

УДК 544.032.2

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-883-887

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОМЕРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР

А.С. Степашкина^a, Е.А. Шахова^b, О.А. Москалюк^c, О.В. Чупринова^a, Е.С. Цобкалло^c

^a Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

^b Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

^c Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация

Адрес для переписки: Stepashkina.anna@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 17.09.20, принята к печати 26.10.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Степашкина А.С., Шахова Е.А., Москалюк О.А., Чупринова О.В., Цобкалло Е.С. Прогнозирование механических свойств одномерных полимерных структур // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 883–887. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-883-887

Аннотация

Предмет исследования. Представлена методика прогнозирования механических свойств полимерных материалов. Предложено уравнение для высокоэластичной части деформации в дифференциальном виде для одномерных полимерных структур, в котором установлено несущественное влияние предшествующих механических воздействий на деформационные свойства материалов. **Метод.** Предложен рекуррентный метод решения предложенного дифференциального уравнения, не интегрируемого в квадратурах. Экспериментально исследованы диаграммы растяжения для волокон из высокоориентированных полимеров (полиамида и полиэтилентерефталата) в пяти режимах нагружения. Первый режим заключался в равномерном нагружении волокон до разрыва, в остальных случаях нагружение проводилось в три этапа: с выдержкой в контрольных точках, полном разгрузке и последующем нагружении до разрыва. **Основные результаты.** Предложено и решено уравнение для высокоэластичной части деформации в дифференциальном виде. Представлены экспериментальные диаграммы растяжения одномерных полимерных образцов из полиамида и полиэтилентерефталата до разрывных значений при различных режимах нагружения. Установлено, что предшествующие на образцы механические воздействия не оказывают существенного влияния на деформационные свойства. Показано, что образцы из полиамида и полиэтилентерефталата практически не обладают памятью, таким образом, высокоэластичная часть деформации релаксирует в устойчивое состояние. **Практическая значимость.** Показано, что в равновесии, вне зависимости от способа деформирования, каждому уровню механического напряжения соответствует некоторое значение равновесной деформации, для фиксированной деформации существует фиксированное значение напряжения. Результаты моделирования позволяют прогнозировать поведение полимерных материалов при различных режимах эксплуатации.

Ключевые слова

моделирование деформационных свойств, полимерные материалы, механические свойства, уравнение наследственного типа, нормированный арктангенс логарифма

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-883-887

PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES FOR ONE-DIMENSIONAL POLYMER STRUCTURES

A.S. Stepashkina^a, E.A. Shakhova^b, O.A. Moskalyuk^c, O.V. Chuprinova^a, E.S. Tsobkallo^c

^a Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

^b Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

^c Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation

Corresponding author: Stepashkina.anna@yandex.ru

Article info

Received 17.09.20, accepted 26.10.20

Article in Russian

For citation: Stepashkina A.S., Shakhova E.A., Moskalyuk O.A., Chuprinova O.V., Tsobkallo E.S. Prediction of mechanical properties for one-dimensional polymer structures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 883–887 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-883-887

Abstract

Subject of Research. The paper presents a technique for prediction of the mechanical properties of polymer materials. An equation is proposed for the highly elastic part of deformation in a differential-mode for one-dimensional polymer structures. The equation establishes that the preceding mechanical impact on deformation material properties is irrelevant. **Method.** A recursive method for solution of the proposed differential equation not integrable in quadratures was proposed. Tensile diagrams were experimentally obtained for fibers made of highly oriented polymers such as polyamide and polyethylene terephthalate in five loading conditions. The first load consisted in uniform loading of the fiber to rupture. In the other cases, the loading was carried out in three stages: with holding at control points, complete unloading and subsequent loading to rupture. **Main Results.** An equation for the highly elastic part of the deformation in a differential form is proposed and solved. Tensile diagrams are presented for one-dimensional polymer samples made of polyamide and polyethylene terephthalate up to the rupture values under various loading conditions. It is found that the preceding mechanical impacts do not affect significantly on the sample deformation properties. Samples made of polyamide and polyethylene terephthalate have practically no memory. Thus, the highly elastic part of the deformation relaxes into a stable state. **Practical Relevance.** The research shows that in an equilibrium state (regardless of the deformation method) each level of mechanical stress corresponds to a certain value of the equilibrium deformation; for a fixed deformation there is a fixed value of stress. The modeling results make it possible to predict the behavior of polymer materials under various operating conditions.

