



УДК 678.6

С.Н. Яковлев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МАССИВНОЙ ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ШИНЫ

S.N. Yakovlev

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF COEFFICIENT OF ROLLING FRICTION OF POLY-URETHANE SOLID TIRE

В статье приведено описание экспериментальной установки для изучения вопросов деформируемости полиуретанового обода. Получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента трения качения в зависимости от скорости нагружения, величины относительной деформации обода для полиуретанов различной твердости.

МАССИВНАЯ ШИНА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ПОЛИУРЕТАН. КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ. СКОРОСТЬ НАГРУЖЕНИЯ. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ОБОДА.

Description of experimental plant for observation questions of deformation of polyurethane tire is presented. Empirical dependence for determination of coefficient of rolling friction is given as a function of strain rate, value of relative strain for poly-urethane with different hardness.

SOLID TIRE. EXPERIMENTAL PLANT. POLY-URETHANE. COEFFICIENT OF ROLLING FRICTION. STRAIN RATE. STRAIN RATE OF TIRE.

В современном машиностроении весьма актуален вопрос замены традиционного эластомера — резины — на более совершенный современный материал — полиуретан, что позволяет улучшать конструктивные, технологические и эксплуатационные качества деталей.

Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее универсальный полимерный материал. Полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами, имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1–3].

Массивные шины применяют в промышленных транспортных средствах для механизации погрузо-разгрузочных работ в тех случаях, когда

требуется большая грузоподъемность при малых габаритах и опасны проколы пневматических шин. Основная область применения — погрузчики-штабелеры внутризаводского и складского транспорта. Транспорт этого типа должен обладать высокой маневренностью и хорошей устойчивостью при небольших габаритах.

Массивная шина должна поглощать толчки и удары, которые возникают во время движения из-за неровностей полов производственных помещений, обеспечивать надежное сцепление колеса с дорожным покрытием, а также передавать тяговые и тормозные усилия.

Начиная с середины прошлого века в промышленно развитых странах резина во многих технических приложениях стала вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества, хотя полиуретаны в 1,5–3 раза дороже резин.

Установлено, что при одинаковых габаритах и небольших скоростях движения (до 10 км/ч) массивные шины из полиуретана выдерживают

нагрузки в 2–3 раза большие, чем из резины [4]. При этом срок службы в 2–3 раза больше, чем у резиновых, сопротивление качению (следовательно, и расход энергии) полиуретановых шин меньше, чем у резиновых. Этот факт объясняется тем, что при одинаковой твердости, например 85 ShA, статический модуль упругости полиуретана при сжатии — $E_{ст0} = 21$ МПа, а модуль упругости резины — $E_{ст0} = 9$ МПа [5]. Благодаря этому появилась возможность либо уменьшить размеры шин из полиуретана по сравнению с резиновыми при равных нагрузках, либо при равных размерах значительно увеличить нагрузку на них.

Применение шины меньшего диаметра снижает центр тяжести машины, увеличивает ее устойчивость, создает возможность совершать повороты малого радиуса, что очень важно при работе внутри помещений. Массивные шины надежны в эксплуатации, так как порезы, трещины, незначительные вырывы и сколы массива, внедрение в полиуретан посторонних предметов не вызывают потери работоспособности и не приводят к авариям.

Описание экспериментальной установки

Для изучения вопросов деформативности и долговечности полиуретанового обода массивной шины был спроектирован и изготовлен специальный стенд для испытания полиуретановых роликов

Испытательный стенд относится к барабанному типу [6] с вращающейся наружной рабочей поверхностью. В качестве двигателя используется мотор-редуктор с мощностью $P_{эл} = 0,75$ кВт и частотой вращения выходного вала $n_{вых} = 40$ об/мин. Кинематическая схема представлена на рис. 1.

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор между нагружением с помощью пружин и использованием силы тяжести от подвешенных грузов. Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны, а в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры, было решено нагружение роликов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

В качестве нагружающего устройства в экспериментальной установке используется рычаг.

На рычаге имеется место для крепления кронштейна, в котором на подшипниках качения устанавливается полиуретановый ролик для проведения испытаний.

