

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-38-44

УДК 621.888.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ

### EXPERIMENTAL STUDY OF A DYNAMIC MODULE OF POLYURETHANE ELASTOMERS AT REVERSE BENDING WITH ROTATION

Черныш Александр Алексеевич<sup>1</sup>,  
к.т.н., доцент, e-mail: a.chernysh1954@mail.ru  
Aleksandr A. Chernysh, C.Sc. Associate Professor  
Яковлев Станислав Николаевич<sup>2</sup>,  
к.т.н., доцент, e-mail: stannik59@mail.ru  
Stanislav N. Yakovlev,  
C.Sc., Associate Professor

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

<sup>1</sup>Saint Petersburg State Maritime Technical University, 190121, Russia, St. Petersburg, ul. Lotsman-skaya, 3

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

<sup>2</sup>Saint Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, 195251, Russia, St. Petersburg, ul. Polytechnic, 29

**Аннотация:** Актуальность работы обусловлена необходимостью замены традиционного эластомерного материала резины на более совершенный полиуретан, который обладает рядом преимуществ.

Целью данного экспериментального исследования явилось изучение виброизоляционных свойств современных конструктивных полиуретанов, применяемых при изготовлении амортизаторов. Предмет исследования - определение динамического модуля полиуретановых эластомеров трех различных марок при знакопеременном изгибе с вращением.

Данная работа описывает методику измерения динамического модуля эластомерных материалов в точном соответствии с ГОСТ 10828-95. Динамический модуль, измеряемый при проведении экспериментального исследования, является важнейшей упругой характеристикой эластомерного материала, определяющей деформацию амортизатора в условиях постоянного динамического нагружения.

Главным результатом представленного экспериментального исследования являются численные значения динамического модуля полиуретановых эластомеров трех различных торговых марок. Экспериментальные данные получены для условий нагружения, которые в точности соответствуют рабочим условиям по частоте и величине относительной деформации.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют об однообразном поведении исследуемых полиуретановых эластомеров. Небольшие различия в поведении исследуемых материалов обусловлены различиями в химическом строении. На основании представленных данных трудно отдать предпочтение какому-либо из исследуемых материалов и для обоснованного выбора материала амортизатора необходимо провести дополнительные исследования.

**Ключевые слова:** Полиуретановый эластомер, амортизатор, внутреннее трение, вязкоупругий материал, динамический модуль, виброизоляционные свойства.

**Abstract:** The relevance of work is due to the need to replace the traditional elastomeric rubber material with a more advanced polyurethane, which has several advantages.

The purpose of this experimental study was to study the vibration-insulating properties of modern structural polyurethanes used in the manufacture of shock absorbers. The subject of the study was the determination of the dynamic modulus of polyurethane elastomers with alternating bending with the rotation.

*This work describes in detail the method of measuring the dynamic modulus of elastomeric materials in strict accordance with GOST 10828-95. The dynamic modulus, measured during an experimental study, is the most important elastic characteristic of an elastomeric material that determines the deformation of the shock absorber under conditions of constant dynamic loading.*

*The main result of the presented experimental study is the numerical values of the dynamic modulus of polyurethane elastomers of three different brands. Experimental data were obtained for loading conditions that exactly correspond to the working conditions in terms of frequency and relative deformation value.*

*The experimental data presented show a monotonous behavior of the polyurethane elastomers under study. Small differences in the behavior of the materials under study are due to differences in the chemical structure. On the basis of the data presented, it is difficult to give preference to any of the materials studied and for a reasonable choice of the material of the shock absorber, additional research is needed.*

**Key words:** Polyurethane elastomer, shock absorber, internal friction, viscoelastic material, dynamic module, vibration-proof properties

## Введение

В современном машиностроении в качестве виброизоляционного материала амортизаторов силовых агрегатов стали широко применять полиуретаны, вместо традиционного эластомера - резины. Для полиуретана, как для конструкционного материала деталей машин, характерны три отличительных свойства:

- Эластичность - это способность к большим обратимым деформациям;
- Большое внутреннее трение, способное поглощать кинетическую энергию колеблющегося амортизируемого объекта.
- Малосжимаемость, при которой коэффициент Пуассона лежит в пределах  $\eta = 0,485 \dots 0,495$  для эластомеров различной твердости.

На сегодняшний день полиуретановые эластомеры являются наиболее универсальными полимерными материалами, используемыми в качестве конструкционного материала деталей машин. Для полиуретана свойственна высокая прочность, большой диапазон твердости и широкий рабочий температурный интервал [1-4].

