

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-47-51>

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ПРОПИТКИ И НАБУХАНИЯ МАСЛОБЕНЗОСТОЙКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ

© Николай Григорьевич Филиппенко

Иркутский государственный университет путей сообщения «ИрГУПС», Россия, 664075, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; e-mail: ifpi@mail.ru

*Статья поступила 7 декабря 2022 г. Поступила после доработки 6 января 2023 г.
Принята к публикации 19 апреля 2023 г.*

К полимерным материалам, используемым в подвижном составе, в настоящее время предъявляются повышенные требования по стойкости. В работе представлен метод ускоренного проведения и автоматизации экспресс-анализа пропитки полимерных материалов, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах, для определения их ресурса работоспособности как уплотнительных изделий. Приведены результаты исследования изменений физико-механических свойств образцов на примере эластомерных материалов, применяемых в качестве разделительных и уплотнительных материалов, выполненных из маслобензостойкой резины МБС-С. В качестве рабочих сред использованы углеводороды на основе минеральных нефтепродуктов с различными коэффициентами вязкости. Установлено, что время пропитки полимера МБС-С, затраченное на испытания по стандартной методике, превышает более чем в 10 раз нормативные сроки проведения ремонтных и регламентных работ. Испытания с использованием разработанной установки экспресс-наполнения показали снижение времени пропитки до приемлемого на производстве уровня. Приведенные математические зависимости процесса наполнения маслобензостойкой резины стандартной рабочей жидкостью и автоматизация контроля наполнения дают возможность прогнозировать изменение стойкости полимерных материалов. Полученные результаты могут быть использованы при наработке базы данных динамики набухания различных материалов, что позволит получать прогнозные ресурсы работы полимеров в агрессивной среде различной этиологии.

Ключевые слова: полимеры; эластомеры; резины; впитывание; набухание; автоматизация; термовакuum.

AUTOMATED CONTROL OF THERMAL VACUUM IMPREGNATION AND SWELLING OF OIL- AND GASOLINE-RESISTANT ELASTOMERS

© Nikolay G. Filippenko

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), 15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664075, Russia; e-mail: ifpi@mail.ru

Received December 7, 2022. Revised January 6, 2023. Accepted April 19, 2023.

Polymeric materials used in the rolling stock are currently subject to increased requirements for durability. We present a method for accelerated and automated rapid analysis of the impregnation of polymeric materials used in various aggressive environments to determine their service life as sealing products. The results of studying changes in the physical and mechanical properties of samples are given on the example of elastomeric materials used as separating and sealing materials made of oil- and petrol resistant rubber MBS-S. Hydrocarbons based on mineral oil products with different viscosity coefficients were used as working media. It is shown that the time of impregnation of the MBS-S polymer, spent on testing according to the standard method, exceeds more than 10 times the standard terms rated for repair and maintenance. Tests using the developed express filling unit showed a reduction of the impregnation time to a level acceptable in production. The derived mathematical dependences for the process of filling MBS-S oil and petrol resistant rubber with a standard working fluid and automation of filling control make it possible to predict changes in the resistance of polymeric materials. The results obtained can be used in developing database of the swelling dynamics for various materials and predicting the service life of polymers in an aggressive environment of various etiology.

Keywords: polymer; drain valve; drain device; industrial rubber products; swelling; gasoline; hydraulic fluid; automation; thermal vacuum.

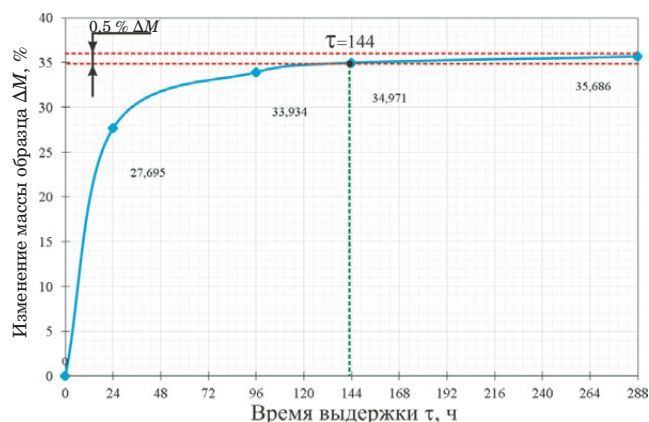


Рис. 1. Зависимость изменения массы полимерного материала от времени выдержки в СРЖ

