

УДК 678.046:547.565.2

Е. П. Усс¹, Ж. С. Шашок¹, Н. Р. Прокопчук¹, О. А. Кротова¹,
О. И. Шадыро², Г. А. Ксендзова²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Учреждение Белорусского государственного университета

«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗИН С НОВЫМИ СТАБИЛИЗАТОРАМИ ФЕНОЛЬНОГО ТИПА

Исследована возможность совместного применения модифицированных пространственно-затрудненных 1,2-дигидроксibenзолов и промышленного противостарителя аминного типа (6PPD) в рецептурах наполненных эластомерных композиций на основе комбинации непредельных натурального и синтетического полибутадиенового каучуков. Установлено влияние комбинаций противостарителей фенольного и аминного типов на упруго-прочностные свойства резин, стойкость вулканизатов к воздействию повышенных температур, а также на усталостную выносливость образцов при многократном растяжении. Модифицированные стабилизаторы различаются типом, количеством и пространственным расположением заместителей в бензольном кольце. Исследуемые ингредиенты вводились в резиновые смеси в дозировке 2,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука. В качестве образца сравнения использовались эластомерные композиции, содержащие комбинацию промышленных стабилизаторов фенольного 2,6-ди-*tert*-бутил-4-метилфенол (ионол) и аминного N-(1,3-диметилбутил)-N'-фенил-*p*-фенилендиамин (6PPD) типов в дозировке по 2,0 мас. ч. Определено, что замена промышленного стабилизатора ионола на модифицированные производные 1,2-дигидроксibenзолов позволяет получать резины, не уступающие или превосходящие по физико-механическим характеристикам вулканизаты с комбинацией промышленных стабилизаторов. Выявлено, что применение в резиновых смесях стабилизатора с азепанильным циклом совместно с 6PPD обеспечивает наиболее существенное улучшение упруго-прочностных свойств резин как до, так и после теплового старения, а также позволяет получать вулканизаты с наибольшей усталостной выносливостью.

Ключевые слова: эластомерная композиция, стабилизирующая добавка, производные пирокатехина, 6PPD, прочность, раздир, теплостойкость, динамическая выносливость.

Для цитирования: Усс Е. П., Шашок Ж. С., Прокопчук Н. Р., Кротова О. А., Шадыро О. И., Ксендзова Г. А. Технические свойства резин с новыми стабилизаторами фенольного типа // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 19–24.

Е. П. Uss¹, Zh. S. Shashok¹, N. R. Prokopchuk¹, O. A. Krotova¹,
O. I. Shadyro², G. A. Ksendzova²

¹Belarusian State Technological University

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University

TECHNICAL PROPERTIES OF RUBBERS WITH NEW PHENOLIC STABILIZERS

The possibility of combined use of modified sterically hindered 1,2-dihydroxybenzenes and industrial antioxidant of amine type (6PPD) in the formulations of filled elastomeric compositions based on combination of unsaturated natural and synthetic polybutadiene rubbers has been investigated. The effect of combinations of phenolic and amine antioxidants on the elastic-strength properties of rubbers, the resistance of vulcanizates to high temperatures, and also on the fatigue endurance of specimens under repeated tension has been established. Modified stabilizers differ in the type, number, and spatial arrangement of substituents in the benzene ring. These ingredients were introduced into rubber mixtures in dosage of 2.0 phr. Elastomeric compositions containing combination of industrial stabilizers phenolic 2,6-di-*tert*-butyl-4-methylphenol (ionol) and amine N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-*p*-phenylenediamine (6PPD) types in dosage of 2.0 phr. It was determined that replacing the industrial stabilizer of ionol with modified derivatives of 1,2-dihydroxybenzenes makes it possible to obtain rubbers that are not inferior or superior in physical and mechanical characteristics to vulcanizates with combination of industrial stabilizers. It was found that the use of stabilizer with an azepanyl cycle in rubber mixtures together with 6PPD provides the most significant improvement in the elastic-strength properties of rubbers both before and after heat aging, and also makes it possible to obtain vulcanizates with the highest fatigue endurance.

Key words: elastomeric composition, stabilizing additive, pyrocatechin derivatives, 6PPD, strength, tear, heat resistance, dynamic endurance.

For citation: Uss E. P., Shashok Zh. S., Prokopchuk N. R., Krotova O. A., Shadyro O. I., Ksenzova G. A. Technical properties of rubbers with new phenolic stabilizers. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 19–24 (In Russian).

