - №9. – 2022. - С.22-28. DOI:10.31044/1684-579X-2022-0-9-22-28.
2. А. М. Чайкун, О. А. Елисеев, И. С. Наумов, М. А. Венедиктова. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков / Труды ВИАМ. - №12. – 2013. – С. 1-10.
3. S. M. Mammadov, S. A. Rzayeva, A. A. Garibov, O. N. Akberov, T. F. Gojayeva, J. S. Mamadov, N. M. Hajiyeva. Study of influence of copolymer vinyl chloride and vinyl acetate on the properties of butadiene nitrile rubber / International Journal of Composite Materials / V.2. – 2012. – P. 137-141.
4. И. А. Козлов, А. Ю. Исаев, Н. Ф. Лукина, А. К. Алёхин, О. А. Стародубцева. Клеи с постоянной липкостью, клеи чувствительные к давлению, самоклеящиеся материалы. Современное состояние вопроса. Часть 1. / Клеи. Герметики. Технологии. - №10. – 2024. – С. 19–28. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-10-19-28.
5. И. А. Козлов, А. Ю. Исаев, Н. Ф. Лукина, А. К. Алёхин, О. А. Стародубцева. Клеи с постоянной липкостью, клеи чувствительные к давлению, самоклеящиеся материалы. Современное состояние вопроса. Часть 2. / Клеи. Герметики. Технологии. - №11. – 2024. – С. 16 – 26. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-11-16-26.
6. В. В. Мяделец, А. В. Касперович, А. Г. Мозырев. Исследование релаксационных процессов в эластомерах. Наполненных измельченным вулканизатом / Труды БГТУ. - №4. – 2015. – С. 67-73.
7. Л. Л. Краснов, О. А. Елисеев, И. С. Наумов, М. А. Венедиктова, В. А. Роговицкий. Исследование и модификация термостойкого герметизирующего состава, и разработка технологии изготовления ленточного герметикана его основе / Труды ВИАМ. - №4. – 2017. – С. 70–80.
8. В. Д. Ворончихин, К. А. Дубков, С. В. Семиколонов, Д. П. Иванов, И. А. Ильин. Влияние добавки низкомолекулярных каучуков на свойства смесей и резин. Ч. 2. Модификация композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука / Каучук и резина. – 2011. - №1. – С. 4-7.
9. А. Р. Ахмедгараева, Р. Ю. Галимзянова, В. Г. Хозин, Ю. Н. Хакимуллин. Отверждаемые герметики на основе бутадиен-нитрильного каучука / Вестник

