

УДК 678.046.52

А. Ю. Люштык¹, С. Н. Каюшников¹, Е. Ю. Ипонова¹, М. С. Чилек¹, **С. С. Песецкий²**,
В. Н. Адериха², Ж. С. Шашок³, Е. П. Усс³

¹ОАО «Белшина»

²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

³Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ШИННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Изучена возможность применения коротких целлюлозных волокон типа Santoweb DX в составе протекторных резин с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Проведена оценка влияния содержания коротковолокнистых наполнителей на механические свойства протекторных резин в условиях статического и динамического нагружения. В резиновые смеси целлюлозные волокна вводили в виде предварительно полученного методом соэкструзии 50%-ного концентрата волокон в натуральном каучуке в дозировках от 1,5 до 15,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука. Установлено, что введение волокнистых наполнителей позволяет повысить твердость и модули протекторных резин при сравнительно малых значениях деформации при сохранении прочностных и эластических характеристик на уровне серийной резины. Определены приемлемые дозировки концентратов целлюлозных волокон, обеспечивающие оптимальное сочетание показателей эксплуатационных характеристик протекторных резин. Введение концентратов волокон в дозировках 4,5 и 6,0 мас. ч. улучшает сцепные характеристики резин, снижает их сопротивление качению.

Ключевые слова: эластомерная композиция, волокнистый наполнитель, протектор, модуль, тангенс угла механических потерь, прочность.

Для цитирования: Люштык А. Ю., Каюшников С. Н., Ипонова Е. Ю., Чилек М. С., **Песецкий С. С.**, Адериха В. Н., Шашок Ж. С., Усс Е. П. Влияние волокнистых наполнителей на свойства шинных эластомерных композиций // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 95–100.

A. Yu. Lyushtyk¹, S. N. Kayushnikov¹, A. Yu. Ipanava¹, M. S. Chylek¹, **S. S. Pesetskiy²**,
V. N. Aderikha², Zh. S. Shashok³, E. P. Uss³

¹JSC “Belshina”

²State Scientific Institution “Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems
named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus”

³Belarusian State Technological University

THE INFLUENCE OF FIBROUS FILLERS ON THE PROPERTIES OF TIRE ELASTOMER COMPOSITIONS

The possibility of using short cellulose fibers of the Santoweb DX type in the composition of tread rubbers in order to improve their operational characteristics has been studied. An assessment of the effect of the content of short-fiber fillers on the mechanical properties of protector rubbers under static and dynamic loading has been carried out. Cellulose fibers were introduced into rubber mixtures in the form of a 50% concentrate of fibers in natural rubber previously obtained by the method of coextrusion in dosages from 1.5 to 15.0 phr. It has been established that the introduction of fibrous fillers makes it possible to increase the hardness and modulus of tread rubbers at relatively low deformation values while maintaining the strength and elastic characteristics at the level of serial rubber. Acceptable dosages of cellulose fiber concentrates have been determined, which provide an optimal combination of performance indicators for tread rubbers. The introduction of fiber concentrates in dosages of 4.5 and 6.0 phr improves the adhesion characteristics of rubbers, reduces their rolling resistance.

Key words: elastomeric composition, fibrous filler, tread, modulus, tangent of mechanical loss, strength.

For citation: Lyushtyk A. Yu., Kayushnikov S. N., Ipanava A. Yu., Chylek M. S., **Pesetskiy S. S.**, Aderikha V. N., Shashok Zh. S., Uss E. P. The influence of fibrous fillers on the properties of tire elastomer compositions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 95–100 (In Russian).

Введение. Волокнистые наполнители – специфическая группа усиливающих наполнителей, отличительной чертой которых является их способность к ориентации в резинах с образованием резиноволокнистого композита с ориентированной макроструктурой и анизотропными свойствами, благодаря чему в одном материале можно получить сочетание жесткости и гибкости. Введение волокнистых наполнителей в резиновые смеси позволяет повысить прочностные показатели резин, их динамический модуль, сопротивление порезам и проколам, износостойкость, стойкость к действию агрессивных сред, снизить гистерезисные потери и др. [1–6].

Особый интерес представляет совместное применение дисперсных и волокнистых наполнителей в составе резиновых смесей, предназначенных для производства отдельных деталей шин, что позволяет увеличить ходимость шин [7–9]. Таким образом, разработка резиноволокнистых композитов, обеспечивающих улучшение комплекса свойств резиновых смесей и вулканизатов на их основе, решение проблемы переработки и использования волокнистых отходов, снижение себестоимости готовой продукции определяют актуальность данной работы.