Введение. Окисление высокомолекулярных органических соединений кислородом воздуха представляет собой цепной процесс с участием активных свободных радикалов. Введение даже в небольшом количестве стабилизаторов тормозит процесс термоокислительной деструкции полимеров. Механизм действия широко применяемых стабилизаторов (ароматических аминов и фенолов) в технологии эластомеров состоит в обрыве кинетических цепей окисления по реакции с пероксидными радикалами. При этом продуктами превращения фенольных и аминных стабилизаторов являются хиноидные соединения, способные, в свою очередь, акцептировать алкильные радикалы [1–8]. Известно [9], что антиокислительное действие индивидуальных стабилизаторов на основе производных фенола и амина может быть связано с синергетическими эффектами смесей исходных стабилизаторов с промежуточными продуктами их превращения.

Недостатками применения фенольных антиоксидантов является их высокая летучесть и диффузионная активность в процессах переработки, хранения и эксплуатации эластомерных материалов [2, 9, 10]. В связи с этим поиск новых более эффективных стабилизаторов резиновых изделий не теряет своей актуальности. Для улучшения физико-химических характеристик фенольных стабилизаторов сотрудниками лаборатории химии свободнорадикальных процессов учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (НИИ ФХП БГУ) предложено модифицировать структуры пространственно-затрудненных 1,2-дигидроксибензолов азепанильным циклом и фенилазотметиновой группой. В данной работе была исследована возможность использования композиций синтезированных соединений с промышленными антиоксидантами для защиты резин на основе непредельных каучуков.

Основная часть. Целью работы являлось исследование совместного действия модифицированных фенольных и промышленного аминного стабилизаторов на технические свойства наполненных эластомерных композиций.

Объектами исследования являлись наполненные эластомерные композиции на основе комбинации натурального (НК) и синтетического полибутадиенового (СКД) каучуков. В качестве фенольных стабилизирующих добавок

исследовались следующие производные пирокатехина: 3-(1-азепанилметил)-5-трет-бутил-1,2-дигидроксибензол (стабилизатор 1) и 4,6-ди-трет-бутил-3-(4-гидроксифенилимино-метил)-1,2-дигидроксибензол (стабилизатор 2). Данные стабилизаторы вводились в наполненные резиновые смеси в дозировке 2,0 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Оценка эффективности стабилизирующего действия опытных добавок проводилась в сравнении с наиболее часто применяемым в промышленности фенольным противостарителем 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенолом (ионолом), который вводился в резиновые смеси в равнозначной дозировке. Исследуемые добавки фенольного типа использовались совместно с промышленным стабилизатором аминного типа – N-(1,3-диметилбутил)-N'-фенил-п-фенилендиамином (6PPD) в дозировке 2,0 мас. ч.

В табл. 1 приведена характеристика опытных стабилизирующих добавок на основе производных пирокатехина и промышленных противостарителей.

Таблица 1

Характеристика исследуемых стабилизаторов

Стабилизатор	Молярная масса, г/моль	Температура плавления, °С
Стабилизатор 1 [11]	277,41	160–162
Стабилизатор 2 [12]	341,45	148–150
Ионол [13]	220,35	69–73
6PPD [13]	268,40	46–50

Определение упруго-прочностных свойств резин проводилось согласно ГОСТ 270–75. Сопротивление раздиру резин оценивалось на дугообразных образцах с надрезом в соответствии с ГОСТ 262–93. Стойкость вулканизатов к термоокислительной деструкции определялась по изменению условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве после выдержки их в термостате по ускоренной методике проведения испытания, предполагающей использование следующего режима теплового старения: температура $120 \pm 2^\circ\text{C}$, продолжительность $16 \pm 0,25$ ч [14]. Испытание по определению усталостной выносливости резин при многократном растяжении проводилось по ГОСТ 261–79.

Влияние стабилизирующих добавок на упруго-прочностные показатели резин оценивали по строго регламентированному методу

физико-механических испытаний резин. Необходимо отметить, что определяемые стандартные механические показатели резин могут использоваться только для сравнительной оценки различных резин и контроля их качества, поскольку в процессе эксплуатации изделия из эластомеров не испытывают тех предельных нагрузок и деформаций, которые используются при испытании резин [15].