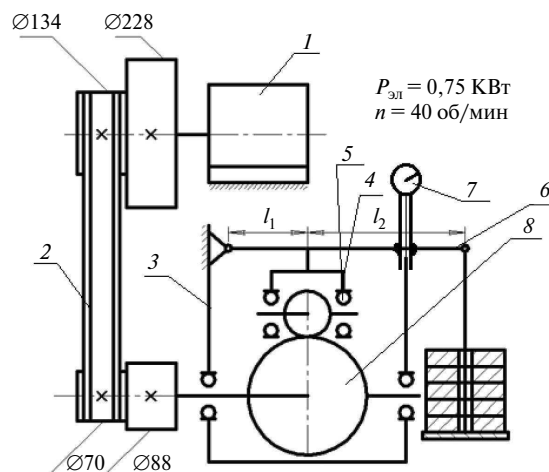


Рис. 1. Кинематическая схема установки:

1 — мотор-редуктор; 2 — ременная передача; 3 — корпус установки; 4 — кронштейн с роликами; 5 — полиуретановый ролик; 6 — нагружающее устройство; 7 — стрелочный индикатор; 8 — беговой барабан

Для минимизации погрешности нагружения было произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с кронштейном. Эти данные о рычажной системе были использованы для расчета тарифовочных постоянных и для построения тарифовочных диаграмм, устанавливающих соответствие между величиной груза, помещенного на подвес, и нагрузкой, приложенной к ролику.

Для экспериментального изучения вопросов деформативности и долговечности использовались ролики диаметром 46 мм, шириной 20 мм, толщиной упругого обода 8 мм трех твердостей: 75, 85 и 95 ShA.

Результаты исследования

Рассмотрим равномерное прямолинейное качение массивной шины по твердой горизонтальной поверхности и установим причины затраты энергии при перекачивании колеса. Качение колеса может происходить под действием силы трения, приложенной к ободу (случай экспериментального стенда), либо под действием силы, приложенной к оси. В перечисленных случаях колесо называется ведомым.

Когда вращение колеса происходит под действием приложенного к нему вращающего момента, колесо называется ведущим.

При качении колеса происходит циклическое нагружение и разгрузка материала. Для упругих тел этот процесс является обратимым. Однако абсолютно упругих тел в природе не существует. Большинство материалов обладает свойствами релаксации (уменьшение напряжений во времени при постоянной деформации) и ползучести (изменение деформаций во времени при постоянном напряжении). Это означает, что соотношения, определяющие поведение материала при деформировании, должны включать не только напряжения и деформации, но и их производные по времени, то есть скорость деформирования. К материалам, обладающим такими свойствами, относятся вязкоупругие материалы, в частности полиуретан.

При качении тел из вязкоупругих материалов площадка контакта распределена несимметрично относительно оси симметрии. При качении колеса внутреннее трение в материале (гистерезис) препятствует нарастанию деформации в передней зоне поверхности контакта колеса с опорной поверхностью и уменьшению деформации в задней зоне. В результате эпюра нормальных реакций опорной поверхности, симметричная в случае неподвижного колеса, при качении изменяется, увеличиваясь спереди и уменьшаясь сзади.

Помимо потерь на внутреннее трение, существуют потери на проскальзывание обода, на нарушение молекулярных связей между шиной и опорной поверхностью (так называемое явление прилипания) и на преодоление сопротивления воздуха. Из перечисленных трех дополнительных причин наиболее заметными являются потери на износ обода при качении с проскальзыванием. Однако ввиду их незначительности в дальнейшем они рассматриваться не будут. На рис. 2 изображен полиуретановый ролик при контакте со стальным беговым барабаном экспериментальной установки, нагруженной вертикальной силой F .

Полиуретановый ролик вращается под действием силы трения $F_{тр}$ между роликом и барабаном. К беговому барабану от электродвигателя передается крутящий момент M_k , который используется на преодоление момента сопротивления качению полиуретанового ролика.

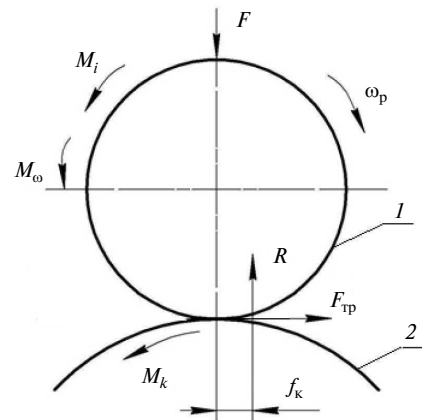


Рис. 2. Схема сил, моментов и реакций, действующих на ролик при его вращении в контакте с беговым барабаном (1 — ролик; 2 — беговой барабан)

Равнодействующая реакций R в контакте ролика с барабаном, перпендикулярная к направлению движения и равная вертикальной нагрузке F , при качении сдвигается вперед на некоторое расстояние f_k , называемое коэффициентом трения качения. Реакция R создает относительно центра колеса момент сопротивления качению:

$$M_k = Rf_k. \quad (1)$$

Инерционный момент ролика равен

$$M_i = J_p \frac{d\omega_p}{dt}, \quad (2)$$

где J_p — момент инерции ролика по отношению к его оси; $\frac{d\omega_p}{dt}$ — угловое ускорение вращения ролика.