Широкое распространение полиуретана в качестве виброизоляционного материала, вызывает необходимость экспериментального изучения физико-механических свойств полиуретана и вопросов, связанных с его поведением при динамическом нагружении.

Целью данной работы является экспериментальное определение динамического модуля полиуретана при знакопеременном изгибе с вращением для трех торговых марок и выбор оптимального эластомерного материала для изготовления амортизаторов.

## Материалы и методика исследования

Полиуретановые эластомеры используются в конструкциях современных амортизаторов для уменьшения амплитуды вынужденных циклических колебаний от недостаточно уравновешенных частей силовых агрегатов в диапазоне частот от 10 до 50 Гц.

С целью уменьшения частоты собственных колебаний системы «амортизатор – агрегат», для изготовления амортизаторов применяют мягкие

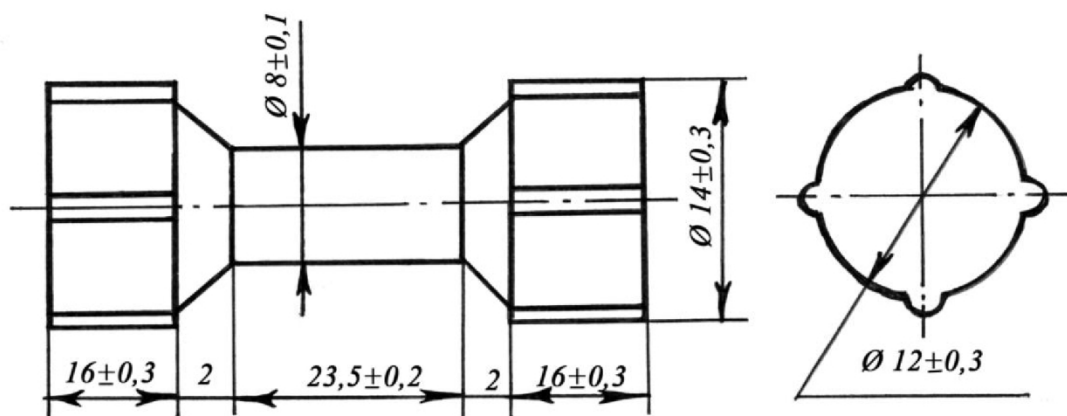


Рис. 1. Образец для определения динамического модуля полиуретана при знакопеременном изгибе с вращением

Fig. 1. Sample for determining the dynamic modulus of polyurethane for alternating bending with rotation

полиуретаны твердостью 40 ... 50 ShA. Виброизоляционные свойства системы согласно [5-8] зависят от соотношения частот вынужденных колебаний и свободных колебаний системы «амортизатор – агрегат»: чем больше будет соотношение, тем лучше будет виброизоляция.

Для сравнительных испытаний были изготовлены образцы, форма которых представлена на рис. 1.

Образцы изготавливались из полиуретана трех торговых марок Adipren, Vibrotan и Elast фирмы Synair (Великобритания), твердостью 50 ShA, литьем в открытую форму. Данные материалы широко применяются на практике. Они имеют большой диапазон по жесткости и температуре эксплуатации, большое внутреннее трение и небольшую ползучесть.

Сложный характер взаимосвязи между динамическим напряжением и деформациями при циклическом нагружении полиуретана обусловлен релаксационной природой высокоэластичных материалов [9-12]. Наиболее важными характери-

стиками вязкоупругого материала, определяющими его поведение под действием динамических нагрузок, являются частотные и амплитудные зависимости действительной  $E'$  и мнимой  $E''$  частей комплексного модуля от условий нагружения:

$$E_{\text{компл}} = E' + E'' \quad (1)$$

где  $E'$  – действительная часть комплексного модуля (динамический модуль);

$E''$  – мнимая часть комплексного модуля (модуль внутреннего трения).

Динамический модуль, совпадающий по фазе с деформацией, характеризует упругую энергию, запасаемую при деформировании. Модуль внутреннего трения характеризует величину рассеянной энергии.

