

УДК 678.033.2

Ж. С. Шашок¹, Н. Р. Прокопчук¹, Е. П. Усс¹, С. А. Жданок², А. В. Крауклис²¹Белорусский государственный технологический университет,²ООО «Перспективные исследования и технологии»**МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ**

Изучено влияние трех наноструктурных углеродных материалов: нефункциолизованного и функциолизованных амино- и кислородсодержащими группами на технологические свойства эластомерных композиций. В качестве объектов исследования использованы композиции на основе каучуков общего назначения СКИ-3 и СКИ-3 + СКД и каучуков специального назначения БНКС-18 и БНКС-18 + БНКС-28. Установлено, что применение наноструктурных углеродных материалов в составе промышленных эластомерных композиций на основе полярных каучуков БНКС-18 и комбинации БНКС-18 + БНКС-28 приводит к уменьшению (до 11,0–12,7%) вязкости по Муни резиновых смесей за счет улучшения диспергирования наполнителя. Определено, что изменение основных кинетических параметров вулканизации смесей при введении нанодобавок в основном обусловлено составом вулканизирующей системы, так как в случае применения эффективной вулканизирующей системы (композиции на основе БНКС-18) время достижения оптимума вулканизации увеличивается на 2,4–10,6%, а для композиции с полупрозрачной вулканизирующей системой (БНКС-18 + БНКС-28) оптимум вулканизации сокращается на 10,5–18,4%. В эластомерных композициях на основе каучуков общего назначения СКИ-3 и СКД также выявлено уменьшение (до 8,4–18,9%) вязкости по Муни резиновых смесей, значительное улучшение степени диспергирования наполнителя и сокращение (на 1,9–10,2%) времени достижения оптимальной степени вулканизации, но только при использовании нефункциолизованного наноматериала УНМ1. В то же время введение функциолизованных наноматериалов УНМ2 и УНМ3 в эластомерные композиции оказывает неоднозначное влияние на комплекс технологических свойств резиновых смесей на основе неполярных каучуков, что обусловлено дозировкой и природой нанодобавки.

Ключевые слова: углеродный наноматериал, эластомерная композиция, вязкость по Муни, комплексный динамический модуль, коэффициент релаксации, оптимальное время вулканизации.

Zh. S. Shashok¹, N. R. Prokopchuk¹, E. P. Uss¹, S.A. Zhdanok², A. V. Krauklis²¹Belarusian State Technological University³LLC “Advanced Research and Technology”**MODIFICATION OF PROPERTIES OF ELASTOMERIC COMPOSITIONS
BY CARBON NANOMATERIALS**

The effect of three nanostructured carbon materials of unfunctionalized and functionalized amino- and oxygen-containing groups on the technological properties of elastomeric compositions was studied. Compositions based on general purpose rubbers SRI-3 and SRI-3 + BR and rubbers of special purpose BNRS-18 and BNRS-18 + BNKS-28 were used as objects of study. It was found that the use of nanostructured carbon materials in industrial elastomeric compositions based on polar rubbers BNRS-18 and a combination of BNRS-18 + BNRS-28 leads to decrease (to 11.0–12.7%) of Mooney viscosity of rubber mixtures by improving the dispersion of the filler. It was determined that the change in the basic kinetic curing parameters of mixtures with introduction of nanoparticles is mainly due to the composition of the vulcanizing system, since in the case of using an effective vulcanizing system (composition based on BNRS-18), the time to reach the optimum of vulcanization increases by 2.4–10.6 %, and for composition with a semi-effective vulcanizing system (BNKS-18 + BNKS-28), the optimum vulcanization is reduced by 10.5–18.4%. In elastomeric compositions based on general purpose rubbers SRI-3 and BR, decrease (up to 8.4–18.9%) of the Mooney viscosity of rubber compounds, a significant improvement in the degree of dispersion of the filler, and a decrease (by 1.9–10.2%) were also revealed) time to reach the optimum degree of vulcanization, but only when using the unfunctionalized nanomaterial UNM1. At the same time, the introduction of functionalized nanomaterials UNM2 and UNM3 into elastomeric compositions has an ambiguous effect on the complex of technological properties of rubber compounds based on non-polar rubbers, which is due to the dosage and nature of the nanoparticle.