Кроме перечисленных сил и моментов, на ролик действует момент M_ω сопротивления вращению колеса со стороны воздуха. В результате, пользуясь рис. 2, получим из условия равновесия системы

$$R = F; \\ M_k = Rf_k + M_i + M_\omega. \quad (3)$$

Момент M_ω ввиду его незначительности рассматривать, как было принято выше, не будем. Кроме того, примем движение колеса установившимся: $\frac{d\omega_p}{dt} = 0$, инерционный момент $M_i = 0$.

Окончательно получим: $R = F$, $M_k = Rf_k$. Крутящий момент M_k , подводимый от барабана

к испытываемому полиуретановому ролику, определим по следующей формуле:

$$M_k = \frac{P_{эл} 10^3 \eta_{уст}}{\omega_{вых} i_{рем}}. \quad (4)$$

В то же время момент сопротивления качению равен

$$M_k = R f_k = F f_k. \quad (5)$$

Приравняв (4) и (5), получим формулу для расчета f_k :

$$f_k = \frac{P_{эл} 10^3 \eta_{уст}}{F \omega_{вых} i_{рем}}, \quad (6)$$

где $P_{эл}$ — потребляемая мощность электродвигателя, кВт; $\eta_{уст}$ — КПД экспериментальной установки, $\eta_{уст} = 0,95$; F — нагрузка на ролик, Н; $\omega_{вых}$ — выходная угловая скорость мотор-редуктора; $\omega_{вых} = 4,18 \text{ с}^{-1}$; $i_{рем}$ — передаточное отношение ременной передачи.

Таким образом, по формуле (6) мы можем определить коэффициент трения качения f_k в зависимости от нагрузки F для различных скоростей качения и полиуретанов различной твердости (75, 85, 95 ShA).

При статическом нагружении ролика его радиальную деформацию δ мы измеряем при помощи стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм. Индикатор установлен в кронштейне, закрепленном на рычаге нагружения, и измеряет радиальную деформацию относительно корпуса установки. Картина взаимо-

действия экспериментального полиуретанового ролика с беговым барабаном представлена на рис. 3

Благодаря большой жесткости и высокой точности изготовления экспериментальная установка позволяет во время вращения ролика измерять его фактическую радиальную деформацию δ с точностью до 0,01 мм, при этом радиальное биение ролика составляет 0,01 мм.

После приложения нагрузки и фиксации радиальной деформации включалось вращение бегового барабана и обнаруживалось уменьшение радиальной деформации (ролик при качении поднимался). Это явление объясняется тем, что при динамическом нагружении происходит увеличение модуля упругости. В качестве характеристики полиуретана, работающего в режиме динамического нагружения, можно использовать коэффициент динамического ужесточения — отношение динамического модуля упругости к статическому.

Для резин и наиболее вероятных условий нагружения при эксплуатации коэффициент динамического ужесточения $K_{д.у}$ учитывает соотношение модулей сдвига [7]. В зависимости от типа каучука, твердости резины и скорости нагружения $K_{д.у}$ согласно [8] изменяется от 1,2 до 1,5. В то же время по данным [9] величина коэффициента динамического ужесточения находится в пределах от 1,5 (для резины твердостью 30 ShA) до 2,5 (при твердости 75 ShA). Далее по результатам замера статической и динамической

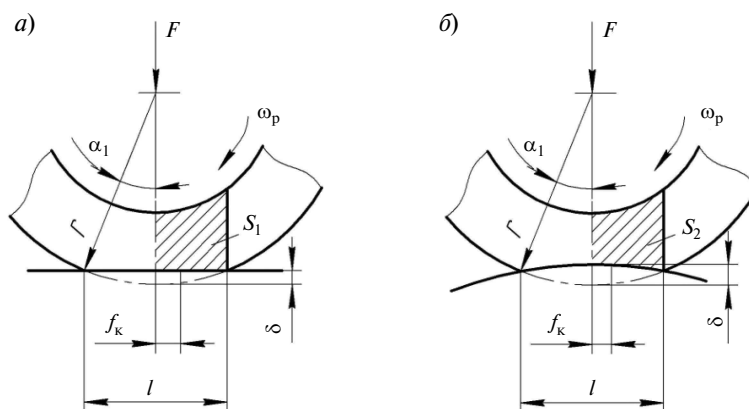


Рис. 3. Деформация полиуретанового ролика: а — в контакте с плоской твердой поверхностью, б — в контакте с беговым барабаном

деформации ролика расчетным путем необходимо определить коэффициент динамического ужесточения.