Основная часть. Целью данной работы являлось исследование возможности применения коротких волокнистых наполнителей в составе протекторных резиновых смесей с целью улучшения эксплуатационных характеристик резин на их основе.

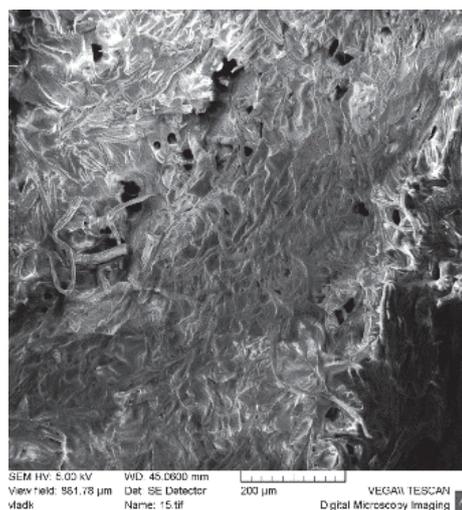
Объектами исследования являлись наполненные эластомерные композиции на основе каучуков общего назначения, предназначенные для производства протектора автомобильных шин. В качестве волокнистых наполнителей исследовались короткие целлюлозные волокна типа Santoweb DX. Для удобства дозирования волокон, улучшения их равномерного диспергирования в объеме эластомерной матрицы и увеличения адгезии между каучуком и волокном получали 50%-ные концентраты исследуемых волокон в натуральном каучуке (НК), которые изготавливали в государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (ИММС НАН Беларуси) при использовании двухшнекового экструдера при температуре 130°C.

Наиболее важными факторами, определяющими свойства вулканизатов, армированных короткими волокнами, являются их размер, соотношение длины к диаметру, сохранение этих размеров в процессе смешения, степень адгезии и содержание волокна в резиновой матрице [10]. Известно [1], что в наиболее ответственных резиноволокнистых композитах применяют

довольно низкие концентрации волокнистых наполнителей, что обеспечивает сохранение их базовых показателей с одновременным улучшением комплекса технологических и технических свойств материала. В связи с этим полученные концентраты вводили в протекторные резиновые смеси в дозировках от 1,5 до 15,0 мас. ч. на 100,0 мас. ч. каучука. Образцом сравнения являлась промышленная резиновая смесь без волокон.

Оценка степени диспергирования волокнистых наполнителей в объеме эластомерной матрицы производилась на основе микрофотографий поверхности криосколов образца натурального каучука с 50%-ным концентратом волокон Santoweb DX, полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN. Упруго-прочностные характеристики образцов определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 270–75. Твердость по Шору А вулканизатов измеряли в соответствии с ГОСТ 263–75. Методом динамического механического анализа (ДМА) на модуле DMA 8000 Perkin Elmer исследовали свойства образцов резин в зависимости от температуры, частоты и содержания волокон при воздействии периодических нагрузок в режиме сжатия.

Важным условием усиления короткими волокнами резин является обеспечение равномерного диспергирования волокнистого наполнителя в объеме эластомера. Электронные микрофотографии поверхности криосколов каучуковолокнистых композитов представлены на рисунке.



Микрофотографии поверхности криоскола образца 50%-ного концентрата волокон Santoweb DX в НК

Как видно из микрофотографий поперечных криосколов (рисунок), метод соэкструзии при выбранных технологических параметрах переработки позволяет обеспечить достаточно

равномерное диспергирование волокнистого наполнителя в объеме натурального каучука.

Методом динамического механического анализа определены зависимости изменения характеристик динамических механических свойств образцов протекторных резин от температуры и содержания волокон Santoweb DX в режиме сжатия синусоидальной нагрузкой с частотой 1 и 10 Гц. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показал, что с увеличением содержания волокнистого наполнителя в протекторной смеси динамический модуль сдвига при температуре -20°C изменяется по экстремальной зависимости с минимальным значением E' при дозировке концентрата наполнителя в резине, равной 7,5 мас. ч. Аналогичная зависимость выявлена и при температуре 30°C , однако экстремум наблюдается при меньшей (6,0 мас. ч.) концентрации наполнителя. Следует отметить, что при содержании волокнистых наполнителей свыше 10,0 мас. ч. независимо от температуры испытания значение динамического модуля практически не изменяется.