Key words: carbon nanomaterial, elastomeric composition, Mooney viscosity, complex dynamic modulus, relaxation coefficient, optimal vulcanization time.

Введение. Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения являются наноматериалы и нанотехнологии. Свойства наноматериалов в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят [1]. Расширение сферы применения изделий из полимерных материалов приводит к повышению требований к их качеству, что обуславливает интерес к разработкам, посвященным различным методам улучшения свойств исходного сырья и применению новых ингредиентов. К основным способам изменения свойств можно отнести: химическое модифицирование, которое может осуществляться как на стадии синтеза исходных компонентов, так и непосредственно в процессах их переработки, а также совершенствование составов. Наиболее эффективным является последнее направление, поскольку корректировка рецептуры позволяет без изменения конструкции и технологических режимов производства изделий достичь улучшения комплекса их технических характеристик. В общем случае теория нанокомпозитов предсказывает достижения значительных результатов в улучшении свойств при наполнении матрицы полимера небольшим количеством высокоактивного нанодисперсного компонента [2].

Синтезировать углеродные нанотрубки с поверхностными характеристиками, необходимыми для каждого конкретного применения (например, обладающие высоким сродством к полимерным матрицам в нанокомпозитах или хорошей биосовместимостью в сенсорных датчиках), довольно трудно, поэтому модификация боковых и концевых участков УНТ часто является необходимой манипуляцией при создании материалов с улучшенными поверхностными и объемными свойствами. Благодаря этому понижаются расходные нормы нанодобавок, необходимых для достижения требуемых эффектов, что делает их применение экономически оправданным, расширяет области коммерческого использования [3]. Функционализация является одним из способов модификации УНМ и заключается в стабилизации наночастиц во избежание вторичной агломерации, повышения уровня взаимодействия с компонентами резиновой смеси [4].

Основная часть. Целью данной работы являлось исследование влияния на технологические свойства эластомерных композиций трех различных наноматериалов: нефункционизированного и функционизированных амино- и кислородсодержащими группами.

В работе использовался высокодисперсный углеродный наноматериал (УНМ), полученный на предприятии «Перспективные исследования

и технологии» (г. Минск) (ТУ ВУ690654933.001-2011). Было опробовано три типа наноматериала. Первый (УНМ1) – материал, полученный непосредственно с установки, представляющий собой широкодисперсную смесь углеродных нанотрубок и нановолокон с примесями аморфного углерода, металлов и их окислов. Второй и третий материалы прошли специальную обработку (функционализацию) для прививки кислородсодержащих групп (УНМ2) и аминогрупп (УНМ3).

В качестве объектов исследований использовались эластомерные композиции на основе каучуков общего назначения СКИ-3 и СКИ-3 + СКД и каучуков специального назначения БНКС-18 и БНКС-18 + БНКС-28. Композиции различались составом вулканизирующей системы, типом и дозой наполнителя. Резиновая смесь на основе СКИ-3 содержала серную вулканизирующую систему и 25,0 мас. ч. малоактивного технического углерода марки N772. Эластомерная композиция на основе комбинации каучуков СКИ-3 + СКД также содержала серную вулканизирующую систему, а в качестве наполнителя использовался активный технический углерод N220 в дозировке 50,0 мас. ч. В качестве наполнителя резиновой смеси на основе БНКС-18 (с содержанием связанного нитрила акриловой кислоты (НАК) 17–20 % мас.) использовался малоактивный технический углерод марки N772. Для вулканизации данной смеси применяется эффективная вулканизирующая система, содержащая N, N'-дитиодиморфолин (2,0 мас. ч.) и тиурам Д (2,0 мас. ч.). В то же время для смеси на основе БНКС-18 + БНКС-28 используется полуэффективная вулканизирующая система, состоящая из серы (0,8 мас. ч.) и тиурама Д (1,2 мас. ч.), а в качестве наполнителя вводится комбинация активного технического углерода марки N220 (30,0 мас. ч.) и малоактивного марки N772 (85,0 мас. ч.).