- технологического университета. – 2022. – т.25. - №12. – С. 41-45.
10. А. Р. Ахмедгараева, Р. Ю. Галимзянова, В. Г. Хозин, Ю. Н. Хакимуллин. Неотверждаемые герметики на основе бутадиен-нитрильного каучука / Вестник технологического университета. – 2019. – т.22. - №7. - С. 27-33.
11. К. Н. Слободкина, К. Б. Вернигоров, Ю. М. Казаков, О. В. Стоянов. Адгезионные свойства композиций на основе смесей «бутадиен-нитрильный каучук – тиокол» / Вестник технологического университета. – 2024. - № 9. - С. 34-40.
12. Л. И. Муртазина, А. Р. Гарифуллин, И. А. Никульцев, Р. Ф. Фатхуллин, Р. А. Ахмедьянова, Д. Г. Милославский, Р. Ю. Галимзянова, Ю. Н. Хакимуллин. Регулирование свойств неотверждаемых герметиков на основе этиленпропиленового каучука пластификаторами / Вестник технологического университета. – 2013- т. 16. - №9. - С 105-108.
13. М. С. Перова, К. А. Антипов, Р. Ю. Галимзянова, Ю. Н. Хакимуллин. Герметизирующие композиции на основе бутилкаучука, модифицированные реакционноспособными олигомерами / Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. №6. – С. 9-12.
14. А. Ю. Юрченко, Ю. Л. Морозов, Т. Т. Рахматуллин, С. В. Емельянов. Пути улучшения свойств резиновых смесей на основе бутадиен-нитрильных каучуков для производства рукавов / Каучук и резина. - т.77. – №1-2018. – С. 58-61.
15. А. Н. Омельченко, Ю. В. Хорошавина, Г. А. Николаев, А. С. Рамш, С. К. Курлянд. Модификация бутадиен-нитрильного каучука малыми добавками силосанов / Каучук и резина. - №6. – 2014. – С. 16-17.
16. Н. Ф. Ушмарин, Е. Н. Егоров, Н. И. Кольцов. Морозостойкая резина на основе комбинации бутадиен-нитрильного и гидриновых каучуков / Изв. Вузов. Химия и хим. Технология. – Т.60. - №8 – 2017.- С. 60-64
17. К. Н. Слободкина, Т. В. Макаров, Р. Ф. Сираева, С. В. Вольфсон. Особенности вулканизации и упруго-прочностные свойства композиций на основе смеси бутадиен-нитрильного каучука и тиокола / Вестник технологического университета. – 2011. - №14. – С. 112-116.
18. К. Н. Слободкина, А. А. Рудаков, Т. В. Макаров. Адгезионные и защитные свойства композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука и тиокола / Вестник технологического университета. – 2014. - №10. – С. 94-96.
19. К. Н. Слободкина, Л. Ф. Мустафин, Т. В. Макаров, С. И. Вольфсон. Адгезионные свойства эластомерных композиций на основе смеси бутадиен-нитрильного каучука и тиокола, наполненные техническим углеродом / Вестник технологического университета. – 2015. - № 8. – С. 89-90.
20. К. Н. Слободкина, А. А. Рудаков, Т. В. Макаров, С. И. Вольфсон. Маслостойкие герметизирующие композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука и тиокола / Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. - №5. - С. 12-14.
- Mamadov, N. M.Hajiyeva . M. Hajiyeva. Study of influence of copolymer vinyl chloride and vinyl acetate on the properties of butadiene nitrile rubber / International Journal of Composite Materials / V.2. - 2012. - P. 137-141.
4. I. A. Kozlov, A. Yu. Isaev, N. F. Lukina, A. K. Alyokhin, O. A. Starodubtseva. Permanent adhesives, pressure sensitive adhesives, self-adhesive materials. Modern state of the question. Part 1. / Adhesives. Sealants. Technologies. - №10. - 2024. - С. 19-28. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-10-19-28.
5. I. A. Kozlov, A. Y. Isaev, N. F. Lukina, A. K. Alyokhin, O. A. Starodubtseva. Permanent adhesives, pressure sensitive adhesives, self-adhesive materials. Modern state of the question. Part 2. / Adhesives. Sealants. Technologies. - №11. - 2024. - С. 16 - 26. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-11-16-26.
6. B. V. Myadelev, A. V. Kasperovich, A. G. Mozyrev. Investigation of relaxation processes in elastomers. Filled with crushed vulcanisate / Proceedings of BSTU. - №4. - 2015. - С. 67-73.
7. L. L. Krasnov, O. A. Eliseev, I. S. Naumov, M. A. Venediktova , V. A. Rogovitsky. Investigation and Modification of the Heat Resistant Sealing Composition and Development of the Technology of Tape Sealant Manufacturing on its Basis / Proc. of VIAM. - №4. - 2017. - С. 70-80.
8. V. D. Voronchikhin, K. A. Dubkov, S. V. Semikolenov, D. P. Ivanov, I. A. Ilyin. Influence of low molecular weight rubber additives on the properties of compounds and rubbers. Part 2: Modification of compositions based on butadiene-nitrile rubber / Rubber and Rubber. - 2011. - №1. - P. 4-7.
9. A. R. Akhmedgoraeva, R. Y. Galimzyanova, V. G. Khozin, Y. N. Khakimullin. Curable sealants based on butadiene-nitrile rubber / Herald of Technological University. - 2022. - V.25. - №12. - С. 41-45.
10. A. R. Akhmedgoraeva, R. Y. Galimzyanova, V. G. Khozin, Y. N. Khakimullin. Non-curing sealants based on butadiene-nitrile rubber / Herald of Technological University. - 2019. - V.22. - №7. - P. 27-33.
11. K. N. Slobodkina, K. B. Vernigоров, Y. M. Kazakov, O. V. Stoyanov. Adhesion properties of compositions based on mixtures 'butadiene-nitrile rubber - thiokol' / Herald of Technological University. - 2024. - № 9. - P. 34-40.
12. L. I. Murtazina, A. R. Garifullin, I. A. Nikultsev, R. F. Fatkhullin, R. A. Akhmedyanova, D. G. Miloslavsky, R. Y. Galimzyanova, Y. N. Khakimullin. Regulation of properties of non-curing sealants based on ethylene propylene rubber by plasticisers / Herald of Technological University. - 2013- V. 16. - №9. - P 105-108.
13. M. S. Perova, K. A. Antipov, R. Y. Galimzyanova, Y. N. Khakimullin. Sealing compositions on the basis of butyl rubber modified by reactive oligomers / Adhesives. Sealants. Technologies. - 2011. №6. - P. 9-12.
14. A. Yu. Yurchenko, Y. L. Morozov, T. T. Rakhmatullin, S. V. Emelyanov. Ways to improve the properties of rubber mixtures based on butadiene-nitrile rubbers for the production of hoses / Rubber and Rubber. - V.77. - №1-2018. - P. 58-61.
15. A. N. Omelchenko, Y. V. Khoroshavina, G. A. Nikolaev, A. S. Ramsch, S. K. Kurlyand. Modification of butadiene-nitrile rubber by small additives of siloxanes / Rubber and Rubber. - №6. - 2014. - P. 16-17.
16. N. F. Ushmarin, E. N. Egorov, N. I. Koltsov. Frost-resistant rubber based on the combination of butadiene-nitrile and hydriano rubbers / Izv. Vuzov. Chemistry and Chemical Technology. - V.60. - №8 - 2017.- P. 60-64
17. K. N. Slobodkina, T. V. Makarov, R. F. Siraeva, S. V. Wolfson. Features of vulcanisation and elastic strength properties of compositions based on a mixture of butadiene-

