

Свойства эластомерных композиций, наполненных измельченным вулканизатом

Андрей В. Касперович¹ andkasp@belstu.by
Вадим В. Мяделец¹ myadelets@belstu.by
Анастасия С. Казакова² kastpp@inbox.ru

¹ Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, Минск, 220006, Республика Беларусь

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Утилизация резиновых отходов и повышение эффективности применения вторичных эластомерных материалов является важной технико-экономической задачей. Вулканизованные резиновые отходы наиболее трудно поддаются переработке. Одним из перспективных способов утилизации вулканизованных резиновых отходов является их измельчение и последующее применение полученных порошков в качестве наполнителя эластомерных композиций. В работе изучено влияние природы измельченного вулканизата (ИВ) на свойства эластомерных композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука. Для исследований использованы ИВ двух типов: шинный – на основе неполярных каучуков общего назначения; из отходов производства резинотехнических изделий (РТИ) – на основе полярного бутадиен-нитрильного каучука. Размер частиц фракции ИВ, применяемого в работе, составлял 0,63–1,00 мм. ИВ вводился в ненаполненную модельную смесь на основе бутадиен-нитрильного каучука в дозировках 50, 100, 150 и 200 масс. ч. Установлено, что вязкость по Муни исследуемых эластомерных композиций возрастает в большей степени при использовании в качестве наполнителя ИВ из облоя РТИ, чем при использовании шинного. Скорость релаксации напряжений в невулканизованных композициях не зависит от природы ИВ. Проведены исследования кинетики вулканизации экспериментальных композиций. Время достижения оптимальной степени вулканизации у композиций, содержащих ИВ на основе полярного каучука, меньше, чем на основе каучуков общего назначения. Исследовано влияние природы и дозировки измельченного вулканизата на структуру вулканизационной сетки. С увеличением дозировки ИВ происходит уменьшение плотности поперечного сшивания вулканизатов. При использовании в качестве эластичного наполнителя ИВ, полученного из облоя РТИ, вулканизаты обладают более высокой плотностью сшивки, чем содержащие шинный ИВ.

Ключевые слова: измельченный вулканизат, бутадиен-нитрильный каучук, эластомерная композиция, вязкость, вулканизация, релаксация, вулканизационная сетка

Properties of elastomeric composition filled with ground vulcanizate

Andrei V. Kasperovich¹ andkasp@belstu.by
Vadim V. Myadelets¹ myadelets@belstu.by
Anastasia S. Kazakova² kastpp@inbox.ru

¹ Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Belarus)

² Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. Recycling rubber waste and improving of the efficiency of the secondary elastomeric materials use is an important technical and economic challenge. Vulcanized rubber waste is the most difficult to recycle. One of the promising ways of recycling waste vulcanized rubber is their grinding and subsequent use of the obtained powder as a filler in elastomeric compositions. The influence of the nature of ground vulcanizate (GV) on the properties of elastomeric compositions based on nitrile-butadiene rubber is studied in the paper. GV of two types are used for the investigation. The first type is tire based on non-polar rubbers of general purpose. The second type is obtained from wastes of production of industrial rubber article (IRA) based on polar nitrile-butadiene rubber. Particle size of GV's fraction used in study is 0.63–1.00 mm. GV was input in unfilled model composition based on nitrile-butadiene rubber in dosages 50, 100, 150 and 200 phr. It is found that Mooney viscosity of the elastomeric compositions filled with GV of IRA wastes increases more than using the tire GV. The rate of stress relaxation in the uncured compositions are not depend on the nature of GV. The cure optimum of the composition containing GV-based on polar rubber smaller than GV based on general purpose rubbers is used. The influence of the ground rubber type and dosage on the cure network structure are investigated. the density of cross-linking of the vulcanizates decreases with increasing dosage GV. Vulcanizates filled with GV derived from IRA have higher cross-linking density than those containing tire GV.