Keywords

deformation properties modeling, polymeric materials, mechanical properties, hereditary type equation, logarithm normalized arctangent

Введение

Синтетические полимеры широко применяются в различных отраслях промышленности: текстильной и авиационной, машиностроении и электроэнергетике, и т. д. Особое внимание уделяется эластомерам, из них изготавливают ткани, канаты, парашютные стропы, детали машин и аппаратов, целый ряд других изделий, ассортимент которых определяется потребностью промышленности. Такое широкое применение синтетических полимеров требует детального изучения их физико-механических свойств [1–5].

Полимеры обладают широким спектром молекулярных и надмолекулярных структур, отличных от низкомолекулярных соединений. В общем случае деформацию полимерного материала можно представить в виде упругой части деформации $\epsilon_{упр}$ и высокоэластичной части деформации, связанной с перестройками макромолекул.

Для описания деформационных свойств эластомеров воспользуемся новой физической интерпретацией метода прогнозирования нормированного арктангенса логарифма (НАЛ). В основе метода НАЛ лежит принцип Больцмана–Вольтерра, согласно которому деформация ϵ и механическое напряжение σ однозначно определяются системой:

$$\begin{cases} \epsilon(t) = D_0\sigma + (D_\infty - D_0)\int_0^t \psi'_{\sigma t}(\theta)d\theta \\ \sigma(t) = E_0\epsilon + (E_\infty - E_0)\int_0^t \psi'_{\epsilon t}(\theta)d\theta \end{cases}, \quad (1)$$

где $D_0 = \frac{1}{E_0}$ — упругая податливость; D_∞ — податливость в условии равновесия; E_0 — модуль упругости; E_∞ — модуль вязкой упругости.

Функция $\psi_{\epsilon t}$, согласно представлению НАЛ [6, 7], имеет вид

$$\psi_{\epsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{b_\epsilon} \ln \frac{t}{\tau_\epsilon}\right),$$

где τ_ϵ — время релаксации, зависящее от деформации ϵ ; b_ϵ — структурный параметр (константа материала), а функция $\psi_{\sigma t}$ представлена в виде:

$$\psi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{b_\sigma} \ln \frac{t}{\tau_\sigma}\right),$$

где τ_σ — время запаздывания, зависящее от нагрузки σ ; b_σ — константа материала [6, 7].

Благодаря удобству ядер $\psi'_{\epsilon t}$ и $\psi'_{\sigma t}$, которое состоит в их одинаковой форме, для различных режимов деформации с позиции барьерной теории в работах [8, 9] было предложено обобщенное уравнение наследственного типа для высокоэластичной части деформации.

Выделяя отдельно высокоэластичную часть деформации системы уравнений (1) для случаев, когда действуют деформационно-временная и сило-временная аналогии, можно представить в одинаковой форме [8, 9].

Таким образом, уравнение наследственного типа для высокоэластичной части деформации следующее:

$$z(t) = \int_0^t z_p(t-s)\psi'_{z_p s} ds, \quad (2)$$

где $z(t) = z_p \psi_{z_p t}$.

Причем $z(t) = \epsilon - x$, согласно барьерной теории [8, 9], и есть высокоэластичная часть деформации, которая вызвана перестройкой различных групп макромолекул. При этом $z_p(t)$ означает равновесное значение высокоэластичной части деформации.

Релаксационную функцию $\psi_{z t}$, согласно НАЛ [1–3], представим в виде

$$\psi_{z_p t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{b_z} \ln \frac{t}{\tau_z}\right),$$

где константа b_z зависит от свойств исследуемого материала.

Данное уравнение позволяет прогнозировать поведение полимерных материалов в различных режимах эксплуатации.

Решение уравнения наследственного типа

Согласно барьерной теории, функция z , представленная в формуле (2), есть типичный релаксационный процесс, т. е. стремление к термодинамическому равновесию, определяемый равновесной диаграммой растя-

жения, для которого исторический фактор не является существенным. Иначе говоря, способ нагружения никак не влияет на конечное равновесное состояние.