Fig. 1. Dependence of the change in the mass of a polymer material on the exposure time in SRF

Введение

При традиционном использовании изделий из металлов и сплавов существует значительное количество методов и средств, обеспечивающих их уверенный и оперативный контроль [1 – 3]. Полимерные материалы в качестве конструктивных элементов применяют всего несколько десятилетий [4 – 6]. Методы контроля изделий из них в связи с незначительной активностью материалов к различным агрессивным жидкостям и средам (несомненно, положительная характеристика) предусматривают периодические измерения физико-механических свойств, причем время испытаний зависит от материалов и варьируется в широких пределах. Это зачастую не позволяет качественно организовать контроль целого ряда работ, связанных с регламентными, планово-предупредительными и другими ремонтами подвижного железнодорожного состава.

Цель работы — разработка метода проведения и автоматизации экспресс-анализа пропитки полимерных материалов, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах, для определения их ресурса работоспособности как уплотнительных изделий.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали полимерный эластомер марки МБС-С. Заметим, что данный материал используют в уплотнительных кольцах клапана сливного прибора цистерн. Причем потеря стойкости изделий обратно пропорциональна проценту пропитки [4, 5].

В качестве рабочей среды использовали стандартную рабочую жидкость (СРЖ): смесь бензина марки АИ-95 и гидравлической жидкости марки МГ-15-Б в определенном и постоянном соотношении.

Экспериментальные заполнения проводили при температурах 20 – 50 °С, соответствующих наиболее часто встречающимся условиям эксплуатации подвижного состава. Исследования показали, что сколь-нибудь значительного влияния на пропитку полимеров температурные условия (в данном диапазоне) не оказывают. Поэтому в дальнейшем за температуру наполнения принимали нормальную температуру $t = 20$ °С.

Изменение атмосферного давления в реальных условиях транспортировки также практически не влияет на пропитку эластомерных материалов, поскольку перепады давления даже на горно-перевальных участках железных дорог пренебрежимо малы. Поэтому при проведении испытаний использовали значение нормального давления.

Образцы эластомера перед испытаниями акклиматизировались, осматривались на предмет сплошности и наличия наружных повреждений. Взвешивание образцов проводили на аналитических весах с точностью измерения 0,0001 г. Выборку из пяти образцов помещали в емкость с СРЖ [7, 8].

Показателем наполнения служила динамика изменения массы образцов. Среднеарифметическое суммарной массы $\bar{M}$ определяли по формуле

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1)$$

где M_i — значение массы (меняется от 1 до N); N — количество образцов.

Показатели динамики изменения массы образцов рассчитывали по формуле

$$\Delta M = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где M_1 , M_2 — массы предварительно взвешенного и взвешенного в определенный момент времени выдержки образца.

Динамика изменения массы полимерного материала при взаимодействии с СРЖ показана на рис. 1.

Видно, что при контакте материала со смесью СРЖ наибольшее поглощение происходит в течение первых 24 ч. При этом масса образца возрастает примерно на 27,7 %. Следующие 24 ч наполнения характеризуются стабильным динамическим снижением скорости заполнения, позволяющим повысить наполняемость до 32 %. Дальнейший период впитывания жидкости отмечается линейной характеристикой наполняемости вплоть до его полного окончания ($\tau = 144$ ч). Прирост массы образца на данный период времени составил 35 % от первоначальной.