Keywords: ground vulcanizate, nitrile rubber, elastomeric composition, viscosity, curing, relaxation, cure network

Введение

Эффективное использование вторичных полимерных материалов является важной технико-экономической и экологической проблемой. В отдельный класс полимерных отходов выделяют вулканизованные резиновые отходы (изношенные шины, отходы производства и т. д.), т. к. этот тип полимерных отходов особенно трудно

подвергается переработке [1]. Это связано с наличием трехмерной пространственной сетки, которая придает резинам высокоэластические свойства, а также стойкость к действию большинства растворителей. В связи с этим глубокая переработка и получение вторичных материалов из некачественных или вышедших из эксплуатации резинотехнических изделий, а также вулканизованных отходов их производства требует

Для цитирования

Касперович А. В., Мяделец В. В., Казакова А. С. Свойства эластомерных композиций, наполненных измельченным вулканизатом // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2. С. 170-175. doi:10.20914/2310-1202-2017-2-170-175

For citation

Kasperovich A. V., Myadelets V. V., Kazakova A. S. Properties of elastomeric composition filled with ground vulcanizate. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 2. pp. 170–175. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-2-170-175

применения специальных технологий и, соответственно, финансовых затрат. В настоящее время не выработано однозначного подхода к методу утилизации этого класса отходов [1]. Различные авторы [2–5] приводят преимущества регенерации, пиролиза, поверхностной девулканизации и других методов переработки. Наиболее полно структура резин сохраняется при механическом измельчении [1, 4], также этот метод не требует применения растворителей и агрессивных сред, повышенных температур и избыточного давления. Этот метод является более эффективным с экономической точки зрения, т. к. для большинства других способов переработки резин на начальной стадии технологического процесса требуется проводить измельчение резиновых отходов.

Основным источником вторичной резины являются изношенные шины, запасы которых во всем мире оцениваются миллионами тонн [2]. Сегодня шинные измельченные вулканизаты нашли широкое применение только при изготовлении различных неотчетственных изделий, таких как железнодорожные переезды, напольные покрытия и сельскохозяйственные плиты, а также в качестве материала для покрытий спортивных площадок, кровельных материалов и т. п. [1, 2].

Различными авторами проводились исследования влияния дисперсных вторичных резин на технологические и вулканизационные свойства эластомерных композиций на основе натурального [6, 7], бутадиен-стирольного [8] и этилен-пропиленового каучуков [9]. В этих работах показано существенное влияние дозировки, способа предварительной обработки и характеристик измельченного вулканизата, а также типа и дозировки компонентов вулканизирующей группы на время достижения оптимальной степени вулканизации, время начала вулканизации и скорость процесса, а также физико-механические свойства эластомерных композиций. В качестве объекта в этих работах использовались композиции, наполненные шинным измельченным вулканизатом.

Известно [1, 2], что наилучшая совместимость между частицами вторичной резины и эластомерной матрицей наблюдается при одинаковом (или близком) химическом строении каучуков, которые используются в качестве основы измельченного вулканизата (ИВ) и резиновой смеси, в которую он вводится. При этом в литературе отсутствуют систематические исследования по сравнению влияния измельченных вулканизатов, полученных из различных источников на свойства эластомерных композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука.

Основная часть

Цель работы – исследовать влияние природы и дозировки измельченного вулканизата на технологические свойства эластомерных композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНК).

В качестве объектов исследования использовались измельченные вулканизаты различной природы: шинный ИВ на основе неполярных ненасыщенных каучуков общего назначения (ИВ-Ш), а также ИВ из облоя, образующегося при производстве РТИ, на основе полярного бутадиен-нитрильного каучука (ИВ-РТИ). Измельченные вулканизаты были получены на вальцах. Размер частиц фракции ИВ, применяемой в работе, составлял 0,63–1,00 мм. ИВ вводился в ненаполненную модельную смесь на основе БНК в дозировках 50, 100, 150 и 200 масс. ч. Эластомерные композиции изготавливались на лабораторных смесительных вальцах RC-WW 150/330 (Rubicon, Германия). Рецепт модельной эластомерной композиции приведена в таблице 1.

Для оценки взаимодействия измельченного вулканизата с несшитой эластомерной матрицей на вискозиметре Муни MV2000 (ф. Alpha Technologies, США) были проведены испытания по определению вязкости резиновых смесей. Также были проведены испытания по определению релаксации напряжений в невулканизированной эластомерной композиции.

Таблица 1.

Рецептура модельной эластомерной композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука

Table 1.