Для решения такой задачи в силу нелинейности авторами предложено перейти от интегральной формы к дифференциальной. В случае, если рассматривается произвольный режим нагружения (нагрузка, разгрузка и т. д.), задача сводится к решению дифференциального уравнения, не интегрируемого в квадратурах. Согласно релаксационной теории, с учетом равенства (1)

$$dz = z_p \varphi(z_p, t) dt,$$

где $\varphi(t) = \frac{d\psi}{dt}$.

Из равенства (2) получим

$$t = \tau_p e^{-bctg\pi\psi}.$$

Таким образом, можно сказать, что

$$\varphi(t) = \psi'_t = \frac{e^{bctg\pi\psi} \sin^2 \pi\psi}{\pi \tau_p b}.$$

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать компьютерное моделирование [10].

Вспользуемся рекурсивным алгоритмом и распишем значения, необходимые для запуска цикла:

— для нулевого индекса:

$$\begin{aligned} z_p[0] &= \varepsilon[0] - x[0], \\ \psi[0] &= \frac{\varepsilon_0 - x[0]}{z_p[0]}, \\ \varphi[0] &= \frac{1}{\pi b} \frac{1}{\tau_p} \sin^2(\pi\psi[0]) e^{bctg(\pi\psi[0])}; \end{aligned}$$

— для единичного:

$$\begin{aligned} z_p[1] &= z_p[0] \Delta t \varphi[0], \\ z_p[1] &= \varepsilon[1] - x[1], \\ \psi[1] &= \frac{z_p[1]}{z_p[1]}, \\ \varphi[1] &= \frac{1}{\pi b} \frac{1}{\tau_p} \sin^2(\pi\psi[1]) e^{bctg(\pi\psi[1])}, \\ z_p[2] &= z_p[1] \Delta t \varphi[1]. \end{aligned}$$

Сформируем цикл по параметру i :

$$\begin{aligned} z_p[i-1] &= \varepsilon[i-1] - x[i-1], \\ \psi[i-1] &= \frac{z_p[i-1]}{z_p[i-1]}, \\ \varphi[i-1] &= \frac{1}{\pi b} \frac{1}{\tau_p} \sin^2(\pi\psi[i-1]) e^{bctg(\pi\psi[i-1])}, \\ z_p[i] &= z_p[i-1] \Delta t \varphi[i-1]. \end{aligned}$$

После цикла определяются значения для $i = n$

$$\begin{aligned} z_p[n] &= \varepsilon[n] - x[n], \\ \psi[n] &= \frac{z_p[n]}{z_p[n]}, \end{aligned}$$

$$\varphi[n] = \frac{1}{\pi b} \frac{1}{\tau_p} \sin^2(\pi\psi[n]) e^{bctg(\pi\psi[n])}.$$

Решение задачи предполагает существование равновесной квазистатической диаграммы растяжения, а также отсутствие памяти, в отличие от интегрального уравнения наследственного типа в соответствии с принципом Больцмана–Вольтера.

Результаты экспериментального исследования

В работе проведена серия экспериментов, в которых подтверждено несущественное влияние предшествующих воздействий на деформационные свойства материалов. Показано, что конечное состояние не зависит ни от скорости нагружения, ни от вида процесса (равномерное нагружение, изометрическая релаксация напряжения, ползучесть и т. д.).

В качестве объекта исследования выбраны высокоориентированные волокна из полиамида и полиэтилентерефталата, которые можно моделировать как одномерные структуры. Моделирование релаксационных процессов для одномерных структур является наиболее простой задачей.

Измерения выполнены на универсальной установке Instron 1122 в режиме нагружения. Основная задача эксперимента состояла в определении влияния способа нагружения на деформационные свойства материала. Установка работала в следующем режиме: рабочий режим нагружения (масштаб на бумаге) — 200 Н; 20 % масштаба листа; скорость — 100 мм/мин; длина образца — 200 мм. Установка Instron 1122 позволяет получать в графическом виде диаграммы растяжения. Проведена серия измерений в пяти режимах. В каждом случае волокна доводились до разрыва.