Большой интерес в качестве виброизоляционных характеристик эластомера представляют величины динамического модуля и тангенс угла потерь определяемый как:

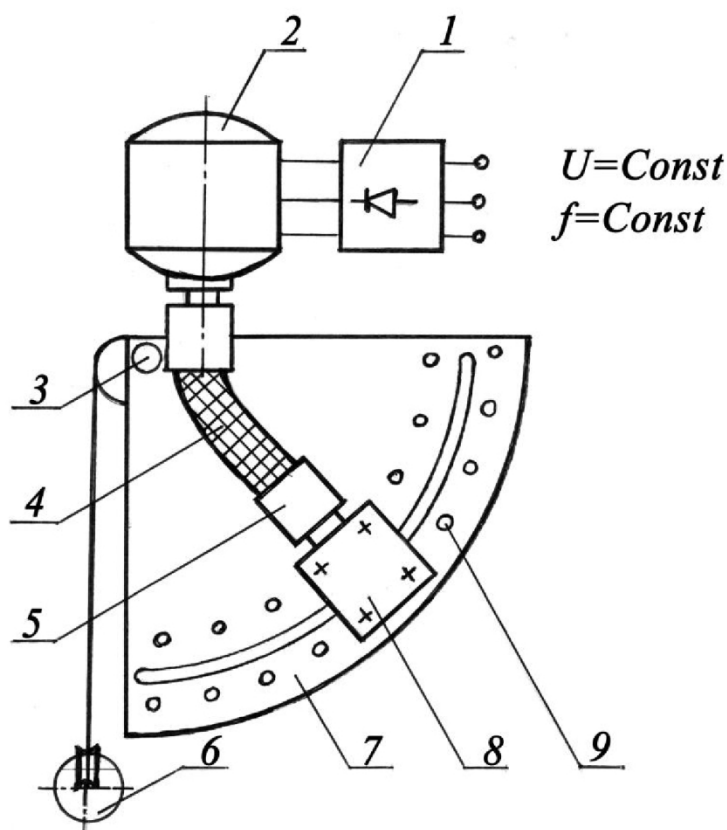


Рис. 2. Кинематическая схема установки для определения динамического модуля полиуретана при знакопеременном изгибе с вращением: 1 – частотный преобразователь; 2 – электродвигатель; 3 – ось; 4 – образец; 5 – цанговый зажим; 6 – груз; 7 – платформа; 8 – корпус; 9 – отверстие

Fig. 2. Kinematic diagram of the installation for determining the dynamic module of polyurethane with alternating bending with rotation: 1 - frequency converter; 2 - the electric motor; 3 - an axis; 4 - sample; 5 - collet clamp; 6 - cargo; 7 - platform; 8 - housing; 9 - hole

$$\tan \delta = \frac{E'}{E} \quad (2)$$

где  $\delta$  – угол сдвига фаз между деформацией и напряжением.

Важнейшим следствием сдвига фаз между напряжением и деформацией является динамический гистерезис, приводящий к механическим потерям и теплообразованию при циклическом нагружении полиуретанового массива амортизатора.

При низких частотах полиуретановый эластомер находится в высокоэластичном состоянии и имеет низкий модуль  $E'$ , не зависящий от частоты. При высоких частотах эластомер становится стеклообразным с модулем порядка 1000 МПа, который также не зависит от частоты. При промежуточных частотах полиуретановый эластомер ведет себя как вязкоупругое тело и его модуль  $E'$  увеличивается с ростом частоты.

Приведенные зависимости справедливы для любого линейного (в пределах 20 % деформации) вязкоупругого тела безотносительно к выбранной реологической модели.

Кинематическая схема установки для исследования динамического модуля полиуретановых эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением представлена на рис. 2.

Установка позволяет проводить испытания согласно ГОСТ 10828-95 образцов диаметром 8 мм и длиной рабочей части 23,5 мм при изгибе с заданной амплитудой относительной деформации и заданной частотой вращения.

Испытуемый образец 4 закрепляется в цанговых зажимах 5, один из которых установлен на роторе электродвигателя 2, а другой на свободной оси, подшипники которой установлены в корпусе 8. Корпус 8 перемещается по криволинейному пазу подвижной платформы 7, закрепленной на вертикальной оси 3. На платформе имеются отверстия 9, для закрепления корпуса 8 в фиксированном положении, соответствующем определенной относительной деформации образца при изгибе. Изгибающий момент, необходимый для расчета динамического модуля, определяется по весу грузов 6, уравнивающих положение платформы 7.

Представленная установка позволяет проводить испытания при следующих параметрах:

- Угол изгиба от 0 до 90 град. и как следствие относительная деформация образца до 30%;
- Благодаря частотному преобразователю плавно регулировать частоту вращения асинхронного электродвигателя от 600 об/мин до 3000 об/мин.