The formulation of the model elastomer composition based on NBR

Ингредиент Ingredient	Дозировка, масс. ч. Dosage, phr
БНКС-18А BNRS-18A	100,0
Оксид цинка Zinc Oxyde	3,0
Сера Sulfur	1,5
Стеариновая кислота Stearic acid	1,0
TBBS	0,7
Итого Total	106,2

Определение релаксационных характеристик эластомеров на вискозиметре Муни осуществляется за счет мгновенной остановки ротора после окончания опыта по определению вязкости по Муни, при этом продолжается запись величины крутящего момента (вязкости по Муни). При этом наблюдается постепенное снижение крутящего момента. Математически, это падение по степенному закону описывается уравнением (1):

$$M = k \cdot t^{-\alpha} \quad (1)$$

На основании полученных данных был рассчитан коэффициент релаксации (K_p) по уравнению (2):

$$K_p = \frac{k}{M_L(1+4)} \cdot 100\% \quad (2)$$

Тангенс угла наклона касательной к графику релаксации через 1 с после остановки ротора ($tg \alpha'$) или наклон кривой релаксации в логарифмических координатах (α), является мерой скорости релаксации. Для более точной характеристики релаксационных свойств используется также величина площади под кривой релаксации A .

Площадь под кривой релаксации A в интервале от $t = 1$ с до конечного времени $t_k = 60$ с рассчитывается как интеграл по уравнению (3):

$$A = \int M dt = k \int t^\alpha dt = k \cdot \frac{t_k^{\alpha+1} - 1}{\alpha + 1} \quad (3)$$

Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты исследования вязкости по Муни и релаксации напряжений невулканизованных эластомерных композиций

Table 2.

The results of the study in the Mooney viscosity and stress relaxation of uncured elastomer compositions

Дозировка ИВ, масс. ч. IV dosage, phr	Вязкость по Муни, усл. ед. Mooney viscosity, units	$tg \alpha'$	$K_p, \% C_r, \%$	$A, усл. ед. A, units$
–	66,0	-0,330	57,9	856,2
ИВ-Ш IV-SH				
50	78,5	-0,362	56,1	908,3
100	93,8	-0,351	56,4	1114,5
150	103,1	-0,343	56,7	1267,7
200	106,8	-0,342	6,9	1320,9
ИВ-РТИ IV-RTI				
50	87,3	-0,365	54,8	979,3
100	102,5	-0,356	55,4	1190,5
150	118,9	-0,335	55,8	1469,0
200	128,8	-0,330	55,9	1613,8

Примечание: $tg \alpha'$ – тангенс угла наклона кривой релаксации; K_p – коэффициент релаксации

Для всех исследуемых композиций с увеличением дозировки измельченного вулканизата возрастает показатель вязкости по Муни. При этом в большей степени вязкость увеличивается при использовании ИВ на основе облоя РТИ. Так, при дозировке 50 масс. ч. для композиции наполненной ИВ-Ш этот показатель составляет 78,5 усл. ед. Муни, что на 11,2% ниже, чем для композиции с ИВ-РТИ, вязкость которой 87,3 усл. ед.; при дозировке 200 масс. ч. вязкость на 20,6% выше у смеси, содержащей полярный ИВ-РТИ, чем неполярный ИВ-Ш.

Из полученных данных видно, что тип измельченного вулканизата не оказывает значительного влияния на скорость релаксационных процессов в невулканизованной эластомерной матрице. Так, различия в значениях показателя скорости релаксации для смесей содержащих полярный и неполярный ИВ составляет 0,8–3,6%.

Следует отметить, что коэффициент релаксации K_p зависит от природы применяемого ИВ. Для композиций, содержащих ИВ на основе облоя РТИ, релаксация напряжений несколько затруднена, что подтверждается меньшим значением коэффициентов релаксации в сравнении с резиновыми смесями, которые наполнены ИВ-Ш. При этом с увеличением дозировки ИВ, независимо от его природы, K_p незначительно увеличивается.

Площадь A , ограниченная кривой релаксации увеличивается с ростом дозировки ИВ. При этом для композиций, содержащих ИВ из облоя РТИ, этот показатель выше, чем для наполненных шинным ИВ. Так, для композиции без добавок показатель A составляет 856,2 усл. ед., при дозировке 50 масс. ч. для шинного ИВ – 908,2 усл. ед., для ИВ из облоя РТИ – 979,3 усл. ед., что на 6,1% и на 14,4% соответственно выше, чем у исходной смеси. Разность между величиной площади под кривой релаксации A для композиции, содержащей ИВ из облоя РТИ и шинный ИВ, для этой дозировки составляет 71,0 усл. ед. или 7,8%. При дозировке ИВ 200 масс. ч. различия между показателями A в зависимости от типа ИВ еще более значительные. Так, для шинного ИВ этот показатель равен 1321,0 усл. ед., а для ИВ из облоя РТИ – 1913,8 усл. ед., разность между значениями составляет 292,8 усл. ед. или 22,2%.