Выходные характеристики протекторных резин, влияющие на основные эксплуатационные показатели шин (потери на качение, сцепление с дорогой, износостойкость), определяются их упруго-гистерезисными свойствами, оцениваемыми в соответствующих диапазонах частот или температур. Так, для прогноза потерь на качение оценивают $\text{tg}\delta$ при температуре $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$. При этом чем ниже тангенс угла механических потерь, тем меньше сопротивление качению [1]. По результатам исследования определено, что при разных режимах нагружения значения тан-

генса потерь при температуре 60°C для резиноволокнистых композитов меньше, чем у образца сравнения. Наименьшими значениями $\text{tg}\delta$ характеризуются образцы с 6,0 мас. ч. наполнителя. В то же время сцепление шин с мокрой дорогой оценивают по значению тангенса потерь при 0°C . При этом чем выше $\text{tg}\delta$, тем выше сцепление, так как при низкой эластичности возрастает вязкостная составляющая модуля потерь и, соответственно, коэффициент трения резин [1]. Показано, что наиболее низкие значения тангенса потерь при 0°C (0,183 и 0,187) имеют образцы с 7,5 мас. ч. концентрата волокон в НК в зависимости от частоты нагружения, а у образца сравнения $\text{tg}\delta$ при 0°C составляет 0,194 и 0,192 при частоте 1 и 10 Гц соответственно. При остальных дозировках концентрата в протекторных резинах значения тангенса потерь при данной температуре находятся на уровне серийного образца. Тангенс потерь, определенный при -10°C , характеризует сцепление шины со льдом и снежной дорогой. В данном случае чем тангенс потерь выше, тем хуже сцепление, так как при таком высоком его значении и низкой температуре резины теряют эластичность и стеклуются [1]. Определено, что введение волокон Santoweb DX в виде 50%-ного концентрата в НК в дозировке 7,5 мас. ч. способствует снижению $\text{tg}\delta$ до 0,178–0,180 (у резины без волокон $\text{tg}\delta = 0,194\text{--}0,201$) в зависимости от частоты.

Установлено, что введение волокнистых наполнителей в различных дозировках практически не оказывает влияния на значение температуры стеклования резиноволокнистого композита, т. е. на его морозостойкость. В данном случае изменение температуры стеклования резин от содержания концентратов волокон не превышает $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1

Влияние содержания волокна Santoweb DX на динамический модуль сдвига при сжатии (E'), тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) и температуру стеклования (T_g) по данным ДМА

Показатель	$T, ^{\circ}\text{C}$	Частота, Гц	Содержание 50%-ного концентрата волокон Santoweb DX, мас. ч.							
			Образец сравнения	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	10,0	15,0
$E', \text{МПа}$	-20	1	32,8	36,2	31,4	30,7	26,4	25,7	34,4	34,4
		10	39,7	44,0	37,8	37,2	31,6	30,6	41,4	41,4
$E', \text{МПа}$	30	1	16,4	18,1	16,5	16,1	15,0	16,5	18,2	18,4
		10	19,0	20,8	19,0	18,4	17,2	18,0	21,0	21,1
$\text{tg}\delta$	-10	1	0,194	0,190	0,184	0,189	0,184	0,178	0,182	0,181
		10	0,201	0,196	0,196	0,198	0,192	0,180	0,186	0,187
$\text{tg}\delta$	0	1	0,194	0,193	0,192	0,198	0,196	0,187	0,194	0,190
		10	0,192	0,190	0,192	0,193	0,192	0,183	0,188	0,185
$\text{tg}\delta$	60	1	0,197	0,193	0,191	0,190	0,185	0,189	0,195	0,192
		10	0,187	0,186	0,182	0,183	0,179	0,181	0,185	0,182
T_g	-	1	-46,8	-49,3	-47,0	-46,3	-46,3	-45,8	-47,4	-47,7
		10	-40,8	-41,5	-41,8	-40,5	-41,4	-41,4	-40,8	-40,7