Методика определения динамического модуля полиуретана включает в себя последовательность следующих шагов:

- Испытуемый образец устанавливается в цанговые зажимы. Далее корпус перемещается по

криволинейному пазу до отверстия, соответствующего требуемой деформации и фиксируется;

- Включается электродвигатель и с помощью частотного преобразователя устанавливается минимальное значение частоты вращения 600 об/мин (10 Гц);
- Уравновешивается платформа с помощью грузов, помещаемых на подвес, закрепленный на тросе;
- Затем устанавливается новое значение частоты вращения, вновь с помощью грузов уравнивается платформа и заносятся данные в протокол испытаний.

Таким образом, при первоначально установленной амплитуде относительной деформации, производятся замеры изгибающего момента в диапазоне частот от 10 до 50 Гц. После измерения изгибающих моментов при первоначально заданной относительной деформации образца, ее величина в ходе следующей серии экспериментальных исследований изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,3 и получается зависимость изменения динамического модуля от амплитуды при частоте 37 Гц.

Данная частота выбрана на основании длительных наблюдений за работой различных силовых агрегатов и соответствует номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в 2200 об/мин. Экспериментальное исследование физико-механических свойств опытных образцов важно производить в условиях, точно соответствующих рабочим режимам нагружения полиуретана, при его работе в условиях постоянного динамического нагружения.

Учитывая низкую теплопроводность полиуретановых эластомеров, продолжительность каждого испытания составляла 10 минут с той целью, чтобы материал полностью прогрелся и сведения о динамическом модуле полиуретана были точными. С этой целью испытанию подвергаются три образца полиуретана каждой исследуемой торговой марки и за результат испытания принимаем среднее арифметическое значение, отличающееся от среднего не более чем на 10 %.

## Результаты исследования и их обсуждение

Согласно ГОСТ 10828-95 динамический модуль исследуемых полиуретановых эластомеров, определяем исходя из предположения о линейном характере распределения деформации и напряжений в поперечном сечении образца по следующей формуле:

$$E' = \frac{4M_{\text{и}}}{\pi \cdot r^3 \cdot \varepsilon}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{и}}$  – изгибающий момент, Н·мм;  
 $r$  – радиус рабочего участка образца, мм;  
 $\varepsilon$  – амплитуда относительной деформации образца, в безразмерном виде.

Величину изгибающего момента определим по формуле:

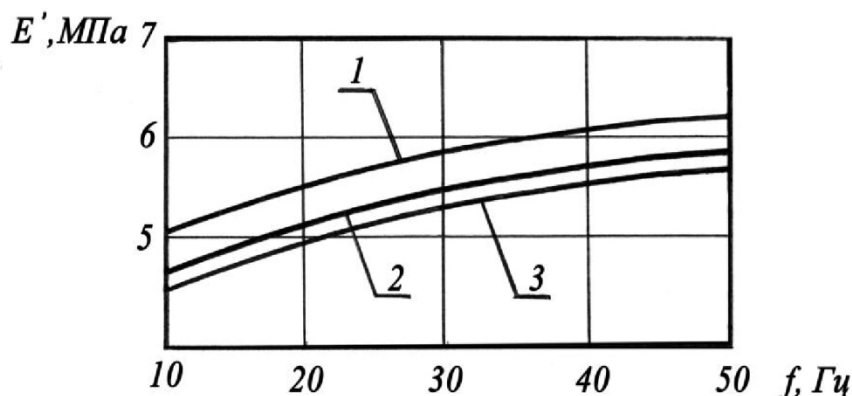


Рис. 3. Изменение динамического модуля эластомеров от частоты нагружения при амплитуде  $\varepsilon = 0,2$ : 1 - Эласт; 2 - Вибротан; 3 - Адипрен

Fig. 3. Change in the dynamic modulus of elastomers from the loading frequency at an amplitude of  $\varepsilon = 0.2$ : 1 - Elast; 2 - Vibrotan; 3 - Adiprene

$$M_H = Ph, \quad (3)$$

где  $P$  – величина уравнивающего груза, Н;

$h$  – плечо, на котором закреплен трос относительно оси платформы, м.

Принимая во внимание размер плеча  $h = 50$  мм и радиус рабочей части исследуемого образца  $r = 4$  мм, формула для расчета динамического модуля будет выглядеть следующим образом:

$$E' = 0,01P/\varepsilon, \quad (4)$$

где  $P$  – величина уравнивающего груза, гр;

$\varepsilon$  – амплитуда относительной деформации исследуемого образца ( $\varepsilon = 0,1 \dots 0,3$ ), в безразмерном виде.