Полное заполнение образца СРЖ определяли показателем увеличения динамики наполнения

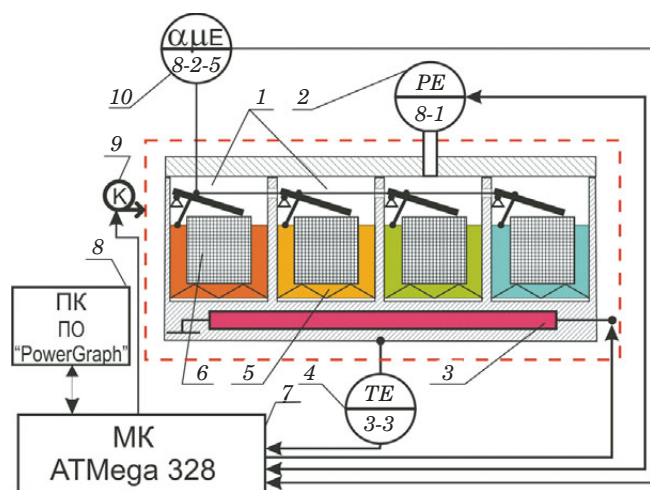


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера; 2 — манометр; 3 — нагревательный элемент; 4 — датчик температуры; 5 — рабочие жидкости; 6 — образец; 7 — микроконтроллер; 8 — персональный компьютер (ПК); 9 — вакуумный компрессор; 10 — датчики угла наклона (гироскопы)

Fig. 2. Scheme of the experimental setup: 1 — vacuum chamber; 2 — pressure gauge; 3 — heating element; 4 — temperature sensor; 5 — working fluids; 6 — sample; 7 — microcontroller; 8 — personal computer; 9 — vacuum compressor; 10 — tilt angle sensors (gyros)

на 0,5 % массы образца в течение 144 ч эксперимента.

Аппроксимация полученной зависимости

$$y = 3,5838 \ln x + 16,589 \quad (R_1^2 = 0,9969) \quad (3)$$

позволяет спрогнозировать процесс наполнения СРЖ эластомерного материала МБС-С, проводимый в условиях, соответствующих требованиям ГОСТов [7 – 9].

Отметим, что данный метод контроля наполнения агрессивными жидкостями изделий, выполненных из полимерных эластичных материалов, с целью определения их эксплуатационных возможностей малоприменим в условиях промышленных лабораторий [10 – 14].

На рис. 2 представлена схема модернизированной экспериментально-исследовательской установки на базе промышленного оборудования AZ pre-ink N2 для термовакуумного наполнения [4, 8].

Наряду с выбранными ранее параметрами контроля (температура TE , давление PE) использовали дополнительные контролируемые параметры: уровень жидкости α и изменение высоты образца μ в процессе набухания. Заметим, что контроль новых параметров можно осуществлять с помощью электронных датчиков (гироскопов) по углу наклона контактных пластин.

При автоматизированном методе экспресс-наполнения образцы погружаются в ванны термовакуумной камеры 1 (см. рис. 2), заполненные

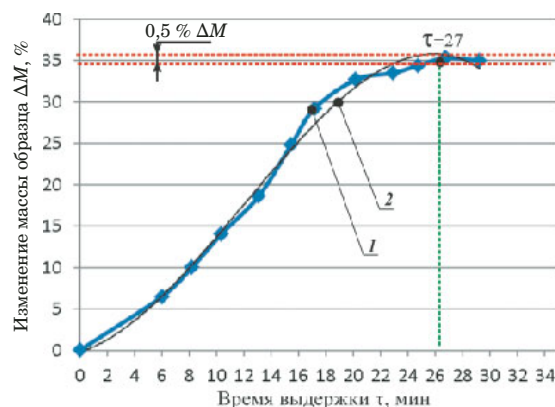


Рис. 3. Зависимость изменения массы полимерного материала от времени выдержки в СРЖ в термовакуумной камере: 1 — экспериментальные данные; 2 — аппроксимирующая кривая

Fig. 3. Dependence of the change in the mass of a polymer material ΔM on the exposure time in the SRF in a thermal vacuum chamber: 1 — experimental values; 2 — approximating curve

агрессивными жидкостями 5. Давление в камере установки контролируется с помощью датчика 2, установленного в крышке. Установка температуры и ее контроль осуществляются через микроконтроллер 4 с выводом информации в виде графического интерфейса на экран ПК. Для управления электронными устройствами и передачи данных на ПК использовался микроконтроллер ATmega, в который предварительно была загружена доработанная программа [7, 8, 15, 16].