Таблица 2

Физико-механические показатели протекторных резин с волокнами Santoweb DX

Содержание 50%-ного концентрата волокон Santoweb DX, мас. ч.	Условное напряжение при удлинении, МПа			Относительное удлинение при разрыве, %	Условная прочность при растяжении, МПа	Твердость по Шору, ед. Шор А
	50%	100 %	300%			
Образец сравнения	1,4	2,7	10,3	585	24,2	68
1,5	1,5	2,8	11,0	550	23,4	70
3,0	1,5	2,9	10,5	555	22,9	70
4,5	1,6	2,8	10,7	565	23,6	70
6,0	1,7	2,9	10,9	550	22,6	71
7,5	1,8	3,1	11,7	490	21,0	70
10,0	2,0	3,3	11,9	480	20,6	72
15,0	2,2	2,8	12,7	390	17,0	74

Характер изменения упруго-гистерезисных характеристик резин, армированных коротковолокнистыми целлюлозными наполнителями, в зависимости от температурно-частотных режимов испытания может быть обусловлен межфазным взаимодействием волокон с эластомерной матрицей, а также направлением ориентации волокон.

Таким образом, анализ полученных зависимостей по данным ДМА позволил определить область концентраций волокнистого наполнителя в протекторной резине, равную $(6,0 \pm 1,5)$ мас. ч., при которой достигается оптимальное сочетание показателей эксплуатационных характеристик резин.

Результаты исследования влияния содержания целлюлозных волокон на показатели механических свойств резин приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что исследуемые волокнистые наполнители в определенных дозировках повышают твердость по Шору А и модули протекторных резин в интервале деформаций от 50 до 300%, причем в большей степени увеличение показателя наблюдается при сравнительно малых деформациях. Установлено, что при дозировках волокна 4,5–15,0 мас. ч. условное напряжение при 50%-ном удлинении опытных резин увеличивается в 1,2–1,6 раза. В то же время при больших значениях удлинения рост модуля (до 23,3%) отмечен только при содержании волокна свыше 7,5 мас. ч. Твердость по Шору А резин с содержанием целлюлозных волокон 10,0–15,0 мас. ч. увеличивается на 4–6 ед. Шор А по сравнению с серийным образцом.

Необходимо отметить, что увеличение содержания наполнителя в составе резин приводит к снижению (до 33,3%) их условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве.

Таким образом, анализ механических характеристик опытных резин показал, что применение коротких целлюлозных волокон в небольших дозировках позволяет повысить модули вулканизатов при удлинении 50% при сохранении на уровне контрольной резины значений прочности и относительного удлинения. Однако при содержании волокон свыше 7,5 мас. ч. несмотря на рост твердости по Шору А и модулей при 50, 100 и 300%-ных удлинениях происходит резкое снижение условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве, что может быть связано с большей дефектностью структуры резиноволокнистого композита.

Заключение. Проведенные исследования показали перспективность использования коротких целлюлозных волокон Santoweb DX в составе протекторных резиновых смесей. Установлено, что введение данных наполнителей в дозировке 4,5 и 6,0 мас. ч. в протекторные смеси позволяет улучшить ряд важнейших эксплуатационных характеристик шин. Применение коротких волокон в указанных дозировках обеспечивает повышение управляемости автомобиля на мокрой и заснеженной дорогах, снижение их сопротивление качению при сохранении прочностных и эластических характеристик на уровне серийной резины.

Список литературы

1. Гришин Б. С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных): монография. В 2-х ч. Ч. 1. Казань: КГТУ, 2010. 506 с.
2. Wu W. L., Li J. K. Study on carbon fiber reinforced chloroprene rubber composites // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1052. P. 254–257.
3. Moghe S. R. Mechanical properties of short-fiber-elastomer composites // *Rubber Chemistry and Technology*. 1976. No. 5. P. 1160–1166.
4. Agarwal K., Setua D. K., Mathur G. N. Short fibre and particulate-reinforced rubber composites // *Defence Science Journal*. 2002. Vol. 52, No. 3. P. 337–346.
5. Композиционные материалы, армированные волокнистыми наполнителями / Н. Е. Щеголева [и др.] // *Перспективные материалы*. 2014. № 8. С. 22–30.
6. Moghe S. R. Mechanical properties of short-fiber-elastomer composites // *Rubber Chemistry and Technology*. 1976. Vol. 49, No. 5. P. 1160–1166.
7. Дзюра Е. А., Серебро А. Л. Свойства и применение в пневматических шинах резин, армированных короткими отрезками волокон различной природы: темат. обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1978. 64 с. (Сер. «Производство шин»)
8. Datta R. N., Pierik S. C. J. Improving cut/chip/chunk resistance by using sulfron 3000 // *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*. 2007. Vol. 60, No. 6. P. 328–330.
9. Razzaghi-Kashani M. Aramid-short-fiber reinforced rubber as a tire tread composite // *Journal of Applied Polymer Science*. 2009. Vol. 113, No. 2. P. 1355–1363. DOI: 10.1002/app.30026.
10. Несиоловская Т. Н., Соловьев Е. М., Захаров Н. Д. Исследование влияния измельченных волокон на свойства резин, наполненных активным техуглеродом // *Производство шин, РТИ и АТИ*. 1983. № 6. С. 18–20.