Из результатов исследований видно, что эластические свойства композиций наполненных ИВ-РТИ выше, чем при использовании ИВ-Ш, что следует учесть при их переработке. Вероятно, применение в качестве наполнителя исследуемых композиций ИВ-РТИ приводит к затруднению молекулярных перестроений эластомерной основы в сравнении с ИВ-Ш, что выражается в большей вязкости по Муни, а также в замедлении релаксации напряжений в невулканизованных композициях [10].

Вулканизация является важнейшим технологическим процессом при производстве изделий из эластомеров. В ходе вулканизации образуется трехмерная пространственная сетка, которая обуславливает уникальные свойства резин как конструкционных материалов. Для исследования влияния природы и дозировки ИВ на процесс формирования пространственной сетки были проведены исследования кинетики процесса вулканизации. Испытания проводились

на реометре ODR 2000 (Alpha Technologies, США). Результаты исследований приведены в таблице 3.

Установлено, что с увеличением дозировки шинного измельченного вулканизата, время достижения оптимальной степени вулканизации практически не изменяется и меньше чем у образца сравнения на 43,5–45,2%.

Таблица 3.

Результаты исследования кинетики вулканизации (153 °С·45 мин) и плотности поперечного сшивания

Table 3.

The kinetics of vulcanization (153 °С·45 min) and the cross-linking density

Дозировка ИВ, масс. ч. IV dosage, phr	t_{90} , мин t_{90} , min	ΔM , дН·м ΔM , dN·m	$\nu \cdot 10^4$, моль/см ³ $\nu \cdot 10^4$, mole / sm ³
Без ИВ Without IV	20,26	18,20	0,561
Шинный ИВ Type IV			
50	11,29	13,07	0,224
100	11,28	10,22	0,139
150	11,45	9,65	0,123
200	11,10	9,92	0,084
ИВ из облоя РТИ IV from pressing wastes			
50	6,13	17,24	0,285
100	6,72	16,36	0,216
150	6,85	14,63	0,175
200	6,24	13,70	0,142

Примечание: t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации; R_h – скорость вулканизации; ΔM – разность максимального и минимального крутящих моментов

Для композиций, содержащих ИВ из облоя РТИ этот показатель имеет значения меньше, чем у образца сравнения на 66,2–69,7%. Разность максимального и минимального крутящего момента ΔM уменьшается в сравнении с композицией без добавок, как в случае ИВ-Ш, так и в случае ИВ-РТИ. Следует отметить, что при использовании в качестве наполнителя эластомерной композиции ИВ-РТИ этот показатель на 31,9–38,1% выше, чем для композиций, содержащих ИВ-Ш.

Для исследования структуры пространственной сетки методом равновесного набухания была определена плотность поперечного сшивания исследуемых вулканизатов (таблица 3). Установлено, что все вулканизаты с ИВ в составе имеют более низкую плотность сшивки, чем модельная композиция без добавок. Так, при введении 50 масс. ч. ИВ-РТИ этот показатель выше, чем при использовании шинного ИВ на 27,2%; при дозировке 200 масс. ч. – на 69,1. Как следует из полученных данных, применение в качестве наполнителя измельченного вулканизата на основе облоя РТИ позволяет получать пространственную сетку с более высокой плотностью сшивки, в сравнении с резинами, которые наполнены ИВ-Ш.

Увеличение скорости процесса вулканизации может быть связано с наличием непрореагировавших компонентов вулканизирующей системы (ускорителей и активаторов), которые находились в ИВ и диффундировали в эластомерную матрицу [7, 11]. Снижение плотности поперечного сшивания, вероятно, связано с диффузией серы из эластомерной матрицы в ИВ [11], а также уменьшением содержания каучука в вулканизуемом образце, что приводит к снижению эффективного объема, в котором протекает процесс вулканизации значительно уменьшается с увеличением дозировки ИВ [12]. В связи с тем, что растворимость и диффузия серы в бутадиен-нитрильном каучуке меньше, чем в каучуках, которые используются для изготовления шин (натуральный, синтетический изопреновый и бутадиенстирольный) [13], можно предположить, что в случае применения ИВ-Ш из эластомерной матрицы в измельченный вулканизат переходит большее ее количество, чем при использовании ИВ-РТИ. Это может объяснить меньшие значения плотности поперечного сшивания для вулканизатов, которые наполнены ИВ-Ш.

