

УДК 539.434:677.494

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ  
ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПАРАШЮТОСТРОЕНИЯ\***

**COMPUTER MODELING AND QUALITATIVE ANALYSIS  
OF THE DEFORMATION-RELAXATION PROPERTIES  
OF POLYMERIC MATERIALS FOR PARACHUTING**

*А.Г. МАКАРОВ, В.В. МАКСИМОВ, А.С. КОНОВАЛОВ,  
А.А. КОЗЛОВ, В.И. ВАГНЕР, Е.К. ВАСИЛЬЕВА*

*A.G. MAKAROV, V.V. MAKSIMOV, A.S. KONOVALOV,  
A.A. KOZLOV, V.I. WAGNER, E.K. VASILEVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
Концерн "ОКЕАНПРИБОР",  
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design,  
Concern "OCEANPRIBOR",  
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation)

E-mail: makvin@mail.ru; wmaximov@mail.ru; a\_konovalov@crynet.ru; aakozlov92@mail.ru; wagnerv@mail.ru;  
vasilevaelizaveta2@gmail.com

*В основе разрабатываемых методов компьютерного моделирования и качественного анализа деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов для парашютостроения лежит математическое моделирование и системный анализ вязкоупругих процессов полимеров. Решение задачи качественного анализа деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов для парашютостроения позволит улучшить эксплуатационные характеристики отечественных парашютных систем, повысить их безопасность и функциональность.*

*The developed methods of computer modeling and a qualitative analysis of the deformation-relaxation properties of polymer materials for parachuting are based on mathematical modeling and system analysis of viscoelastic polymer processes. The solution of the problem of a qualitative analysis of the deformation-relaxation properties of polymer materials for parachuting will improve the operational characteristics of domestic parachute systems, increase their safety and functionality.*

\* Работа финансировалась в рамках выполнения гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 18-31-00186.

**Ключевые слова:** парашютостроение, деформационно-релаксационные процессы, компьютерное моделирование, качественный анализ, полимерные материалы.

**Keywords:** parachuting, deformation-relaxation processes, computer modeling, qualitative analysis, polymeric materials.

Одной из основных частей парашютных систем являются парашютные стропы. Они представляют собой текстильные изделия в виде плетеных шнуров и тканых лент, изготовленных из полимерных нитей, различного компонентного состава, различной плотности и различной структуры. Парашюты применяются не только для спуска людей и техники, но и для торможения самолетов при посадке, космических приземляемых аппаратов и др. Поэтому задача исследования их эксплуатационных характеристик и повышения надежности парашютных систем является актуальной.

Для оценки качественных характеристик эксплуатационных свойств парашютных строп необходим всесторонний системный анализ, который может быть проведен на основе применения инновационных компьютерных технологий – начиная со стадии проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных и заканчивая анализом компьютерных расчетов и подведения итогов исследования.

Исследуемые деформационные свойства парашютных строп могут существенным образом зависеть от таких факторов, как влияние изменения температуры, влажности, других погодных условий, а также чередования величин и длительностей механических нагрузок. Влияние этих факторов зачастую осуществляется на протяжении кратковременных процессов, так как спускаемый на парашюте объект за достаточно малый промежуток времени проходит разные температурные и атмосферные слои. Кроме того, парашютные стропы в процессе эксплуатации подвергаются значительным нагрузкам в течение малых времен. При этом, в целях обеспечения безопасности, целесообразно ограничить максимальную эксплуатационную нагрузку значением в 30% от разрывного усилия [1...4].

Большое разнообразие современных полимерных материалов для изготовления парашютных строп так же, как и разработка новых типов парашютных систем, дает импульс к поиску новых и совершенствованию известных методов математического моделирования их деформационно-релаксационных свойств, так как все это способствует повышению достоверности прогнозирования деформационно-релаксационных процессов, что, в свою очередь, способствует повышению надежности парашютов и улучшению их качественных эксплуатационных характеристик [5...8].

Основными задачами предлагаемого исследования являются:

- разработка методов математического моделирования деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп;
- качественная оценка деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп;
- сравнительный анализ и технологический отбор полимерных парашютных строп, обладающих наилучшими эксплуатационными и функциональными характеристиками.

В качестве образцов материалов для парашютостроения исследовались парашютные стропы, изготовленные из полимерных нитей: капрон (ООО НПП «Текстор», Казань), кевлар (OPALE PARAMODELS, Франция), микролайн (Honeywell, США), дайнема (DSM, Нидерланды), технора (LIROS, Германия), дакрон (TEXLON, США).