Обсуждение результатов

Динамика изменения массы полимерного материала при взаимодействии с СРЖ и аппроксимирующая кривая экспериментальных данных при автоматизированном процессе термовакуумного наполнения образцов представлены на рис. 3.

Видно, что при контакте материала в термовакуумной камере со смесью СРЖ наибольшее поглощение наблюдается в течение первых 17 мин взаимодействия. При этом масса образца возрастает примерно на 28 %. Период 17 – 24 мин характеризуется плавным снижением динамики наполнения. Завершение впитывания можно определить временным интервалом в 27 мин работы установки и наполняемостью до 35 %. Дальнейшее изменение массы образца находится в 0,5 %-м интервале ΔM , что было принято ранее как идентификация завершения заполнения.

Предварительно (до проведения эксперимента) подбирали оптимальные значения параметров температуры и давления в вакуумной камере. Критерием оптимизации служило минимальное время полного заполнения $\tau_{\min}$. За темпера-

туру наполнения, как уже указывалось, принимали $t = 20^\circ\text{C}$. Оптимизация выбора давления $P_{\text{опт}}$ основывалась на условиях максимального заполнения СРЖ за τ_{min} . Одно из таких условий — ламинарный поток СРЖ, который можно рассчитать согласно законам Пуазейля. Однако в силу больших допущений и погрешностей, возникающих в расчетах в связи с неоднородностью и вариативностью физико-химического состояния исследуемого материала, значение давления находили экспериментально. Оно было определено в диапазоне низкого вакуума и составляло $P_{\text{опт}} = 10^4$ Па.

Таким образом, период полного окончания впитывания СРЖ в термовакуумной камере экспериментально был определен временем $\tau = 27$ мин. Масса образца за данный период увеличилась на 35 % от первоначальной [9, 11 – 14, 17].

Аппроксимирование полученной зависимости ($f_1(x)$)

$$y = -0,0034x^3 + 0,1214x^2 + 0,5156x - 0,1964$$

$$(R^2 = 0,9943) \quad (4)$$

дает возможность спрогнозировать наполнение СРЖ эластомерного материала марки МБС-С, проводимое в термовакуумной камере.

Сопоставление динамик наполнения в стандартном режиме с данными, полученными методом ускоренного испытания (экспресс-анализа), позволило выявить их функциональную подчиненность.

Используя аналитические зависимости (3), (4) в виде

$$f_1(x) = -0,0034x^3 + 0,1214x^2 + 0,5156x - 0,1964; \quad (5)$$

$$f_2(x) = 3,5838 \ln x + 16,589, \quad (6)$$

несложно определить, что функция перевода значений, полученных экспресс-методом, в значения, соответствующие наполнению в нормальных условиях, будет определяться как

$$f_3(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \frac{-0,0034x^3 + 0,1214x^2 + 0,5156x - 0,1964}{3,5838 \ln x + 16,589}. \quad (7)$$

После вычислений переводная функция принимает следующий вид:

$$f_3(x) \approx -0,0084x^3 + 0,376x^2 + 0,03x - 0,1964 + \frac{0,305}{3,6x + 16,589}. \quad (8)$$

Среднее значение достоверности аппроксимации зависимостей $f_1(x)$ и $f_2(x)$, свидетельствующее об адекватности предлагаемой методики, составило

$$\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} = \frac{0,9969 + 0,9943}{2} = 0,9956.$$

Отметим, что разработанная методика наполнения полимеров в автоматизированной термовакуумной установке имеет дополнительные возможности, заключающиеся в изучении работоспособности полимерных материалов в режиме циклического температурного воздействия (летне-зимний и с переходом через 0°C в осенне-весенний периоды эксплуатации). Подобные температурные режимы формируются в емкостях при перевозке и хранении углеводородов, что актуально для условий Сибири и Дальнего Востока [18 – 20].