На рис. 3 представлены зависимости динами-

ческого модуля полиуретановых эластомеров трех торговых марок от частоты нагружения в диапазоне от 10 Гц до 50 Гц для относительной деформации образца  $\varepsilon = 0,2$ , так как именно эта величина относительной деформации эластомерного массива амортизатора является рабочей.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3, необходимо отметить рост динамического модуля с увеличением частоты нагружения. Это ужесточение полиуретановых эластомеров связано с невозможностью быстрой деформации макромолекул при нагружении [13-16].

В то же время необходимо отметить, что нагрев полиуретановых образцов при испытании от  $25^\circ\text{C}$  для частоты нагружения 10 Гц до  $35^\circ\text{C}$  для 50 Гц, приводит к противоположному явлению – размягчению эластомера при нагревании.

На основании проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости

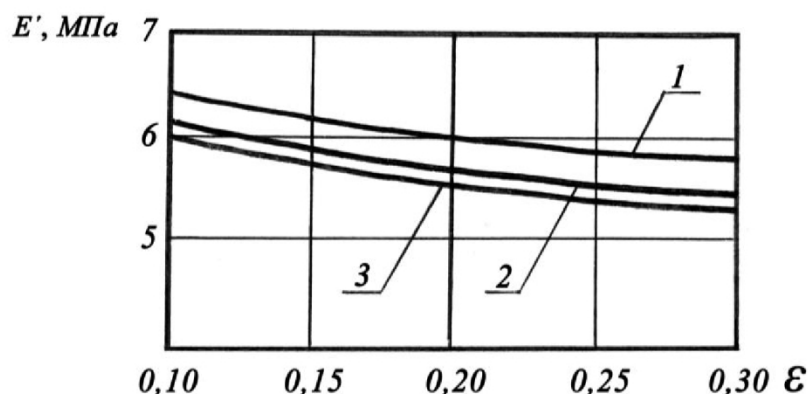


Рис. 4. Изменение динамического модуля эластомеров от амплитуды нагружения при частоте 37 Гц: 1 - Эласт; 2 - Вибротан; 3 - Адипрен

Fig. 4. Change in the dynamic modulus of elastomers from the loading amplitude at a frequency of 37 Hz: 1 - Elast; 2 - Vibrotan; 3 - Adiprene

изменения динамического модуля полиуретановых эластомеров при частоте 37 Гц для различных амплитуд нагружения. Данные зависимости представлены на рис. 4.

Представленные на рис. 4 зависимости динамического модуля полиуретановых эластомеров трех торговых марок от амплитуды нагружения свидетельствуют о снижении динамического модуля материала в соответствии с температурой нагрева. Подобные зависимости, представлены в работе [17].

### Заключение

Главным результатом данной работы являются полученные экспериментальным путем численные значения динамического модуля полиуретановых эластомеров трех торговых марок при раз-

личных условиях нагружения, необходимые для расчета деформативности амортизатора на стадии проектирования.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об однообразном поведении материалов. Небольшие численные различия динамического модуля исследуемых материалов обусловлены различием химической природы исследуемых эластомерных материалов.

На основании проведенных экспериментальных исследований трудно отдать предпочтение какому либо из материалов. Для обоснованного выбора материала необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования, в частности по определению модуля внутреннего трения полиуретановых эластомеров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manuel Valero F. Preparation and Properties of Polyurethanes based on Castor Oil Chemically Modified with Yucca Starch Glycoside. // Journal of Elastomers and Plastics. 2009. No. 41. Pp.223-244.
2. Maity M. Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent. // Journal of Elastomers and Plastics. 2001. No. 33. Pp.211-224.
3. Kahraman H., Haberstroh E. Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt. // Gummi, Fasern. Kunststoffe. 2014. No. 5. Pp. 296-298.
4. Gonella L. B. New Reclaiming Process of Thermoset Polyurethane Foam and Blending with Polyamide-12 and Thermoplastic Polyurethane. // Journal of Elastomers and Plastics. 2009. No. 41. Pp. 303-322.
5. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и проектирование резиновых изделий. Л.: Химия, 1977. 408 с.
6. Крыжановский, В.К. Пластмассовые детали технических устройств / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов. – Санкт-Петербург : Издательство НОТ, - 2014. – 456с.
7. Hornig R., Klump U. Einfluss des Gough-Joule-Effekts auf die Spannungszustände in elastomeren Zylinderkörpern bei Druckbelastungen und Temperatur-zunahme unter Berücksichtigung seine rezeptur-bedingten Ausprägung. Gummi. Fasern. Kunststoffe. // 2015. No. 11. Pp. 58-65.
8. Резниковский, М.М. Механические испытания каучука и резины / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская. – М.: Химия, - 1968. – 489с.
9. Тобольский, А.С. Свойства и структура полимеров / А.С. Тобольский. – М.: Химия, - 1964. – 247с.
10. Janusz Datta, Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers / Janusz Datta // Journal of Elastomers and Plastics. - 2011. - № 43. - P. 529-541.
11. Райт, П. Полиуретановые эластомеры / П. Райт, А. Камминг. – М. : Химия, - 1973. – 304с.
12. Керча, Ю.Ю. Физическая химия полиуретанов / Ю.Ю. Керча. – Киев :Наукова думка, 1977. – 224с.
13. Пажина, П. Основные вопросы вязкоупругости / П. Пажина. – М.: Мир, - 1968. – 176с.
14. Yakovlev S.N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes // Russian Engineering Research. 2016. No. 4. Pp. 255-257.
15. Гуревич, Л.Б. Механика полимеров /Л.Б. Гуревич. – М. : Химия, 1974. – 283с.
16. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров /В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнов. – М. : Высшая школа, 1972. – 320с.
17. Яковлев С.Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 176 с.