Заключение

Установлено, что уже на стадии получения невулканизованных композиций следует учитывать природу применяемого ИВ. Так, при использовании в качестве наполнителя ИВ на основе облоя РТИ наблюдается повышение вязкости в большей степени, чем при использовании шинного ИВ (на 9–21% в зависимости от дозировки). Исследования показали, что скорость процесса релаксации напряжений в невулканизованном эластомере, практически не зависит от природы измельченного вулканизата. Коэффициент релаксации для резиновых смесей несколько выше для композиций, содержащих шинный ИВ, а значения площади под кривой релаксации на 7,8–22,2% выше для композиций с ИВ из облоя РТИ. Таким образом, композиции наполненные шинным ИВ характеризуются лучшей перерабатываемостью, чем содержащие ИВ из облоя РТИ.

Установлено, что тип ИВ оказывает значительное влияние на процесс формирования пространственной сетки вулканизатов модельных смесей. Так, у композиций, содержащих полярный ИВ-РТИ время достижения оптимальной степени вулканизации на 40–46% ниже, чем при использовании неполярного ИВ-Ш. При этом тип ИВ оказывает влияние на процесс формирования и параметры пространственной сетки. С увеличением дозировки ИВ происходит уменьшение плотности поперечного сшивания вулканизатов. Следует отметить, что при использовании в качестве эластичного наполнителя ИВ, полученного из облоя РТИ, вулканизаты обладают более высокой плотностью сшивки, чем содержащие шинный ИВ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Шведов Р.Е. Теория и практика рециклинга некондиционных резинотехнических изделий: монография / под общ. ред. проф. В.А. Струка. Гродно: ГрГУ, 2006. 319 с.
- 2 Karger-Kocsis J., Meszaros L., Barany T. Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers // *J Mater Sci*, 2013, № 48. С. 1–38.
- 3 Miranda M., Pinto F., Gulyurtlu I., Cabrita I. Pyrolysis of rubber tyre wastes: A kinetic study // *Fuel*, 2013. Т. 103 С. 542–552.
- 4 Fukumori K., Matsushita M. Material Recycling Technology of Crosslinked Rubber Waste // *R&D Review of Toyota CRDL*, 2013. Т. 38. No. 1. С. 39–47.
- 5 Canhui Lu, Xinxing Zhang, Mei Liang. Mechanochemical Recycling and Processing of Waste Crosslinked Polymers: Waste Tire Rubber and Waste XLPE from Cable Scraps // *The 5th ISFR (Окт. 11–14, 2009, Chengdu, China)*. С. 148–155.
- 6 Kim S.W., [и др.] Cure Characteristics and Physical Properties of Ground Rubber-Filled Natural Rubber Vulcanizates: Effects of the Curing Systems of the Ground Rubber and Rubber Matrix / *Journal of Applied Polymer Science*, 2007. Т. 105. С. 2396–2406.
- 7 Sombatsompop N., Kumnuantip C. Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire Tread Reclaimed Rubber/Natural Rubber Compounds // *Journal of Applied Polymer Science*, 2003. Т. 87. С. 1723–1731.
- 8 Larissa N., [и др.]. Development and characterization of composites with ground elastomeric vulcanized scrap as filler // *Material Science and Engineering C*, 2009. Т. 29. С. 383–386.
- 9 Jacob, C., De, P.P., Bhowmick, A.K. and De, S.K. Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber // *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001. Т. 82 С. 3293–3303.
- 10 Bristow G.M., The Mooney viscosity of raw natural rubber // *J. Nat. Rubber Res*, 1990. Т. 5 С. 182–198.
- 11 Gibala D., Hamed G.R.. Cure and Mechanical Behavior of Rubber Compounds Containing Ground Vulcanizates. Part I Cure Behavior // *Rubber Chemistry and Technology: September 1994*, Т. 67, №. 4. С. 636–648.
- 12 Молчанов, В.И. Карманова, О.В Паршута, Д.О. Разработка математической модели вулканизации двухфазных полимерных систем // *Вестник ВГУИТ*, 2013. № 1. С. 127–130.
- 13 Большой справочник резинщика. Ч. 1. Под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: ООО "Издательский центр "Техноформ" МАИ", 2012. 744 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей В. Касперович к.т.н., зав. кафедрой, кафедра технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов, Белорусский государственный технологический университет, ул Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Беларусь, andkasp@belstu.by