По результатам расчетов была получена зависимость коэффициента динамического ужесточения в зависимости от скорости нагружения для полиуретанов различной твердости.

Полученные зависимости представлены на рис. 4. Эти зависимости хорошо аппроксимируются следующей формулой:

$$K_{\text{ду}} = 1 + \frac{V^{1,28-0,0054\text{ShA}}}{20-0,19\text{ShA}}, \quad (7)$$

где V — линейная скорость, м/с; ShA — твердость полиуретана по Шору.

С увеличением скорости деформации динамический модуль упругости растет по показательной зависимости. С увеличением твердости полиуретана показатель степени уменьшается и составляет для полиуретана твердостью 75 ShA — 0,87, для твердости 85 ShA величину 0,82 и для полиуретана твердостью 95 ShA — 0,77.

Качественно подобные зависимости увеличения динамического модуля упругости для полимеров от скорости деформирования представлены в работах [10–11].

С увеличением твердости полиуретана коэффициент динамического ужесточения линейно увеличивается. Это, очевидно, связано с необходимостью деформирования макромолекул полиуретана, у которого число поперечных «сшивок» макромолекул растет с ростом твердости полимера.

Благодаря точному замеру потребляемой мощности с помощью микроамперметра, вмонтированного в электрическую цепь экспериментальной установки, была получена зависимость коэффициента трения качения от нагрузки.

Ее вид совпадает с зависимостью радиальной деформации ролика от нагрузки. По результатам расчетов коэффициент трения качения составляет примерно 6 % от длины l площадки контакта. Выражение для коэффициента трения качения получено для случая контактирования экспериментального ролика с беговым барабаном (рис. 3, б). Учитывая тот факт, что сопротивление качению обусловлено в основном необходимостью деформирования упругого слоя полиуретана, и сравнивая эти объемы для случаев контактирования экспери-

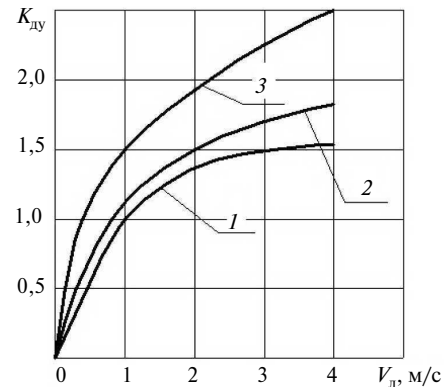


Рис. 4. Зависимость коэффициента динамического ужесточения от скорости нагружения для полиуретанов различной твердости (1 — при 75 ShA; 2 — при 85 ShA; 3 — при 95 ShA)

ментального ролика с беговым барабаном и плоской твердой поверхностью, можно сделать вывод: при небольших относительных деформациях полиуретанового обода ($\epsilon = \delta/h = 8-10\%$) объемы полиуретанового обода $V_1 = S_1 b$ и $V_2 = S_2 b$ (рис. 3), непосредственно участвующие в деформировании при качении ролика, различаются на 4–6 %.

Приведенные различия находятся в пределах технической погрешности. Поэтому для случая контакта полиуретанового обода массивной шины с плоской твердой поверхностью во всем диапазоне рабочих нагрузок усреднено можно принять коэффициент трения качения равным 6 % от длины контакта колеса с плоскостью.

Полиуретановый обод имеет коэффициент трения качения примерно в 1,5 раза меньше, чем резиновый такой же твердости. Это объясняется меньшей длиной площадки контакта колеса с бетонным полом.

Ведущие западные производители массивных шин изготавливали резиновый обод составным — из двух слоев: внутреннего с малым внутренним сопротивлением деформированию для уменьшения сопротивлению качению и наружного (бегового), износостойкого, для уменьшения износа упругого обода колеса.