Результаты определения упруго-прочностных показателей резин с исследуемыми стабилизаторами до и после теплового старения представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Упруго-прочностные показатели резин
с исследуемыми стабилизаторами**

Наименование стабилизатора	f_e , МПа	f_p , МПа	ε_p , %	T_s , кН/м
До теплового старения				
Ионол + 6PPD	5,0	15,9	640	95
Стабилизатор 1 + 6PPD	4,2	17,8	700	88
Стабилизатор 2 + 6PPD	5,5	16,5	610	89
После теплового старения				
Ионол + 6PPD	–	12,6	450	61
Стабилизатор 1 + 6PPD	–	16,5	580	89
Стабилизатор 2 + 6PPD	–	13,0	450	89

Примечание. f_e – условное напряжение при 300%-ном удлинении (модуль 300%), МПа; f_p – условная прочность при растяжении, МПа; ε_p – относительное удлинение при разрыве, %; T_s – сопротивление раздиру, кН/м.

Основной причиной изменения свойств каучуков и резин под действием температуры в воздушной среде является окисление и образование свободных радикалов, которые в дальнейшем могут приводить к деструкции и частичному сшиванию полимерных цепей. Этот процесс может быть охарактеризован по степени изменения физико-механических показателей резин [16]. Выявлено, что введение всех опытных стабилизаторов в комбинации с 6PPD в промышленные резиновые смеси позволяет получать резины, не уступающие или превосходящие по термоокислительной стойкости образец с комбинацией промышленных стабилизаторов. Показано, что наибольшей антиокислительной активностью в резинах на основе каучуков НК + СКД обладает комбинация стабилизатора 1 и 6PPD. В данном случае показатель условной прочности после теплового старения для резин с указанными стабилизаторами снижается на 7,3%, относительного удлинения при разрыве – на 17,1%. При этом для образца сравнения выявлено более существенное снижение указанных характеристик – на 20,8 и

29,7% соответственно. Аналогичное изменение упруго-прочностных показателей после теплового старения определено и для резин с комбинацией стабилизатора 2 и 6PPD.

Одним из методов механических испытаний резин является испытание по определению сопротивления раздиру, которое позволяет выявить особенности специфического поведения эластомерного материала в условиях воздействия концентраторов напряжений. Определено, что сопротивление резин раздиру до теплового старения при замене промышленного стабилизатора ионола на исследуемые компоненты изменяется в пределах погрешности, допустимой ГОСТ 262–93; в данном случае изменение показателя не превышает $\pm 7,4\%$. Однако после теплового старения сопротивление раздиру для резин с исследуемыми производными пирокатехина изменяется в меньшей степени, чем у образца с комбинацией ионола и 6PPD. Так, падение сопротивления раздиру для образца сравнения составляет 35,8%, а для резин с исследуемыми добавками изменение показателя T_s не превышает 1,1%.

Таким образом, замена промышленного стабилизатора ионола на опытные добавки на основе производных пирокатехина в комбинации с 6PPD позволяет получать резины, не уступающие или превосходящие по физико-механическим характеристикам до и после теплового старения резину с комбинацией промышленных стабилизаторов ионол + 6PPD. Установлено, что применение стабилизатора азепанильного цикла (стабилизатор 1) обеспечивает более существенное улучшение технических свойств резин по сравнению с композицией, содержащей стабилизатор с фенилазометиновым фрагментом (стабилизатор 2). Так, для резин со стабилизатором 1, определено увеличение до 11,9% условной прочности при растяжении, наименьшее изменение упруго-прочностных характеристик после теплового старения (не более 17,1%) при сохранении исходного значения сопротивления раздиру (изменение показателя после старения не более 1,1%). Такой характер изменения упруго-прочностных показателей резин до и после теплового старения может быть связан с различиями в растворимости опытных и промышленных стабилизаторов в эластомерной матрице, их диффузионной и антиокислительной активности, различными скоростями расходования стабилизаторов при обрыве кинетических цепей окисления. Кроме того, возможно проявление синергетического или аддитивного ингибирующего действия при использовании комбинации стабилизаторов фенольного и аминного типов, а также их непосредственное участие в процессах

формирования вулканизационной структуры и природы поперечных связей резин.

Усталостная выносливость при динамическом утомлении резин оценивается числом циклов нагружения, которое может выдержать до разрушения образец материала в регламентированных условиях испытания [17]. В табл. 3 представлены результаты исследований резин по усталостной выносливости при многократном растяжении (статическая деформация 0%, амплитуда динамической деформации 150%).