References

1. Grishin B. S. *Materialy rezinovoy promyshlennosti (informatsionno-analiticheskaya baza dannykh)* [Materials of the rubber industry (information-analytical database)]. Kazan', KGTU Publ., 2010. 506 p.
2. Wu W. L., Li J. K. Study on carbon fiber reinforced chloroprene rubber composites. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1052, pp. 254–257.
3. Moghe S. R. Mechanical properties of short-fiber-elastomer composites. *Rubber Chemistry and Technology*, 1976, no. 5, pp. 1160–1166.
4. Agarwal K., Setua D. K., Mathur G. N. Short fibre and particulate-reinforced rubber composites. *Defence Science Journal*, 2002, vol. 52, no. 3, pp. 337–346.
5. Shchegoleva N. Ye., Grashchenkov D. V., Vaganova M. L., Solntsev S. S. Composite materials reinforced with fibrous fillers. *Perspektivnyye materialy* [Perspective materials], 2014, no. 8, pp. 22–30 (In Russian).
6. Moghe S. R. Mechanical properties of short-fiber-elastomer composites. *Rubber Chemistry and Technology*, 1976, vol. 49, no. 5, pp. 1160–1166.
7. Dzyura E. A., Serebro A. L. *Svoystva i primeneniye v pnevmaticheskikh shinakh rezin, armirovannykh korotkimi otrezkami volokon razlichnoy prirody* [Properties and application of rubbers reinforced with short lengths of fibers of various nature in pneumatic tires]. Moscow, TsNIITEneftekhim Publ., 1978. 64 p.
8. Datta R. N., Pierik S.C.J. Improving cut/chip/chunk resistance by using sulfron 3000. *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 2007, vol. 60, no. 6, pp. 328–330.
9. Razzaghi-Kashani M. Aramid-short-fiber reinforced Rubber as a tire tread composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 113, no. 2, pp. 1355–1363. DOI: 10.1002/app.30026.
10. Nesiolovskaya T. N., Soloviev E. M., Zakharov N. D. Investigation of the effect of crushed fibers on the properties of rubbers filled with active carbon black. *Proizvodstvo shin, RTI i ATI* [Tire production, RTI and ATI], 1983, no. 6, pp. 18–20 (In Russian).

Информация об авторах

Люштык Андрей Юрьевич – главный химик – начальник лаборатории. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: jб133xxxx@gmail.com

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

Ипонова Елена Юрьевна – инженер-технолог исследовательского сектора центральной заводской лаборатории инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: iponovaeyu@belshina.by

Чилек Марина Сергеевна – инженер-технолог исследовательского сектора центральной заводской лаборатории инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: chilekms@belshina.by

Песецкий Степан Степанович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Технология полимерных композитов». Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а, Республика Беларусь).

Адериха Владимир Николаевич – кандидат химических наук, доцент, заведующий сектором «Межфазные явления в полимерных композитах» отдела «Технология полимерных композитов». Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а, Республика Беларусь). E-mail: aderikha@mpri.org.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

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

Information about the authors

Lyushtyk Andrey Yur'evich – chief chemist – Head of laboratory. JSC “Belshina” (Minskoe shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

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

Ipanava Alena Yurievna – Engineer of R&D sector of Central Factory Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoe shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: ipanovaeyu@belshina.by

Chylek Maryna Sergeevna – Engineer of R&D sector of Central Factory Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoe shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: chilekms@belshina.by

Pesetskiy Stepan Stepanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Polymer Composites. Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova str., 246050, Gomel, Republic of Belarus).

Aderikha Vladimir Nikolayevich – PhD (Polymer Chemistry), Assistant Professor, Head of the Group “Interphase Phenomena in Polymer Composites”, Department of Polymer Composites. Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirova str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: aderikha@mpri.org.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

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

Поступила 11.11.2020