Согласно рис. 3, a — угол контакта колеса с дорогой — $\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\delta}{r}\right)$, длина площадки контакта — $l = \sin(\alpha_1 2r)$, а коэффициент трения качения равен

$$f_k = 0,06l = 0,06d \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{\sqrt[2]{\left(\frac{Fh}{2E_{\text{дин}} b \sqrt{d}} \right)^2}}{r} \right) \right], \quad (8)$$

где F — нагрузка на колесо, Н; h — толщина обода, мм; $E_{\text{дин}}$ — динамический модуль упругости, МПа; b — ширина колеса, мм; d — диаметр колеса, мм; r — радиус колеса, мм.

Приведем пример расчета коэффициента трения качения для опорного колеса погрузчика со следующими данными: наружный диаметр — $d = 300$ мм; рабочая ширина — $b = 160$ мм; толщина обода — $h = 35$ мм. Материал обода — полиуретан твердостью 85 ShA. Начальный статический модуль упругости при сжатии — $E_{\text{ст}0} = 21$ МПа.

Параметры нагружения: скорость передвижения — $V_{\text{л}} = 6$ км/час = 1,67 м/с, нагрузка на колесо — $f = 10\,000$ Н.

Принимая во внимание динамический характер нагружения, определим температуру нагрева обода:

$$T_{\text{п}} = \frac{t_{\text{в}} + 6,9V_{\text{л}}^{1,65} + 95 \sqrt[2]{\left(\frac{F}{2E_{\text{ст}0} b d \sqrt{\frac{h}{d}}} \right)^2}}{1,67 - 0,007 \text{ShA}} = 42 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_{\text{в}}$ — температура окружающего воздуха, $t_{\text{в}} = 20$ °С.

Определим $K_{\text{ду}}$ и $K_{\text{тр}}$:

$$K_{\text{ду}} = 1 + \frac{V^{1,28 - 0,0054 \text{ShA}}}{20 - 0,19 \text{ShA}} = 1,39;$$

$$K_{\text{тр}} = 1 - 0,0033 T_{\text{п}} = 0,86.$$

$$E_{\text{дин}} = E_{\text{ст}} K_{\text{ду}} K_{\text{тр}} = 21 \cdot 1,39 \cdot 0,86 = 25,1 \text{ МПа}.$$

Коэффициент трения качения

$$f_k = 0,06l = 0,06d \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{\sqrt[2]{\left(\frac{Fh}{2E_{\text{дин}} b \sqrt{d}} \right)^2}}{r} \right) \right] = 1,6 \text{ мм}.$$

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Коэффициент трения качения составляет около 6 % от длины площадки контакта массивной полиуретановой шины с плоской твердой поверхностью, т. е. примерно в полтора раза меньше по сравнению с аналогичной резиновой, что подтверждает актуальность замены резины на полиуретан.

2. Получена эмпирическая зависимость коэффициента динамического ужесточения от скорости деформирования для полиуретанов различной твердости.

3. Фактический коэффициент трения качения массивной шины меньше расчетного примерно на 8–10 %. Разница обусловлена тем, что расчет нагрева полиуретанового обода производится для случая постоянного динамического нагружения массивной шины, а в реальности погрузчики-штабелеры согласно [12] работают с остановками. Шина в течение работы из-за низкой теплопроводности не успевает разогреться до расчетной температуры. Исходя из опыта экспериментальных исследований и эксплуатации различных деталей вращения с упругим ободом из полиуретана необходимо отметить, что нагрев до расчетной температуры происходит в течение 5–8 минут в зависимости от скорости нагружения, т. к. именно она оказывает большее влияние на нагрев полиуретана, в отличие от величины относительной деформации упругого обода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Datta, J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers [Text] / J. Datta. // Journal of Elastomers and Plastics.— 2010.— Vol. 42.— P. 117–127.

2. **Maity, M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting

Agent [Text] / M. Maity // Journal of Elastomers and Plastics.— 2001.— Vol. 33.— P. 211–224.

3. **Rek, V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters [Text] / V. Rek. // Journal of Elastomers and Plastics.— 2003.— Vol. 35.— P. 311–323.

4. **Гриневич, Г.П.** Вилочные погрузчики [Текст] / Г.П. Гриневич, И.И. Мачульский, Е.А. Алепин.— М.: Машиностроение, 1974.— 216 с.

5. **Бартенев, Г.М.** Прочность и механизм разрушения полимеров [Текст] / Г.М. Бартенев.— М.: Химия, 1984.— 279 с.