На стадии предварительного изучения деформационно-релаксационных свойств изучаемых парашютных строп и образующих

их полимерных нитей проводилось математическое моделирование релаксации напряжения и ползучести указанных материалов на основе математических моделей релаксации [9...11]:

$$E_t = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_t \quad (1)$$

$$\varphi_t = \left(1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^A\right)^{-1} = \left(1 + \exp\left(-A \ln \frac{t}{\tau}\right)\right)^{-1} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th}\left(\frac{A}{2} \ln \frac{t}{\tau}\right)\right). \quad (3)$$

Параметрами модели (1) при описании модуля релаксации

$$E_t = \sigma_t / \varepsilon \quad (4)$$

являются два его асимптотических значения:

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_t, \quad E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_t, \quad (5)$$

функция времен релаксации  $\tau = \tau_\varepsilon$  и характеристика интенсивности релаксации  $A = A_\varepsilon$ .

Аналогично параметрами модели (2) при описании податливости

$$D_t = \varepsilon_t / \sigma \quad (6)$$

являются два ее асимптотических значения:

$$D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_t, \quad D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} D_t, \quad (7)$$

функция времен запаздывания  $\tau = \tau_\sigma$  и характеристика интенсивности ползучести  $A = A_\sigma$ .

Здесь  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $t$  – время.

Для удобства практического использования математические модели (1) и (2) были упрощены за счет перехода от функций времен релаксации и времен запаздывания к их средним значениям в виде соответствующих констант, определяющих среднее релаксационное время [12...14]:

$$\bar{\tau}_\varepsilon = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon d\varepsilon \quad (8)$$

и ползучести

$$D_t = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_t \quad (2)$$

с нормированной дробно-степенной функцией  $\varphi_t$ , которая может быть представлена в виде гиперболического тангенса (ГТ):

и среднее время запаздывания

$$\bar{\tau}_\sigma = \sigma_0 / (\sigma_2 - \sigma_1) \int_{\sigma_1/\sigma_0}^{\sigma_2/\sigma_0} \tau_\sigma d\frac{\sigma}{\sigma_0}. \quad (9)$$

Здесь  $\varepsilon_1$  и  $\sigma_1$  – наименьшие значения деформации и напряжения из соответствующих интервалов исследуемых деформаций и напряжений;  $\varepsilon_2$  и  $\sigma_2$  – наибольшие значения из соответствующих интервалов исследуемых деформаций и напряжений;  $\sigma_0$  – нормирующая константа.

Такое упрощение математических моделей релаксации и ползучести является оправданным, так как нас интересуют прежде всего качественные характеристики эксплуатационных свойств парашютных строп и образующих их полимерных нитей. Вместе с тем, указанная модификация математических моделей (1) и (2) существенно упрощает их практическое применение [15...18].

Выбор в качестве основы математических моделей релаксации и ползучести парашютных строп и образующих их полимерных нитей функции ГТ не случаен, так как вероятностное распределение, задаваемое этой функцией является достаточно близким по своим свойствам к нормальному распределению, но, вместе с тем, функция ГТ – элементарная функция, что нельзя сказать об интегральной функции нормального распределения. Все это заметно упрощает аналитические преобразования с математическими моделями (1) и (2).

Предложенные для математического моделирования релаксации и ползучести полимерных строп и образующих их нитей

модифицированные модели (1) и (2) являются инструментом как для прогнозирования деформационно-релаксационных процессов указанных материалов, так и для построения методик качественной оценки их эксплуатационных характеристик.

Расчетное прогнозирование релаксационных и деформационно-релаксационных процессов полимерных парашютных строп проводилось на основе определяющих интегральных уравнений Больцмана-Вольтера [19...23]:

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \varphi'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta, \quad (10)$$

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_\infty - D_o) \int_0^t \sigma_\theta \varphi'_{\sigma; t-\theta} d\theta, \quad (11)$$

где ядро релаксации  $\varphi'_{\varepsilon t}$  и ядро ползучести  $\varphi'_{\sigma t}$  выбираются на основе модифицированных во второй главе математических моделей релаксации и ползучести [24...27]:

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{A_\varepsilon}{4} \frac{1}{\operatorname{ch}^2(W_{\varepsilon t})} \frac{1}{t} = \frac{A_\varepsilon}{4} (1 - \operatorname{th}^2(W_{\varepsilon t})) \frac{1}{t} = A_\varepsilon \varphi_{\varepsilon t} (1 - \varphi_{\varepsilon t}) \frac{1}{t}, \quad (12)$$

