

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_205

**КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ***

**CORRECTION OF MATHEMATICAL MODEL PARAMETERS
OF POLYMERIC TEXTILE MATERIAL DEFORMATION PROCESSES
WITH THE PURPOSE OF INCREASING THE PREDICTION ACCURACY**

А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.М. ЛИТВИНОВ

A.V. DEMIDOV, A.G. MAKAROV, N.V. PEREBOROVA, A.M. LITVINOV

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: rector@sutd.ru; makvin@yandex.ru; nina1332@yandex.ru; litalmih@yandex.ru

Рассматриваются методы корректировки параметров математических моделей деформационных процессов полимерных текстильных материалов, повышающие точность их численного прогнозирования. Указанная корректировка параметров основана на применении критериев достоверности моделирования деформационных процессов этих материалов, полученных с использованием методов операционного исчисления к определяющим уравнениям деформационных процессов.

Methods for adjusting the mathematical model parameters of polymeric textile material deformation processes, which increase the accuracy of their numerical prediction, are considered. The specified adjustment of the parameters is based on the application of criteria for the reliability of modeling the deformation processes of these materials, obtained using the methods of operational calculus, to the governing equations of deformation processes.

Ключевые слова: компьютерное прогнозирование, математическое моделирование, полимерные текстильные материалы, деформационные процессы, релаксация, ползучесть.

Keywords: computer forecasting, mathematical modeling, polymer textile materials, deformation processes, relaxation, creep.

* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

Введение

Среди различных физико-механических характеристик полимерных текстильных материалов важное место занимают модуль релаксации и податливость, предназначенные как для сравнительного анализа эксплуатационных свойств материалов, так и для расчета их нагруженных состояний в широком диапазоне неразрушающей механической нагрузки и времени ее действия.

Сложившиеся представления о наследственном характере вязкоупругих свойств, проявляющихся в процессе деформирования полимерных текстильных материалов, определяют актуальность исследования этих процессов у различных материалов [1].

Вывод об активирующем характере воздействия приложенной механической нагрузки на среднестатистические времена релаксации или запаздывания подтвердился многочисленными измерениями и привел к соответствующей модификации уравнений Больцмана-Вольтерра [2].

При этом благодаря выбору физически обоснованных простейших ядер релаксации и запаздывания удалось добиться, во-первых, заметного упрощения уравнений состояния по сравнению с уравнениями, широко применяемыми в строительной механике [3], и, во-вторых, распространения этих уравнений на случай нелинейной вязкоупругости. Разработан ряд методик определения соответствующих характеристик [4].

Вместе с тем, вопрос об уточнении этих характеристик в связи с их интегральной спецификой продолжает представлять несомненный интерес для материаловедов, занимающихся анализом физико-механических свойств различных полимерных текстильных материалов с позиции физики полимеров [5].

Методы

В настоящей статье рассматриваются формулы, предназначенные для указанного контроля и уточнения, а также приводится пример их использования.

Рассмотрим уравнения теории наследственной вязкоупругости [6]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t + \int_0^t \varepsilon_\theta E'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta \quad (1)$$

для релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + \int_0^t \sigma_\theta D'_{\sigma;t-\theta} d\theta \quad (2)$$

для ползучести.

Здесь t – время; ε – деформация; σ – напряжение; $E_{\varepsilon t}$ – модуль релаксации; $D_{\sigma t}$ – податливость.

Уравнение (1) оказывается продуктивным в случаях, когда переменная величина деформации известна – например, при аналитическом описании или прогнозировании диаграммы растяжения. Уравнение (2) становится удобным, когда задается переменная величина напряжения. Напомним, что при $\sigma = \text{const}$ из (1) получается аналитическая взаимосвязь модуля и податливости [7]:

$$E_0 D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma\theta} E'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta = 1, \quad (3)$$

а при $\varepsilon = \text{const}$ из (2) получается аналогичная взаимосвязь:

$$D_0 \sigma_{\varepsilon t} + \int_0^t E_{\varepsilon\theta} D'_{\sigma;t-\theta} d\theta = 1. \quad (4)$$

С учетом $E_0 D_0 = E_\infty D_\infty = 1$ уравнение (2) можно переписать в виде:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - E_0 \int_0^t \sigma_\theta D'_{\sigma;t-\theta} d\theta,$$