Первый режим испытания (режим испытания 1) состоял в растяжении волокна до разрыва без предварительных деформаций. По этим данным были установлены разрывные нагрузки, а также выбраны режимы нагружений для других экспериментов. Выбраны четыре контрольные точки нагружения — 20, 50, 70, 96 Н.

Во втором эксперименте (режим испытания 2) образец равномерно нагружался. В контрольных точках 20, 50, 70 и 96 Н делалась пауза на 5 мин. После этого образец разгружался, а затем равномерно, как в первом эксперименте, нагружался до разрыва.

В третьем эксперименте (режим испытания 3) образец равномерно нагружался до значения 96 Н, при этой нагрузке выдерживался 5 мин, а затем равномерно разгружался. При этом в контрольных точках 70, 50, 20 Н делалась пауза. После полного снятия нагрузки образец вновь нагружался до разрыва.

В четвертом эксперименте (режим испытания 4) образец нагружался скачкообразно с пятиминутной выдержкой в контрольных точках 20, 70, 50, 96 Н. Аналогичным образом после полной разгрузки образец вновь нагружался до разрыва.

В пятом эксперименте (режим испытания 5) образец равномерно нагружался до значения 96 Н, выдерживался 5 мин, а затем разгружался скачкообразно с пятиминутной выдержкой в контрольных точках 50,

70, 20 Н. После полной разгрузки образец нагружался до разрыва.

Полученные диаграммы нагружения до разрыва для всех пяти экспериментов для полиэтилентерефталата и полиамида приведены на рис. 1 и 2.

Стоит отметить, что разрывное напряжение для разных видов нагружения отличается. Это обусловлено молекулярным строением полимерных материалов. Для ориентированных полимеров характерно наличие двух фаз: упорядоченной (кристаллической) и неупорядочен-

ной (аморфной). При этом не существует четких границ между кристаллическими и аморфными областями. Надмолекулярная структура ориентированных полимеров может быть различной, однако, для синтетических нитей и волокон чаще всего имеет место фибриллярное строение [11–13]. Механические свойства ориентированных полимерных материалов, как правило, определяются строением неупорядоченной фазы.

В кристаллических полимерах практически всегда имеется доля аморфной фазы, часто встречаются дефекты, дислокации [2, 11, 12]. Нарушение кристаллических зон приводит к упрочнению материалов и увеличению разрывного напряжения.

При одинаковом уровне деформации с разными режимами нагружения получаем одно и то же значение механического напряжения. Таким образом, можно говорить о том, что образец из полиамида или полиэтилентерефталата практически не обладает памятью, т. е. прошлое образца незначительно влияет на равновесное состояние материала, а именно, существует равновесная диаграмма растяжения. Можно сказать, что высокоэластичная часть деформации релаксирует в некоторое устойчивое состояние, определяемое равновесной диаграммой растяжения.

Заключение

Для любого процесса деформирования (ползучесть, релаксация механического напряжения и т. д.) система стремится к некоторому равновесному состоянию, определяемому равновесной диаграммой растяжения. В работе предложено релаксационное дифференциальное уравнение (2), не интегрируемое в квадратурах, которое позволяет прогнозировать механические свойства при заданной равновесной (квазистатической) диаграмме растяжения с помощью рекуррентного решения с применением методов компьютерного моделирования. Решение предполагает, что прошлое образца незначительно влияет на равновесное состояние материала, таким образом образцы не обладают памятью.

Экспериментально этот факт подтвержден для одномерных образцов из полиамида и полиэтилентерефталата. Показано, что образцы практически не обладают памятью, т. е. предыдущие воздействия не оказывают существенного влияния на деформационные свойства, и высокоэластичная часть деформации релаксирует в некоторое устойчивое состояние, определяемое равновесной диаграммой растяжения.