Определение вязкости по Муни резиновых смесей и релаксации напряжения проводилось на сдвиговом дисковом вискозиметре MV2000 в соответствии с ГОСТ Р 54552-2011 [5]. Качественные характеристики распределения наполнителя в резиновой смеси определялись на основании расчета эффекта Пейна на приборе RPA 2000 в соответствии с ASTM D6601-02 [6]. Комплексный динамический модуль равен разности модуля эластичности и модуля сдвига и отображает качество распределения наполнителя в объеме эластомерной матрицы [7]. Исследование кинетики вулканизации проводилось на реометре ODR2000 согласно ГОСТ 12535-84 [8].

Применение в рецептуре эластомерных композиций новых высокодисперсных ингредиентов даже в небольших дозировках может оказывать влияние на технологические свойства резиновых

смесей, определяющие параметры их переработки. В таблице приведены результаты исследования технологических свойств резиновых смесей на основе каучуков общего и специального назначения, содержащих углеродные наноструктурные материалы.

Анализ полученных данных технологических свойств эластомерных композиций на основе БНКС-18 показал, что введение углеродных наноматериалов приводит к уменьшению (на 1,6–11,0%) показателя вязкости по Муни резиновых смесей. При этом наиболее существенное снижение вязкости выявлено при использовании в составе смесей УНМ1. Уменьшение вязкости по Муни резиновых смесей может быть обусловлено улучшением диспергирования значительного количества малоактивного технического углерода N772, о чем свидетельствуют результаты испытаний по определению комплексного динамического модуля. Так, показатель G'

для композиции без добавки равен 267,0 кПа, а для композиций с наноматериалами находится в пределах 199,3–242,1 кПа. В то же время определение коэффициента релаксации напряжения резиновых смесей показало, что использование нанодобавок не приводит к ускорению скорости протекания релаксационных процессов в объеме эластомерной матрицы, поскольку значение K_p для композиции без добавки равно 58,1%, а для композиций с углеродными наноматериалами изменяется в интервале от 57,9% до 58,4%.

Определение кинетических параметров вулканизации резиновых смесей выявило, что введение углеродных нанодобавок приводит к некоторому увеличению (на 2,4–10,6%) времени достижения оптимальной степени вулканизации и снижению скорости вулканизации (на 5,6–14%), что может потребовать в производственных условиях корректировки рецептуры резиновых смесей или технологических параметров вулканизации.

Технологические свойства промышленных резиновых смесей с углеродными наноструктурными материалами