References

nitrile rubber and thiokol / Herald of Technological University. - 2011. - №14. - P. 112-116.

18. K. N. Slobodkina, A. A. Rudakov, T. V. Makarov. Adhesion and protective properties of compositions based on butadiene-nitrile rubber and thiokol / Herald of Technological University. - 2014. - №10. - P. 94-96.

19. K. N. Slobodkina, L. F. Mustafin, T. V. Makarov, S. I. Wolfson. Adhesion properties of elastomeric compositions

based on a mixture of butadiene-nitrile rubber and thiokol filled with technical carbon / Herald of Technological University - 2015. - № 8. - P. 89-90.

20. K. N. Slobodkina, A. A. Rudakov, T. V. Makarov, S. I. Wolfson. Oil-and-gasoline resistant sealing compositions on the basis of butadiene-nitrile rubber and thiokol / Adhesives. Sealants. Technologies. - 2015. - №5. - P. 12-14.

© **К. Н. СлОбодкина** – инженер каф. Технологии пластических масс (ТПМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, SlobodkinaKN@corp.knrtu.ru; **Т. В. Макаров** – канд. техн. наук, главный эксперт, Полилаб, ПАО «Казаньоргсинтез», Казань, Россия, makarovtv@kos.sibur.ru; **С. И. Вольфсон** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. Химии и технологии переработки эластомеров (ХТПЭ), КНИТУ, VolfsonSI@corp.knrtu.ru; **Р. М. Гарипов** – д-р, хим. наук, проф. каф. ТПМ, КНИТУ, GaripovRM@corp.knrtu.ru; **В. И. Машуков** – канд. хим. наук, директор, прикладные разработки, «Сибур Полилаб», Москва, Россия, mashukovvi@sibur.ru; **К. Б. Вернигоров** – канд. хим. наук, генеральный директор ООО «Сибур Полилаб», Москва, Россия, VernigovKB@sibur.ru; **Ю. М. Казаков** – д-р техн. наук, проф. каф. ХТПЭ, КНИТУ, Kazakov@kstu.ru; **О. В. Стоянов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТПМ, КНИТУ, StoyanovOV@corp.knrtu.ru.

© **К. N. Slobodkina** – Engineer of the department of Plastics Technology (PT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, SlobodkinaKN@corp.knrtu.ru; **T. V. Makarov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Chief Expert of Polilab, PJSC Kazanorgsintez, Kazan, Russia, makarovtv@kos.sibur.ru; **S. I Volfson** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor the department of Chemistry and Processing Technology of Elastomers (CPTE), KNRTU, VolfsonSI@corp.knrtu.ru; **R. M. Garipov** – Doctor of technical Sciences, Professor the department of plastics technology of KNRTU, GaripovRM@corp.knrtu.ru; **V. I Mashukov** – PhD (Chemical Sci.), Associate professor, Director, Applied developments, Sibur, Moscow, Russia; **K. B. Vernigov** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, General Director of Sibur PoliLab, Moscow, Russia, VernigovKB@sibur.ru; **Yu. M. Kazakov** – Doctor of Sciences, Professor of the CPTE department, KNRTU, Kazakov@kstu.ru; **O. V. Stoyanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the PT department, KNRTU, StoyanovOV@corp.knrtu.ru.