и тогда совместно с (1) получается следующая взаимосвязь между ядрами уравнений (1) и (2) к условию эквивалентности этих уравнений:

$$-\int_0^t \varepsilon_\theta E'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta = E_0 \int_0^t \sigma_\theta D'_{\sigma;t-\theta} d\theta. \quad (5)$$

При $\varepsilon = \text{const}$ из (1) получается модуль релаксации:

$$\varepsilon^{-1} \sigma_{\varepsilon t} = E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{\varepsilon t} = E_0 (1 - (1-c) \varphi_{\varepsilon t}), \quad (6)$$

а при $\sigma = \text{const}$ из (2) получается податливость:

$$\sigma^{-1}\varepsilon_{\sigma t} = D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - E_0)\varphi_{\sigma t} = E_0^{-1}\left(1 + \frac{1-c}{c}\varphi_{\sigma t}\right), \quad (7)$$

где $c = E_{\infty}^+ E_0^{-1}$, $\varphi_{\sigma t} \in (0;1)$ и $\varphi_{\sigma t} \in (0;1)$ – нормированные функции [8].

Процессы релаксации (6) и ползучести (7) являются наиболее простыми. При $\varepsilon \neq \text{const}$ с помощью уравнения (1) процесс деформирования рассматривается как наследственная релаксация, а при $\sigma \neq \text{const}$ с помощью уравнения (2) процесс нагружения рассматривается как наследственная ползучесть [9].

С учетом (6) и (7) из (5) получается взаимосвязь между нормированными функциями:

$$\int_0^t \sigma_{\theta} \varphi'_{\sigma;t-\theta} d\theta = E_{\infty} \int_0^t \varepsilon_{\theta} \varphi'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta. \quad (8)$$

При $\sigma = \text{const}$ из (8) получаем для ползучести:

$$\phi_{\sigma t} = E_{\infty} \sigma^{-1} \int_0^t \varepsilon_{\sigma\theta} \varphi'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta = E_{\infty} \int_0^t D_{\sigma\theta} \varphi'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta, \quad (9)$$

а при $\varepsilon = \text{const}$ – для релаксации:

$$\phi_{\varepsilon t} = E_{\infty}^{-1} \varepsilon^{-1} \int_0^t \sigma_{\varepsilon\theta} \varphi'_{\sigma;t-\theta} d\theta = E_{\infty}^{-1} \int_0^t E_{\varepsilon\theta} \varphi'_{\sigma;t-\theta} d\theta. \quad (10)$$

Как из формулы (9), так и из формулы (10) получается, что при $t \ll \tau$, где τ – время релаксации или запаздывания [10]:

$$E_0 \varphi_{\sigma t} \approx E_{\infty} \varphi_{\varepsilon t},$$

то есть $\varphi_{\sigma t} \rightarrow c \varphi_{\varepsilon t} \rightarrow 0$, при $t \gg \tau$ $\varphi_{\varepsilon t} \rightarrow \varphi_{\sigma t} \rightarrow 1$.

В уравнении (8) отчетливо видна интегральная симметрия нормированных ядер релаксации и ползучести, содержащихся в уравнениях (1) и (2). Если воспользоваться свойствами интегральных сверток [11], то, учитывая, что $\varphi_{\sigma(0)} = 0$ и $\varphi_{\varepsilon(0)} = 0$, посредством интегрирования (8), получается также уравнение:

$$\int_0^t \sigma_{\theta} \varphi_{\sigma;t-\theta} d\theta = E_{\infty} \int_0^t \varepsilon_{\theta} \varphi_{\varepsilon;t-\theta} d\theta, \quad (11)$$

из которого видна симметрия соответствующих нормированных функций.

С учетом следующей взаимосвязи модуля упругости и податливости

$$E_{\infty} = E_{\infty}^{+0.5} D_{\infty}^{-0.5} = D_{\infty}^{-1}, \quad (12)$$

указанная симметрия с еще большей четкостью проявляется при символической записи сверток в уравнениях (8) и (11) [12]:

$$D_{\infty}^{0.5} \sigma_t \varphi'_{\sigma t} = E_{\infty}^{0.5} \varepsilon_t \varphi'_{\varepsilon t}, \quad (13)$$

$$D_{\infty}^{0.5} \sigma_t \varphi_{\sigma t} = E_{\infty}^{0.5} \varepsilon_t \varphi_{\varepsilon t}. \quad (14)$$