Таблица 3
Усталостная выносливость резин при многократном растяжении

Наименование стабилизатора	Усталостная выносливость при многократном растяжении, тыс. циклов	
	до теплового старения	после теплового старения
Ионол + 6PPD	1080,0	141,0
Стабилизатор 1 + 6PPD	1080,0	389,0
Стабилизатор 2 + 6PPD	1080,0	124,5

При определении сопротивления резин многократному растяжению до теплового старения не установлено изменений показателя усталостной выносливости в зависимости от состава резин. При этом после теплового старения выявлено, что резины, содержащие комбинацию стабилизатора 1 и 6PPD,

имеют в 2,8 раза большую усталостную выносливость по сравнению с резиной с промышленными стабилизаторами. В то же время введение комбинации стабилизатора 2 и 6PPD в резиновые смеси на основе каучуков общего назначения приводит к снижению значения показателя на 11,7%. Таким образом, изменение динамических характеристик, по-видимому, обусловлено меньшей летучестью стабилизатора 1, содержащего циклоаминометильный и *трет*-бутильный фрагменты, что приводит к замедлению процесса потери механических свойств при развитии термоокислительной деструкции в условиях воздействия многократных циклических деформаций.

Заключение. Доказана возможность совместного использования новых производных пирокатехина и стабилизатора 6PPD в составе эластомерных композиций на основе комбинации каучуков НК и СКД, не уступающих по антиокислительной активности комбинации промышленных противостарителей ионолу и 6PPD. Установлено, что стабилизатор с циклоаминометильным фрагментом может применяться в качестве стабилизатора полифункционального действия, эффективно защищающим резины на основе каучуков общего назначения от теплового старения (более чем на 12,6%) и многократных циклических деформаций (в 2,8 раза) по сравнению с резиной, содержащей комбинацию промышленных стабилизаторов.

Список литературы

1. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров / под ред. Г. Е. Заикова. М.: Мир, 1988. 246 с.
2. Заиков Г. Е. Старение и стабилизация полимеров (Кому и зачем это надо? Исторический аспект) // Каучук и резина. 2008. № 4. С. 10–13.
3. Gui-Yang Li, Koenig J. L. A Review of Rubber Oxidation // Rubber Chemistry and Technology. 2005. Vol. 78, issue 2. P. 355–390.
4. Cheremisinoff N. P. Handbook of Polymer Science and Technology. Vol. 2. Performance Properties of Plastics and Elastomers. New York: Marcel Dekker, 1989. 758 p.
5. Thermo-oxidative aging resistance and mechanism of a macromolecular hindered phenol antioxidant for natural rubber / W. Wu [et al.] // Journal of Elastomers & Plastics. 2017. Vol. 50, issue 4. P. 372–387.
6. Ковтун Г. А. Реакционная способность взаимодействия фенольных антиоксидантов с пероксильными радикалами // Катализ и нефтехимия. 2000. № 4. С. 1–9.
7. Klemchuk P. P., Matthew E. G. Stabilization mechanisms of hindered amines // Macromolecular Symposia. 1988. Vol. 28, issue 1. P. 117–144.
8. Pospíšil J. Activity Mechanisms of Amines in Polymer Stabilization // Polymer Durability. 1996. Chapter 18. P. 271–285.
9. Мухмудинов А. А., Нелюбин А. А., Ильясов Р. С. Экологические аспекты модификации ингредиентов и технологии производства шин. Казань: ФЭН, 1999. 400 с.
10. Пиотровский К. Б., Тарасова З. Н. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов. М.: Химия, 1980. 264 с.
11. Redox-active metal(II) complexes of sterically hindered phenolic ligands: antibacterial activity and reduction of cytochrome c. Part III. Copper(II) complexes of cycloaminomethyl derivatives of o-diphenols / N. V. Loginova [et al.] // Polyhedron. 2013. Vol. 57. P. 39–46.

12. Синтез производных 3,5-ди-трет-бутил-1,2-дигидроксibenзола и их влияние на свободнорадикальное окисление гексана и кислородоактивирующую способность нейтрофилов / Г. А. Ксендзова [и др.] // Журнал общей химии. 2019. Т. 89, № 3. С. 357–365.

13. Большой справочник резинщика. В 2 ч. Ч. 2. Каучуки и ингредиенты / под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. М.: Техинформ, 2012. 735 с.

14. Свойства резиновых смесей и резин: оценка, регулирование, стабилизация / В. И. Овчаров [и др.]. М.: САНТ-ТМ, 2001. 400 с.

15. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов: учеб. для вузов. М.: Истек, 2009. 502 с.

16. Федюкин Д. Л., Махлис Ф. А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.

17. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебков Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.

References

1. Grassi N., Skott Dzh. *Destruksiya i stabilizatsiya polimerov* [Destruction and stabilization of polymers]. Moscow, Mir Publ., 1988. 246 p.

2. Zaikov G. E. Aging and stabilization of polymers (Who needs it and why? Historical aspect). *Kauchuk i rezina* [Kauchuk and rubber], 2008, no. 4, pp. 10–13 (In Russian).