Заключение

Проведенные исследования наполнения и набухания маслобензостойкой резины марки МБС-С — наиболее часто применяемого эластомерного материала уплотнений — показали невозможность использования в условиях промышленных лабораторий стандартных методов испытаний. Разработанная методика и автоматизированная установка для ее осуществления позволяют уменьшить время процесса пропитки со 144 ч до 27 мин. Кроме того, с учетом расчетного коэффициента перевода определена взаимосвязь времени ускоренного испытания (экспресс-анализа) и временных интервалов стандартного наполнения маслобензостойких резин марки МБС с удовлетворительной достоверностью ($R^2 = 0,9956$).

Перспективные направления дальнейших исследований могут быть связаны с тем, что при расширении базы данных динамики набухания различных материалов, используя предложенную методику, можно получать прогнозные сроки работы полимеров в агрессивных средах разной этиологии и предопределять периодичность проведения регламентных и ремонтных работ по принципу остаточного ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 года / Авиационные материалы и технологии. 2020. № 5. С. 7 – 17.
2. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания / Пер. с англ. — СПб.: Научные основы и технологии, 2020. — 620 с.
3. Мартин Дж. М., Смит У. К. Производство и применение резинотехнических изделий / Пер с англ. — СПб.: Профессия, 2019. — 480 с.