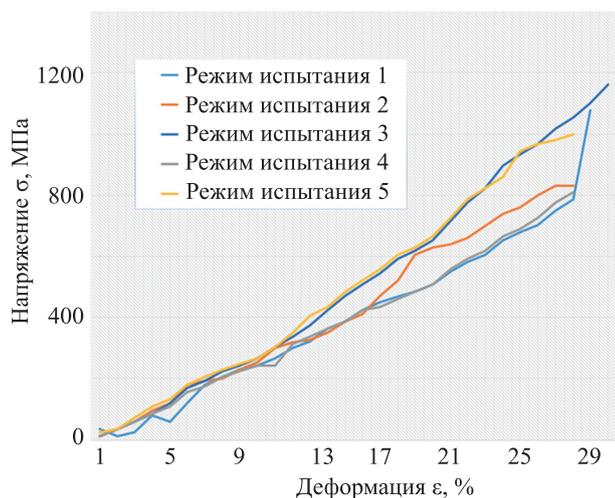


Рис. 1. Диаграммы нагружения полиэтилентерефталата

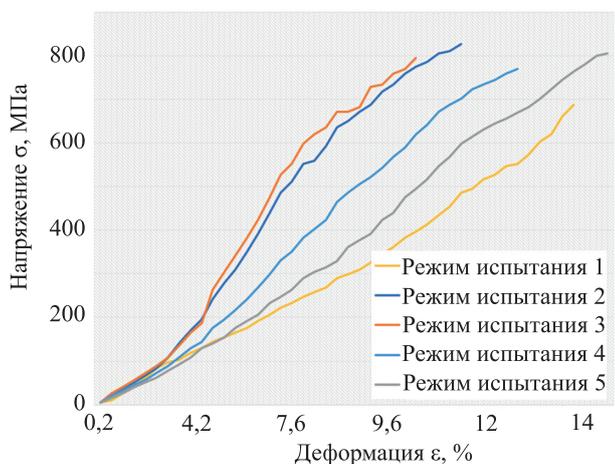


Рис. 2. Диаграммы нагружения полиамида

Литература

1. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы доверительного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2013. Т. 22. № 4. С. 32–34.
2. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы спектрально-временного анализа релаксационных и деформационных свойств полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Известия высших

References

1. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Basis of trust prediction of relaxation and deformation processes of polymer materials textile and light industry. *The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 32–34. (in Russian)
2. Makarov A.G., Pereborova N.V., Wagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. The basis of spectral-temporal analysis of relaxation and deformation properties of polymeric materials textile and light industry. *The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 19–23. (in Russian)

- учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2014. Т. 23. № 1. С. 19–23.
3. Горшков А.С., Макаров А.Г., Романова А.А., Рымкевич П.П. Моделирование деформационных процессов ориентированных полимеров на основе описания кинетики надмолекулярных структур, разделенных энергетическими барьерами // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 9(44). С. 75–83. doi: 10.5862/MCE.44.10
 4. Рымкевич П.П., Макаров А.Г., Горшков А.С. Описание физических законов на основе нового метода усреднения физических величин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия I: Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 3–7.
 5. Romanova A.A., Stalevich A.M., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S., Ginzburg B.M. A new phenomenon — amplitude-modulated free oscillations (beatings) in loaded, highly oriented fibers from semicrystalline polymers // Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics. 2007. V. 46B. N 3. P. 467–474. doi: 10.1080/00222340701257703
 6. Макаров А.Г. Математические методы анализа физико-механических свойств материалов легкой промышленности. СПб.: Изд-во СПГУТД, 2002. 248 с.
 7. Макаров А.Г., Демидов А.В. Методы математического моделирования механических свойств полимеров. СПб.: Изд-во СПГУТД, 2009. 392 с.
 8. Рымкевич П.П., Головина В.В., Макаров А.Г., Романова А.А., Шахова Е.А. Уравнение состояния материалов текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 34. № 4. С. 30–33.
 9. Рымкевич П.П. Разработка научных основ и методов прогнозирования термовязкоупругих свойств полимерных материалов текстильной и легкой промышленности: диссертация на соискание ученой степени доктор технических наук. СПб., 2018. 299 с.
 10. Степашкина А.С., Чупринова О.В., Шахова Е.А., Мишуря Т.П. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617478 «Прогнозирование механических свойств одномерных структур». Дата регистрации 08 июня 2020.
 11. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 575 с.
 12. Шур М.А. Высокомолекулярные соединения. М.: Высшая школа, 1981. 656 с.
 13. Рымкевич П.П., Сталевич А.М. Кинетическая теория конформационных переходов в полимерах // Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение. 1999. № 5. С. 52–57.
 3. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A., Rymkevich P.P. Modelling of directed polymers deformation processes based on the description of the kinetics of supramolecular structures separated by energy barriers. *Magazine of Civil Engineering*, 2013, no. 9(44), pp. 75–83. (in Russian). doi: 10.5862/MCE.44.10
 4. Rymkevich P., Makarov A., Gorshkov A. Performance of physical laws based on the new averaging method of physical values. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series I. Natural and technical science*, 2015, no. 4, pp. 3–7. (in Russian)
 5. Romanova A.A., Stalevich A.M., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S., Ginzburg B.M. A new phenomenon — amplitude-modulated free oscillations (beatings) in loaded, highly oriented fibers from semicrystalline polymers. *Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics*, 2007, vol. 46B, no. 3, pp. 467–474. doi: 10.1080/00222340701257703
 6. Makarov A.G. *Mathematical Analysis Methods for Physical and Mechanical Properties of Consumer Industry Material*. St. Petersburg, SPbSUITD Publ., 2002, 248 p. (in Russian)
 7. Makarov A.G., Demidov A.V. *Approaches for Mathematical Modeling of polymer Mechanical Properties*. St. Petersburg, SPbSUITD Publ., 2009, 392 p. (in Russian)
 8. Rymkevich P.P., Golovina V.V., Makarov A.G., Romanova A.A., Shahova E.A. Equation of condition for materials of textile and light industry. *The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 2016, vol. 34, no. 4, pp. 30–33. (in Russian)
 9. Rymkevich P.P. *Development of scientific foundations and prediction methods for the thermoviscoelastic properties of polymeric materials in the textile and consumer industry*. Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, St. Petersburg, 2018, 299 p. (in Russian)
 10. Stepashkina A.S., Chuprinova O.V., Shakhova E.A., Mishura T.P. *Software certificate of registration “Prediction of one-dimensional structure mechanical properties”*, no. 2020617478, 08.06.2020. (in Russian)
 11. Tager A.A. *Physical Chemistry of Polymers*. Moscow, Science World Publishing House, 2007, 575 p. (in Russian)
 12. Shur M.A. *High-Molecular Weight Compounds*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1981, 656 p. (in Russian)
 13. Rymkevich P.P., Stalevich A.M. Kinetic Theory of Conformational Transitions in Polymers. *Fiziko-Himija Polimerov: sintez, Svoystva i Primenenie*, 1999, no. 5, pp. 52–57. (in Russian)

Авторы

Степашкина Анна Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, Scopus ID: 55605720600, ORCID: 0000-0003-3326-0776, Stepashkina.anna@yandex.ru

Шахова Екатерина Анатольевна — преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4637-6153, rinagrts2012@mail.ru

Москалюк Ольга Андреевна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация, Scopus ID: 55340207000, ORCID: 0000-0002-1057-5989, olga-moskalyuk@mail.ru

Чупринова Ольга Витальевна — студент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3630-5995, chuprinova_o@mail.ru

Цобкалло Екатерина Сергеевна — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация, Scopus ID: 7801408090, ORCID: 0000-0002-4340-5695, tsobkallo@mail.ru

Authors

Anna S. Stepashkina — PhD, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, Scopus ID: 55605720600, ORCID: 0000-0003-3326-0776, Stepashkina.anna@yandex.ru

Ekaterina A. Shakhova — Lecturer, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4637-6153, rinagrts2012@mail.ru

Olga A. Moskalyuk — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation, Scopus ID: 55340207000, ORCID: 0000-0002-1057-5989, olga-moskalyuk@mail.ru

Olga V. Chuprinova — Student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3630-5995, chuprinova_o@mail.ru

Ekaterina S. Tsobkallo — D.Sc., Professor, Head of Chair, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation, Scopus ID: 7801408090, ORCID: 0000-0002-4340-5695, tsobkallo@mail.ru