| Эластомерная композиция | Наименование добавки | Дозировка добавки, мас. ч. | ML, усл. ед. Муни | G' , кПа | K_p , % | t_{90} , мин | Rh , дН·м/мин | |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|------------|-----------|----------------|-----------------|------|
| БНКС-18 | Без добавки | – | 57,3 | 267,0 | 58,1 | 8,5 | 10,7 | |
| | | УНМ1 | 0,1 | 51,0 | 199,3 | 58,0 | 9,0 | 9,9 |
| | УНМ2 | 0,2 | 53,9 | 211,1 | 57,9 | 9,1 | 10,1 | |
| | | 0,1 | 55,1 | 223,2 | 57,9 | 8,7 | 10,0 | |
| | УНМ3 | 0,2 | 55,7 | 242,0 | 58,4 | 9,0 | 9,8 | |
| | | 0,1 | 54,8 | 241,4 | 58,2 | 9,4 | 9,2 | |
| | | 0,2 | 56,4 | 242,1 | 58,2 | 9,2 | 9,9 | |
| | БНКС-18 + + БНКС-28 | Без добавки | – | 90,7 | 1123,0 | 53,5 | 7,6 | 8,7 |
| | | | УНМ1 | 0,1 | 79,2 | 823,3 | 55,8 | 6,8 |
| УНМ2 | | 0,2 | 81,7 | 886,6 | 54,6 | 6,2 | 11,3 | |
| | | 0,1 | 81,1 | 913,9 | 55,1 | 6,5 | 10,3 | |
| УНМ3 | | 0,2 | 81,2 | 1052,9 | 54,9 | 6,3 | 9,9 | |
| | | 0,1 | 80,6 | 903,9 | 55,3 | 6,7 | 10,6 | |
| | | 0,2 | 81,8 | 929,9 | 55,9 | 6,6 | 10,8 | |
| СКИ-3 | | Без добавки | – | 47,1 | 87,0 | 42,7 | 15,7 | 10,1 |
| | | | УНМ1 | 0,1 | 38,2 | 68,8 | 49,5 | 15,4 |
| | УНМ2 | 0,2 | 39,7 | 66,3 | 50,9 | 16,1 | 9,2 | |
| | | 0,1 | 44,0 | 80,4 | 45,2 | 16,8 | 8,7 | |
| | УНМ3 | 0,2 | 39,8 | 67,1 | 48,7 | 16,1 | 9,2 | |
| | | 0,1 | 40,9 | 74,5 | 47,9 | 15,2 | 11,2 | |
| | | 0,2 | 40,5 | 76,1 | 50,6 | 16,7 | 8,2 | |
| | СКИ-3 + СКД | Без добавки | – | 46,3 | 658,3 | 64,2 | 20,6 | 7,6 |
| | | | УНМ1 | 0,1 | 42,4 | 593,2 | 65,4 | 18,5 |
| УНМ2 | | 0,2 | 44,0 | 580,9 | 64,8 | 18,9 | 8,3 | |
| | | 0,1 | 45,5 | 635,7 | 64,0 | 18,8 | 7,9 | |
| УНМ3 | | 0,2 | 46,6 | 641,0 | 63,8 | 18,9 | 8,0 | |
| | | 0,1 | 46,4 | 642,8 | 64,8 | 19,0 | 7,7 | |
| | | 0,2 | 49,0 | 678,0 | 62,8 | 19,4 | 7,8 | |

Примечание. ML – вязкость по Муни, усл. ед. Муни.; K_p – коэффициент релаксации напряжений резиновой смеси, %; G' – комплексный динамический модуль, кПа; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; Rh – скорость вулканизации, дН·м/мин.

Таким образом, результаты исследований показали, что введение углеродных наноструктурных материалов в эластомерную композицию на основе полярного каучука БНКС-18 с высоким наполнением малоактивным техническим углеродом и эффективной вулканизирующей системой приводит к уменьшению вязкости по Муни резиновых смесей за счет улучшения распределения наполнителя в каучуке, практически не влияет на релаксационные процессы в полимерной матрице и несколько замедляет процесс структурирования вулканизатов.

Применение в составе эластомерных композиций на основе БНКС-18 + БНКС-28 высокодисперсных добавок также приводит к снижению (на 9,8–12,7%) вязкости по Муни резиновых смесей за счет улучшения диспергирования технического углерода (G' равно 1123,0 кПа для композиции без добавки и 823,3–152,9 кПа для композиций с наноматериалами) и незначительного ускорения релаксационных процессов в объеме каучука (K_p для композиции без добавки составляет 53,5%, а для композиций с наноматериалами – 54,6–55,9%). В данном случае установлено сокращение (на 10,5–18,4%) времени достижения оптимальной степени вулканизации и повышение (на 8,4–29,9%) скорости вулканизации. Не выявлено существенных различий в изменении технологических свойств резиновых смесей при введении нефункциолированного и функциолированного наноматериалов. Установлено, что введение углеродных наноструктурных материалов в эластомерную композицию на основе комбинации полярных каучуков БНКС-18 + БНКС-28 с высоким наполнением комбинацией активного N220 и малоактивного N772 технического углерода и полуживой вулканизирующей системой приводит к уменьшению вязкости по Муни резиновых смесей за счет улучшения распределения наполнителя в каучуке, ускоряет протекание релаксационных процессов в эластомерной матрице и сокращает время вулканизации.