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{A_\sigma}{4} \frac{1}{\operatorname{ch}^2(W_{\sigma t})} \frac{1}{t} = \frac{A_\sigma}{4} (1 - \operatorname{th}^2(W_{\sigma t})) \frac{1}{t} = A_\sigma \varphi_{\sigma t} (1 - \varphi_{\sigma t}) \frac{1}{t}, \quad (13)$$

где аргументы-функционалы  $W_{\varepsilon t}$  и  $W_{\sigma t}$  имеют вид:

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{A_\varepsilon}{2} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right), \quad (14)$$

$$W_{\sigma t} = \frac{A_\sigma}{2} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{A_\sigma}{2} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right). \quad (15)$$

Еще одним преимуществом использования функции (3) для математического моделирования релаксации и ползучести состоит в том, что производные от нее рекуррентным образом выражаются через саму эту функцию, что существенно упрощает аналитические преобразования [28...31].

Расчетное прогнозирование релаксационных и деформационно-релаксационных процессов изучаемых материалов позволяет в динамике оценить функциональные и эксплуатационные свойства полимерных парашютных строп.

Разработанные математические модели релаксационных и деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп целесообразно использовать на стадии их проектирования с целью повышения надежности и расширения функциональной применимости парашютов [32...37].

Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационно-релаксационных свойств

полимерных парашютных строп служат основой для практического внедрения компьютерных технологий в процесс их проектирования.

Разработанная методика качественной оценки деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов позволяет выявить наиболее перспективные материалы для изготовления парашютных строп и провести их сравнительный анализ [38...42].

## ВЫОДЫ

1. Параметры разработанных математических моделей релаксации и ползучести полимерных парашютных строп позволяют оценивать деформационные свойства указанных материалов.

2. Разработанные на основе математического моделирования релаксации и ползучести полимерных парашютных строп компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ целесообразно применять на стадиях проектирования и исследования деформационно-релаксационных свойств указанных материалов.

3. На основе математического моделирования релаксации и ползучести полимерных парашютных строп разработана методика качественной оценки деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп.

4. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационно-релаксационных свойств парашютных строп являются инструментом для проведения сравнительного анализа эксплуатационных возможностей указанных материалов и осуществления целенаправленного отбора наилучших образцов из указанных материалов.

5. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационно-релаксационных свойств полимерных парашютных строп служат основой для практического внедрения компьютерных технологий в процесс их проектирования.

6. Разработанная методика качественной оценки деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов позволяет выявить наиболее перспективные материалы для изготовления парашютных строп и провести их сравнительный анализ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 2. С.12...16.

2. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 8...13.

3. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования процессов деформирования синтетических нитей // Химические волокна. – 2001, № 4. С.67...69.

4. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы уточнения и контроля прогнозируемых состояний синтетических материалов // Химические волокна. – 2001, № 5. С. 58...61.

5. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Определение вязкоупругих характеристик на примере полиакрилонитрильной нити // Химические волокна. – 2001, № 6. С. 68...70.

6. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант спектров релаксации и запаздывания у аморфно-кристаллических синтетических нитей // Химические волокна. – 2002, № 3. С. 52...55.

7. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Прогнозирование восстановительного деформационного процесса и обратной релаксации полимерных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С. 10...13.

8. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы компьютерного анализа вязкоупругости тех-

нических тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 3. С. 13...17.

9. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Компьютерное исследование вязкоупругости полимерных материалов // Химические волокна. – 2006, № 5. С. 38...43.

10. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Оптимизация выбора модели вязкоупругости синтетических нитей // Химические волокна. – 2006, № 6. С. 47...51.

11. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Критерии оптимального выбора математической модели вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5. С. 18 ...22.

12. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Компьютерное прогнозирование деформационно-релаксационных процессов текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С. 14...18.

13. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 1. С. 15...19.

15. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости полиэфирных нитей // Химические волокна. – 2007, № 1. С. 62...65.

16. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант математического моделирования деформационно-релаксационных процессов синтетических нитей // Химические волокна. – 2007, № 6. С. 49...52.

17. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. Т. 48, №5. С.147...157.

18. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов // Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 155...165.

19. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Демидов А.В., Вагнер В.И. Спектральный анализ релаксационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения // Химические волокна. – 2013, № 5. С. 44...47.

20. Головина В.В., Рымкевич П.П., Макаров А.Г., Романова А.А. Прогнозирование деформационно-релаксационных и релаксационных процессов в одноосно ориентированных полимерных материалах // Химические волокна. – 2013, № 6. С. 33...40.

21. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Разработка методики проведения сравнительного анализа деформационно-релаксационных и релаксационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 5. С. 48...58.

22. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Разработка методов математического моделирования процессов релаксации и ползучести полимерных нитей на основе их спектраль-

ной интерпретации // Химические волокна. – 2017, № 1. С. 69...73.

23. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Разработка критериев достоверности прогнозирования деформационно-релаксационных и релаксационных процессов полимерных материалов // Химические волокна. – 2017, № 2. С.59...63.

24. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А. Варианты математического моделирования и системного анализа механической релаксации и ползучести полимерных материалов // Химические волокна. – 2017, № 4. С. 46...51.

## REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelineynonasledstvennykh yader relaksatsii i zapazdyvaniya sinteticheskikh nitey // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, № 2. S.12...16.

2. Stalevich A.M., Makarov A.G. Variant spektra nasledstvenno-vyazkoupругoy relaksatsii sinteticheskikh nitey // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2000, № 3. S. 8...13.

3. Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant prognozirovaniya protsessov deformirovaniya sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2001, № 4. S. 67...69.

4. Makarov A.G., Stalevich A.M. Metody utochneniya i kontrolya prognoziруemykh sostoyaniy sinteticheskikh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2001, №5. S. 58...61.

5. Stalevich A.M., Makarov A.G. Opredelenie vyazkoupругikh kharakteristik na primere poliakrilonitril'noy niti // *Khimicheskie volokna.* – 2001, №6. S.68...70.

6. Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant spektrov relaksatsii i zapazdyvaniya u amorfno-kristallicheskikh sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2002, № 3. S. 52...55.

7. Makarov A.G., Stalevich A.M. Prognozirovanie vosstanovitel'nogo deformatsionnogo protsessa i obratnoy relaksatsii polimernykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2002, № 3. S. 10...13.

8. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Metody komp'yuternogo analiza vyazkoupругosti tekhnicheskikh tkaney // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2006, № 3. S. 13...17.

9. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Komp'yuternoe issledovanie vyazkoupругosti polimernykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2006, № 5. S. 38...43.

10. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Optimizatsiya vybora modeli vyazkoupругosti sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2006, № 6. S. 47...51.

11. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Kriterii optimal'nogo vybora matematicheskoy modeli vyazkoupругosti tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2006, № 5. S. 18 ...22.

12. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Komp'yuternoe prognozirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2007, № 2. S. 14...18.

13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Sistemnyy analiz vyazkoupругosti tekstil'nykh materialov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2007, № 1. S. 15...19.

15. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Sistemnyy analiz vyazkoupругosti poliefirnykh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2007, № 1. S. 62...65.

16. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant matematicheskogo modelirovaniya deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov sinteticheskikh nitey // *Khimicheskie volokna.* – 2007, № 6. S. 49...52.

17. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant prognozirovaniya nelineyno-nasledstvennoy vyazkoupругosti polimerov // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika.* – 2007. T. 48, №5. S. 147...157.

18. Makarov A.G., Demidov A.V., Stalevich A.M. Variant modelirovaniya nelineyno-nasledstvennoy vyazkoupругosti polimernykh materialov // *Mekhanika tverdogo tela.* – 2009, № 1. S. 155...165.

19. Makarov A.G., Pereborova N.V., Demidov A.V., Vagner V.I. Spektral'nyy analiz relaksatsionnykh svoystv polimernykh nitey amorfno-kristallicheskogo stroeniya // *Khimicheskie volokna.* – 2013, № 5. S. 44...47.

20. Golovina V.V., Rymkevich P.P., Makarov A.G., Romanova A.A. Prognozirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov v odnoosno orientirovannykh polimernykh materialakh // *Khimicheskie volokna.* – 2013, № 6. S. 33...40.

21. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Razrabotka metodiki provedeniya sravnitel'nogo analiza deformatsionno-relaksatsionnykh i relaksatsionnykh svoystv aramidnykh nitey i tekstil'nykh materialov na ikh osnove // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti.* – 2015, №5. S.48...58.

22. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya protsessov relaksatsii i polzuchesti polimernykh nitey na osnove ikh spektral'noy interpretatsii // *Khimicheskie volokna.* – 2017, №1. S.69...73.

23. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Razrabotka kriteriev dostovernosti prognozirovaniya deformatsionno-relaksatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov polimernykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2017, № 2. S. 59...63.

24. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Varianty matematicheskogo modelirovaniya i sistemnogo analiza mekhanicheskoy relaksatsii i polzuchesti polimernykh materialov // *Khimicheskie volokna.* – 2017, № 4. S. 46...51.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД. Поступила 11.02.19.