### REFERENCES

1. Manuel Valero F. Preparation and Properties of Polyurethanes based on Castor Oil Chemically Modified with Yucca Starch Glycoside. // Journal of Elastomers and Plastics. 2009. No. 41. Pp.223-244.
2. Maity M. Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane

Grafting Agent. // Journal of Elastomers and Plastics. 2001. No. 33. Pp.211-224.

3. Kahraman H., Haberstroh E. Einfluss von aktiven Fullstoffen in Elastomeren auf den anisotropen Mullins-Effekt. Anisotroper Mullins-Effekt. // Gummi. Fasern. Kunststoffe. 2014. No. 5. Pp. 296-298.

4. Gonella L. B. New Reclaiming Process of Thermoset Polyurethane Foam and Blending with Polyamide-12 and Thermoplastic Polyurethane. // Journal of Elastomers and Plastics. 2009. No. 41. Pp. 303-322.

5. Lepetov V.A., YUrcev L.N. Raschety i proektirovanie rezinovyh izdelij. L.: Himiya, 1977. 408 s.

6. Kryzhanovskij, V.K. Plastmassovye detali tekhnicheskikh ustroystv / V.K. Kryzhanovskij, V.V. Burlov. – Sankt-Peterburg : Izdatel'stvo NOT, - 2014. – 456s.

7. Hornig R., Klump U. Einfluss des Gough-Joule-Effekts auf die Spannungszustände in elastomeren Zylinderkörpern bei Druckbelastungen und Temperaturzunahme unter Berücksichtigung seiner rezepturbedingten Ausprägung. Gummi. Fasern. Kunststoffe. // 2015. No. 11. Pp. 58-65.

8. Reznikovskij, M.M. Mekhanicheskie ispytaniya kauchuka i reziny / M.M. Reznikovskij, A.I. Lukomskaya. – M.: Himiya, - 1968. – 489s.

9. Tobol'skij, A.S. Svojstva i struktura polimerov / A.S. Tobol'skij. – M.: Himiya, - 1964. – 247s.

10. Janusz Datta, Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers / Janusz Datta // Journal of Elastomers and Plastics. - 2011. - № 43. - P. 529-541.

11. Rajt, P. Poliuretanovye ehlastomery / P. Rajt, A. Kamming. – M. : Himiya, - 1973. – 304s.

12. Kercha, YU.YU. Fizicheskaya himiya poliuretanov / YU.YU. Kercha. – Kiev :Naukova dumka, 1977. – 224s.

13. Pazhina, P. Osnovnye voprosy vyazkouprugosti / P. Pazhina. – M.: Mir, - 1968. – 176s.

14. Yakovlev S.N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes // Russian Engineering Research. 2016. No. 4. Pp. 255-257.

15. Gurevich, L.B. Mekhanika polimerov /L.B. Gurevich. – M. : Himiya, 1974. – 283s.

16. Gul', V.E. Struktura i mekhanicheskie svojstva polimerov /V.E. Gul', V.N. Kuleznov. – M. : Vys-shaya shkola, 1972. – 320s.

17. YAKovlev S.N. Proektirovanie i osnovy tekhnologii detalej mashin iz poliuretana. SPb.: Reno-me, 2013. 176 s.

Поступило в редакцию 04.10.2018

Received 04 October 2018