По результатам исследования резиновых смесей на основе СКИ-3 установлено, что введение углеродного наноматериала в состав данной эластомерной композиции приводит к снижению (6,6–18,9%) вязкости по Муни резиновых смесей. В данном случае наименьшие значения вязкости смеси определены при введении УНМ1. Выявлено, что при использовании в составе эластомерных композиций высокодисперсных углеродных материалов улучшается равномерность распределения наполнителя в эластомере (для композиции без добавки G' равно 87,0 кПа, а с наноматериалами 66,3–76,1 кПа), а также скорость протекания релаксационных процессов (K_p для композиции без добавки

составляет 52,7%, а для композиций с наноматериалами – 45,2–50,9%). Анализ кинетики вулканизации резиновых смесей показал, что только применение УНМ1 и УНМ3 в дозировке 0,1 мас. ч. позволяет несколько сократить (на 1,9–3,2%) время достижения оптимальной степени вулканизации (введение УНМ2 и других дозировок УНМ1 и УНМ3 увеличивает t_{90} на 1,9–7,0%). Таким образом, определено, что применение углеродных наноматериалов в составе композиции на основе высоконасыщенного неполярного каучука СКИ-3 с невысокой степенью наполнения малоактивным техническим углеродом N772 и серной вулканизирующей системой приводит к уменьшению вязкости по Муни резиновых смесей, улучшению распределения техуглерода в смеси, повышению скорости протекания релаксационных процессов в объеме смеси и оказывает благоприятное влияние на кинетику вулканизации только при введении 0,1 мас. ч. нефункциолированного наноматериала УНМ1 и функциолированного аминоклассами наноматериала УНМ3.

Результаты исследований технологических свойств резиновых смесей на основе комбинации неполярных стереорегулярных каучуков СКИ-3 + СКД показали, что введение в их состав наноструктурных углеродных материалов приводит к уменьшению (на 1,7–8,4%) вязкости по Муни резиновой смеси только при использовании УНМ1 и УНМ2 в дозировке 0,1 мас. ч. В случае введения УНМ2 в количестве 0,2 мас. ч. и УНМ3 показатель вязкости практически не изменяется или увеличивается на 5,8%. Наименьшие значения комплексного динамического модуля также выявлены для композиций с УНМ1 (G' равно 580,9–593,2 кПа, а для композиции без добавки – 658,3 кПа). В то же время не найдено существенных изменений скорости протекания релаксационных процессов в объеме смеси при введении различных типов наноматериалов (K_p для композиций с УНМ – 62,8–64,8%, а для композиции без добавки – 64,2%). Установлено, что применение углеродных нанодобавок позволяет сократить на 5,8–10,2% время достижения оптимума вулканизации при незначительном изменении скорости вулканизации. В результате определения технологических свойств смесей на основе комбинации каучуков общего назначения СКИ-3 + СКД с высоким наполнением активным техническим углеродом марки N220 и серной вулканизирующей системой выявлено, что природа углеродной нанодобавки оказывает влияние на пластозластические свойства резиновых смесей и кинетические параметры вулканизации, при этом наилучшим комплексом свойств характеризуются эластомерные композиции с нефункциолированным наноматериалом УНМ1.

Выводы. Таким образом, результаты исследований технологических свойств производственных эластомерных композиций показали, что введение определенных типов и дозировок углеродных наноматериалов позволяет снизить вязкость по Муни резиновых смесей за счет облегчения ориентации молекулярных клубков макромолекул, агломератов и агрегатов технического углерода в направлении деформации, оказывая тем самым благоприятное влияние на процесс формования смесей при изготовлении заготовок и в начальный период вулканизации при заполнении смесью объема пресс-формы. Определено, что наличие наноматериалов в эластомерной композиции способствует получению резиновых смесей с более равномерным распределением наполнителей в объеме каучука, о чем свидетельствует уменьшение показателей комплексного динамического модуля по сравнению с композицией без добавки. Установлено,

что применение углеродных нанодобавок в резиновых смесях оказывает влияние на их кинетику вулканизации, ускоряя или замедляя процесс формирования поперечных связей, что связано со способностью наноматериалов адсорбировать на своей поверхности ускорители вулканизации и серу, или же с взаимодействием функциональных групп поверхности наноматериалов непосредственно с компонентами вулканизирующей системы. При этом определяющим фактором характера изменения основных технологических параметров процесса структурирования композиций с наноматериалом является состав вулканизирующей системы.