3. Gui-Yang Li, Koenig J. L. A Review of Rubber Oxidation. *Rubber Chemistry and Technology*. 2005, vol. 78, issue 2, pp. 355–390.

4. Cheremisinoff N. P. Handbook of Polymer Science and Technology. Vol. 2. Performance Properties of Plastics and Elastomers. New York, Marcel Dekker, 1989. 758 p.

5. Wu W., Yang S., Lai X., Li H. Thermo-oxidative aging resistance and mechanism of a macromolecular hindered phenol antioxidant for natural rubber. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2017, vol. 50, issue 4, pp. 372–387.

6. Kovtun G. A. Reactivity of phenolic antioxidants interacting with peroxy radicals. *Kataliz i neftekhimiya* [Catalysis and petrochemistry], 2000, no. 4, pp. 1–9 (In Russian).

7. Klemchuk P. P., Matthew E. G. Stabilization mechanisms of hindered amines. *Macromolecular Symposia*, 1988, vol. 28, issue 1, pp. 117–144.

8. Pospíšil J. Activity Mechanisms of Amines in Polymer Stabilization. *Polymer Durability*. 1996, chapter 18, pp. 271–285.

9. Muhmudinov A. A., Nelyubin A. A., Il'yasov R. S. *Ekologicheskiye aspekty modifikatsii ingrediyyentov i tekhnologii proizvodstva shin* [Environmental aspects of ingredient modification and tire manufacturing technology]. Kazan, Fen Publ., 1999. 400 p.

10. Piotrovskiy K. B., Tarasova Z. N. *Starenie i stabilizatsiya sinteticheskikh kauchukov i vulkanizatsiy* [Aging and stabilization of synthetic rubbers and vulcanizates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 264 p.

11. Loginova N. V., Gres A. T., Polozov G. I., Koval'chuk T. V., Osipovich N. P., Zheldakova R. A., Faletrov Y. V., Strakha I. S., Azarko I. I. Redox-active metal(II) complexes of sterically hindered phenolic ligands: antibacterial activity and reduction of cytochrome c. Part III. Copper(II) complexes of cycloaminomethyl derivatives of o-diphenols. *Polyhedron*, 2013, vol. 57, pp. 39–46.

12. Ksendzova G. A., Ostrovskaya N. I., Semenкова G. N., Sorokin V. L., Shishkanova P. A., Shadyro O. I. Synthesis of 3,5-di-tert-butyl-1,2-dihydroxybenzene derivatives and their effect on free radical oxidation of hexane and oxygen activation ability of neutrophils. *Zhurnal obshchey khimii* [Journal of General Chemistry], 2019, vol. 89, no. 3, pp. 357–365 (In Russian).

13. *Bol'shoy spravochnik rezinshchika. V 2 chastyakh. Chast' 2. Kauchuki i ingrediyyenty* [Big reference book of a rubber production worker. In 2 parts. Part 2. Rubbers and ingredients]. Moscow, Tekhinform Publ., 2012. 735 p.

14. Ovcharov V. I., Burmistr M. V., Smirnov A. G., Tjutin V. A., Verbas V. V., Naumenko A. P. *Svoystva rezinovykh smesey i rezin: otsenka, regulirovaniye, stabilizatsiya* [Properties of rubber compounds and rubber: assessment, management, stabilization]. Moscow, SАНТ-ТМ Publ., 2001. 400 p.

15. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyayev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov: uchebnik dlya vuzov* [Elastomeric material technology: textbook]. Moscow, Istek Publ., 2009. 502 p.

16. Feduykin D. L., Makhlis F. A. *Tekhnicheskkiye i tekhnologicheskkiye svoystva rezin* [Technical and technological properties of rubbers]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.

17. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of materials based on elastomers]. Омск, Filial RosZITLP Publ., 2003. 276 p.

Информация об авторах

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

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

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

Шадыро Олег Иосифович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией химии свободнорадикальных процессов. Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, Республика Беларусь). E-mail: shadyro@tut.by

Ксендзова Галина Анатольевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии свободнорадикальных процессов. Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем» (220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 14, Республика Беларусь). E-mail: ksja-bn@tut.by

Information about the authors

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

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

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

Shadyro Oleg Iosifovich – DSc (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory of Chemistry of Free Radical Processes. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shadyro@tut.by

Ksendzova Galina Anatolievna – PhD (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Chemistry of Free Radical Processes. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ksja-bn@tut.by

Поступила 14.04.2021