4. Буторин Д. В., Чуклай И. В. Технология маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов / VII Международная науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона»: сб. мат. Т. 2. — Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 490 – 495. DOI: 10.1016/0375-6742(74)90001-6
5. Филиппенко Н. Г., Буторин Д. В., Лившиц А. В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах / Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 171 – 175.
6. Лившиц А. В., Ларченко А. Г., Филатова С. Н. Высоко-частотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55 – 65.
7. Филиппенко Н. Г., Буторин Д. В., Лившиц А. В. и др. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 96 – 103.
8. Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В. Автоматизированные исследования процесса пропитки эластомеров / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1(46). С. 72 – 78. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
9. Морчиладзе И. Г., Никодимов А. П., Соколов М. М., Трегьяков А. В. Железнодорожные цистерны. — М.: ИБС-Холдинг, 2016. — 516 с.
10. Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327 2022_2_19
11. Ковалева Л. А., Ливанова Н. М., Овсянников Н. Я. Исследование набухания резин из бутадиеннитрильных каучуков в неполярном растворителе n-гептане / XVIII Международная науч.-практ. конф. «Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии»: сб. тр. — М.: НИЦ НИИШП, 2021. С. 63 – 66.
12. Маскулюинате О. Е., Морозов Ю. Л. Влияние способа введения пластификатора на свойства парафинатных каучуков БНКС и стандартные резины на их основе / Каучук и резина. 2016. № 3. С. 14 – 17.
13. Анисимов Б. Ю., Дыбман А. С., Имянитов Л. С., Поляков С. А. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков / Каучук и резина. 2017. № 2. С. 32 – 38.
14. Чайкун А. М., Елисеев И. С., Наумов М. А., Венедиктова О. А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин / Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3. С. 53 – 55.
15. Филиппенко Н. Г. Исследование механических характеристик полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов подвижного состава / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. № 12. С. 43 – 47.
16. Думчев И. С., Ларченко А. Г., Попов С. И. и др. Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД. / Молодой ученый. 2017. № 12. С. 48 – 51. DOI: 10.15826/analitika.2012.19.2.009
17. Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г. и др. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / Труды ВИАМ. 2021. № 1. Ст. 05. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26
18. Каблов Е. Н. Химия в авиационном материаловедении / Российский химический журнал. 2018. № 1. С. 31 – 41.
19. Coat J. Polymer heterogeneity in waterborne coatings / Technol. Res. 2010. Vol. 7. N 1. P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
20. Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L. Polymer blend latex films: Miscibility and holymerdiffusion studied by energy transfer / Polymer. 2008. Vol. 49. N 8. P. 2055 – 2064.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing until 2030 / Aviat. Mater. Tekhnol. 2020. N 5. P. 7 – 17 [in Russian].
2. Dick J. S. Rubber Technology: Formulation and Testing. — St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2020. — 620 p. [Russian translation].
3. Martin J. M., Smith W. K. Production and application of rubber products. — St. Petersburg: Professiya, 2019. — 480 p. [Russian translation].
4. Butorin D. V., Chuklay I. V. Technology of oil filling of polymeric and composite antifriction materials / Proc. of the VII Int. Sci.-Pract. Conf. “Transport infrastructure of the Siberian region.” Vol. 2. — Irkutsk: IrGUPS, 2010. P. 490 – 495 [in Russian]. DOI: 10.1016/0375-6742(74)90001-6
5. Filippenko N. G., Butorin D. V., Livshits A. V. Determination of phase and relaxation transitions in polymeric materials / Avtom. Sovr. Tekhnol. 2017. Vol. 71. N 4. P. 171 – 175 [in Russian].
6. Livshits A. V., Larchenko A. G., Filatova S. N. High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials / Nauka Obraz. 2014. N 6. P. 55 – 65 [in Russian].
7. Filippenko N. G., Butorin D. V., Livshits A. V. Automation of measuring the temperature of polymeric material during high-frequency electrothermal heating / Sovr. Tekhnol. Sist. Anal. Model. 2017. N 1(53). P. 96 – 103 [in Russian].
8. Filippenko N. G., Livshits A. V. Automated studies of the process of impregnation of elastomers / Élektrotekhnol. Élektrooborud. APK. 2022. Vol. 69. N 1(46). P. 72 – 78 [in Russian]. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
9. Morchiladze I. G., Nikodimov A. P., Sokolov M. M., Tregyakov A. V. Railway tanks. — Moscow: IBS-Holding, 2016. — 516 p. [in Russian].
10. Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327 2022_2_19
11. Kovaleva L. A., Livanova N. M., Ovsyannikov N. Ya. Investigation of the swelling of rubbers from butadiene nitrile rubbers in the non-polar solvent n-heptane / Proc. of the XVIII Int. Sci.-Pract. Conf “Rubber industry. Raw material. Materials. Technologies”. — Moscow: NITs NIIShP, 2021. P. 63 – 66 [in Russian].
12. Maskulyuinat O. E., Morozov Yu. L. Influence of the method of introducing a plasticizer on the properties of BNKS paraffin rubbers and standard rubbers based on them / Kauch. Rez. 2016. N 3. P. 14 – 17 [in Russian].
13. Anisimov B. Yu., Dybman A. S., Imyanitov L. S., Polyakov S. A. Hydrogenation of butadiene-nitrile rubbers / Kauch. Rez. 2017. N 2. P. 32 – 38 [in Russian].
14. Chaikun A. M., Eliseev I. S., Naumov M. A., Venediktova O. A. Features of building recipes for frost-resistant rubber / Aviat. Mater. Tekhnol. 2015. N 3. P. 53 – 55 [in Russian].
15. Filippenko N. G. Investigation of the mechanical characteristics of polyamide materials of separators for axle boxes of rolling stock / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. N 12. P. 43 – 47 [in Russian].
16. Dumchev I. S., Larchenko A. G., Popov S. I., et al. Restoration of polyamide separators of bearings of the axle box unit of the rolling stock of Russian Railways / Mol. Uch. 2012. N 12. P. 48 – 51 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2012.19.2.009
17. Efimov V. A., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., et al. Study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and loads in laboratory and natural conditions / Tr. VIAM. 2021. N 1. Art. 05 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26.
18. Kablov E. N. Chemistry in aviation materials science / Ross. Khim. Zh. 2018. N 1. P. 31 – 41 [in Russian].
19. Coat J. Polymer heterogeneity in waterborne coatings / Technol. Res. 2010. Vol. 7. N 1. P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
20. Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L. Polymer blend latex films: Miscibility and holymerdiffusion studied by energy transfer / Polymer. 2008. Vol. 49. N 8. P. 2055 – 2064.