Уменьшение показателей вязкости по Муни резиновых смесей и сокращение времени достижения оптимальной степени вулканизации будет способствовать снижению энергетических затрат при переработке, профилировании и вулканизации эластомерных композиций.

Литература

1. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Б. М. Балоян [и др.]. М.: Международный ун-т природы, общества и человека «Дубна», филиал «Угреша», 2007. 124 с.
2. Шашок Ж. С., Прокопчук Н. Р. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях: монография. Минск: БГТУ, 2014. 232 с.
3. Дьячкова Т. П., Ткачев А. Г. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 152 с.
4. Бадамшина Э. Р., Гафурова М. П. Модификация свойств полимеров путем допирования фуллереном C60 // Высокомолекулярные соединения. 2008. Т. 50, № 8. С. 1572–1584.
5. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552-2011. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.
6. Standard Test Method for Rubber Properties—Measurement of Cure and After-Cure Dynamic Properties Using a Rotorless Shear Rheometer: ASTM D6601–02 (2008).
7. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 420 с.
8. Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре: ГОСТ 12535-84. Введ. 01.06.86. М.: Изд-во стандартов, 1985. 33 с.

References

1. Baloyan B. M., Kolmakov A. G., Alymov M. I., Krotov A. M. *Nanomaterialy. Klassifikatsiya, osobennosti svoystv, primeneniye i tekhnologii polucheniya* [Nanomaterials. Classification, features of properties, application and production technologies]. Moscow, Mezhdunarodnyy universitet prirody, obshchestva i cheloveka “Dubna”, filial “Ugresha” Publ., 2007. 124 p.
2. Shashok Zh. S., Prokopchuk N. R. *Primeneniye uglerodnykh nanomaterialov v polimernykh kompozitsiyakh* [Use of carbon nanomaterials in polymer compositions]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 232 p.
3. Dyachkova T. P., Tkachev A. G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes]. Moscow, Izdatel'skiy dom “Spektr” Publ., 2013. 152 p.
4. Badamshina E. R., Gafurova M. P. Modification of the properties of polymers by doping with C60 fullerene. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High-molecular compounds], 2008, vol. 50, no. 8, pp. 1572–1584 (In Russian).
5. GOST R 54552-2011. Rubbers and rubber compounds. Determination of viscosity, stress relaxation and scorch characteristics using a Mooney viscometer. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).
6. Standard Test Method for Rubber Properties—Measurement of Cure and After-Cure Dynamic Properties Using a Rotorless Shear Rheometer: ASTM D6601–02 (2008).

7. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of reinforcing elastomers. Status and development directions]. Kazan', KNITU Publ., 2016. 420 p.

8. GOST 12535-84. Rubber compounds. Method for determining vulcanization characteristics on a vulcanometer: Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1985. 33 p. (In Russian).

Информация об авторах

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

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

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

Жданок Виталий Александрович – главный инженер. ООО «Перспективные исследования и технологии» (223058, Минская обл., Минский р-н, д. Лесковка, ул. Совхозная, д. 1, к. 4., Республика Беларусь). E-mail: zhd1606@mail.ru

Крауклис Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией коллоидных систем. ООО «Перспективные исследования и технологии» (223058, Минская обл., Минский р-н, д. Лесковка, ул. Совхозная, д. 1, к. 4, Республика Беларусь). E-mail: avkrauklis@gmail.com

Information about the authors

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

Prokopchuk Nikolai Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

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

Zhdanok Vitaliy Aleksandrovich – Chief Engineer. LLD “Advanced Research and Technology” (1, building 4, Sovkhoznaya str., Leskovka, 223058, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: zhd1606@mail.ru

Krauklis Andrey Vladimirovich – PhD (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Colloidal Systems. LLD “Advanced Research and Technology” (1, building 4, Sovkhoznaya str., Leskovka, 223058, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus). Email: avkrauklis@gmail.com

Поступила 11.11.2019