REFERENCES

- 1 Shvedov R.E. Theory and Practice of Recycling of Waste Industrial Rubber Articles. ed. by V.A. Struka. Grodno, GrGU, 2006. p. 319. (in Russian).
- 2 J. Karger-Kocsis, L. Meszaros, T. Barany. Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *J Mater Sci*, 2013, № 48. pp. 1–38.
- 3 Miguel Miranda, Filomena Pinto, I. Gulyurtlu, I. Cabrita. Pyrolysis of rubber tyre wastes: A kinetic study. *Fuel*, 2013. Vol. 103 pp. 542–552.
- 4 K. Fukumori, M. Matsushita. Material Recycling Technology of Crosslinked Rubber Waste. *R&D Review of Toyota CRDL*, 2013. Vol. 38. No. 1. pp. 39–47.
- 5 Canhui Lu, Xinxing Zhang, Mei Liang. Mechanochemical Recycling and Processing of Waste Crosslinked Polymers: Waste Tire Rubber and Waste XLPE from Cable Scraps. *The 5th ISFR (October 11–14, 2009, Chengdu, China)*. pp. 148–155.
- 6 Kim, S.W., et. al. Cure Characteristics and Physical Properties of Ground Rubber-Filled Natural Rubber Vulcanizates: Effects of the Curing Systems of the Ground Rubber and Rubber Matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007. Vol. 105. pp. 2396–2406.
- 7 Sombatsompop N., Kumnuantip C. Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire Tread Reclaimed Rubber/Natural Rubber Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003. Vol. 87. pp. 1723–1731.
- 8 Larissa N., et.al. Development and characterization of composites with ground elastomeric vulcanized scrap as filler. *Material Science and Engineering C*, 2009. Vol. 29. pp. 383–386.
- 9 Jacob, C., De, P.P., Bhowmick, A.K. and De, S.K. Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001. Vol. 82 pp. 3293–3303.
- 10 Bristow G.M., The Mooney viscosity of raw natural rubber. *J. Nat. Rubber Res*, 1990. Vol. 5 pp. 182–198.
- 11 D. Gibala, G.R. Hamed. Cure and Mechanical Behavior of Rubber Compounds Containing Ground Vulcanizates. Part I Cure Behavior. *Rubber Chemistry and Technology: September 1994*, Vol. 67, No. 4. pp. 636–648.
- 12 Molchanov V.I., Karmanova O.V, Parshuta D.O. Mathematical modeling of the vulcanization of two-phase polymer system. *Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]*, 2013. № 1. pp. 127–130. (in Russian).
- 13 Large Rubber Handbook P. 1. Under red. S.V. Reznichenko, U.L. Morozova. Mocsow, Tehnoform MAI", 2012. 744 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrei V. Kasperovich candidate of technical sciences, head of department, technology of petrochemical synthesis and polymer materials, Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus, andkasp@belstu.by

Вадим В. Мяделец к.т.н., ассистент, кафедры технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов, Белорусский государственный технологический университет, ул Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Беларусь, myadelets@belstu.by

Анастасия С. Казакова к.т.н., доцент, кафедры химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, kastpp@inbox.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Андрей В. Касперович написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Вадим В. Мяделец предложил методику проведения эксперимента

Анастасия С. Казакова консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 23.03.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 24.03.2017

Vadim V. Myadelets candidate of technical sciences, assistant, technology of petrochemical synthesis and polymer materials, Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus, myadelets@belstu.by

Anastasia S. Kazakova candidate of technical sciences, associate professor, chemistry and chemical technology of organic compounds and polymers processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, kastpp@inbox.ru

CONTRIBUTION

Andrei V. Kasperovich wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Vadim V. Myadelets proposed a scheme of the experiment

Anastasia S. Kazakova consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.23.2017

ACCEPTED 3.24.2017