6. **Кислицин, А.М.** Долговечность автомобильных шин в различных режимах движения [Текст] / А.М. Кислицин.— Н.-Новгород : Волго-Вятское книжное издательство, 1992.— 223 с.

7. **Гарцман, В.И.** Об определении коэффициента динамического ужесточения резин [Текст] / В.И. Гарцман, И.А. Николаева // Механика полимеров.— 1982.— № 7.— С. 42–43.

8. **Горелик, Б.М.** Некоторые особенности резины, как конструкционного материала [Текст] / Б.М. Го-

релик // Труды НИИРП.— 1955. № 7.— С. 3–14.

9. **Вильсон, У.К.** Вибрационная техника [Текст] / У.К. Вильсон.— М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1963.— 415 с.

10. **Земляков, И.П.** Влияние скорости деформации на жесткость зубьев зубчатых колес из полиамида [Текст] / И.П. Земляков // Механика полимеров.— 1966.— № 3.— С. 467–469.

11. **Зоделава, Г.Л.** К вопросу влияния скорости деформации на механические характеристики пластических масс [Текст] / Г.Л. Зоделава [и др.] // Механика полимеров.— 1965.— № 1.— С. 76–81.

12. **Алепин, Е.А.** Механизация погрузочно-разгрузочных работ средствами напольного электро-транспорта [Текст] / Е.А. Алепин.— Калининград: Книжное издательство, 1974.— 152 с.

REFERENCES

1. **Datta, J.** Synthesis and Investigation of Glycolates and Obtained Polyurethane Elastomers [Text] // Journal of Elastomers and Plastics.— March 2010.— Vol. 42.— P. 117–127.

2. **Maity, M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent [Text] // Journal of Elastomers and Plastics.— July 2001.— Vol. 33.— P. 211–224.

3. **Rek, V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters [Text] // Journal of Elastomers and Plastics, October 2003 35:311–323.

4. **Grinevich, G.P.** Vilochnye pogruchiki [Text] // G.P. Grinevich, I.I. Machul'skii, E.A. Alepin.— М.: Mashinostroenie, 1974.— 216 s. (rus.)

5. **Bartenev, G.M.** Prochnost' i mekhanizm razrusheniia polimerov [Text] / G.M. Bartenev.— М.: Khimiia, 1984.— 279 s. (rus.)

6. **Kislitsin, A.M.** Dolgovechnost' avtomobil'nykh shin v razlichnykh rezhimakh dvizheniia [Text] / A.M. Kislitsin.— N. Novgorod : Volgo-Viatskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1992.— 223 s. (rus.)

7. **Gartsman, V.I.** Ob opredelenii koeffitsienta dinamicheskogo uzhestocheniia rezin [Tekst] / V.I. Gartsman, I.A. Nikolaeva // Mekhanika polimerov.— 1982.— № 7.— S. 42–43.

8. **Gorelik, B.M.** Nekotorye osobennosti reziny, kak konstruktivnogo materiala [Tekst] / B.M. Gorelik // Trudy NIIRP.— 1955.— № 7.— S. 3–14. (rus.)

9. **Vil'son, U.K.** Vibratsionnaia tekhnika [Tekst] / U.K. Vil'son.— М.: GNТИ mashinostroitel'noi literatury, 1963.— 415 s. (rus.)

10. **Zemliakov, I.P.** Vliianie skorosti deformatsii na zhestkost' zub'ev zubchatykh koles iz poliamida [Tekst] / I.P. Zemliakov // Mekhanika polimerov.— 1966.— № 3.— S. 467–469. (rus.)

11. **Zodelava, G.L.** K voprosu vliianiia skorosti deformatsii na mekhanicheskie kharakteristiki plasticheskikh mass [Tekst] / G.L. Zodelava [i dr.] // Mekhanika polimerov.— 1965.— № 1.— S. 76–81. (rus.)

12. **Alepin, E.A.** Mekhanizatsiia pogruchozhno-razgruzochnykh rabot sredstvami napol'nogo elektrottransporta [Tekst] / E.A. Alepin.— Kaliningrad: Knizhnoe izdatel'stvo, 1974.— 152 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

ЯКОВЛЕВ Станислав Николаевич — кандидат технических наук доцент кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195197, Полустровский пр., д.14, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: stannik59@mail.ru
YAKOVLEV Stanislav N. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195197, Polyustrovsky pr. 14, St.-Petersburg, Russia; e-mail: stannik59@mail.ru