Продолжая пользоваться свойствами свертки, для выражений (3) и (4) получим идентичную символическую запись:

$$\frac{\partial}{\partial t} (D_{\sigma t} E_{\varepsilon t}) = 1 \quad (15)$$

для условия $\sigma = \text{const}$ либо $\varepsilon = \text{const}$, а проинтегрировав (15), получим в символическом виде:

$$D_{\sigma t} E_{\varepsilon t} = 1 \cdot t = t. \quad (16)$$

В (15) и (16) более отчетливо, чем в (3) и (4), видна определенная символическая симметрия модуля и податливости. При получении уравнения (3) из канонического уравнения (15) дифференцируется $E_{\varepsilon t}$, а при получении (4) в (15) дифференцируется $D_{\sigma t}$.

При использовании операционного исчисления [13], по аналогии с ситуацией линейной вязкоупругости, получается, что (1) и (2) приводятся к следующему символическому виду:

$$\sigma_t \cdot 1 = \varepsilon_t E_{\varepsilon t} \quad \text{и} \quad \varepsilon_t \cdot 1 = \sigma_t \cdot D_{\sigma t}, \quad (17)$$

и затем, в сочетании с (16), каждое из уравнений (17) приводится к одинаковому символическому виду:

$$\sigma_t \sigma_t D_{\sigma t} = \varepsilon_t \varepsilon_t E_{\sigma t}, \quad (18)$$

или

$$\{\sigma_t\} \{D_{\sigma t}\}^{0.5} = \{\varepsilon_t\} \{E_{\sigma t}\}^{0.5}, \quad (19)$$

где $\{\sigma_t\} = \int_0^{\infty} \sigma_t \exp(-pt) dt$, то есть σ_t – оригинал, $\{\sigma_t\}$ – его лапласово изображение в символическом виде [14].

Из получившегося совпадения "самостоятельных" записей (1) и (2) в виде (18) или (19) следует вывод об адекватности уравнений (1) и (2), несмотря на их индивидуальное появление [15].

При переходе от (1) и (2) к (18) или (19), от (3) и (4) к (15) или (16), от (8) к (11), (13) и (14) осуществлялись действия такие же, как и в случае линейной вязкоупругости.

Вместе с тем, подчеркнем, что при обратном ходе от (19) к (1) - (4), от (13) к (11) в рассматриваемой ситуации нелинейной вязкоупругости не следует пользоваться двойственным правилом дифференцирования интеграла-свертки, а именно следует дифференцировать переменные – модуль и податливость, исходя из специфики получения формул (1) и (2), как видно из вывода этих формул [16].

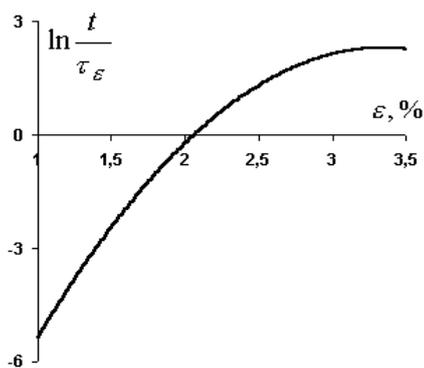


Рис. 1

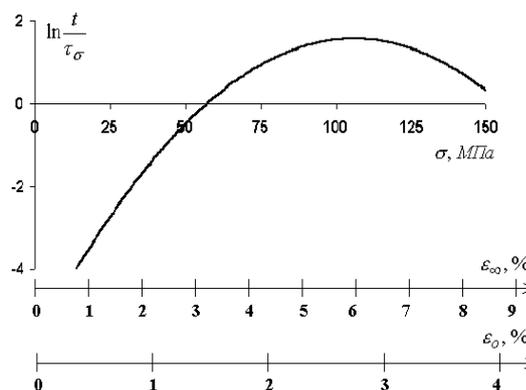


Рис. 2

При дифференцировании модуля и податливости переменные величины как деформации, так и напряжения выполняют роль параметра и, таким образом, операциям дифференцирования по времени эти параметры не препятствуют [17].

Полезно увидеть, что из (19), так же, как и из (1) и (2), получается, что при $t \ll \tau$ будет:

$$D_o^{0.5} \sigma_t \approx \varepsilon_t E_o^{0.5}, \text{ то есть } \sigma_t \approx E_o \varepsilon_t, \quad (20)$$

а при $t \gg \tau$:

$$D_o^{0.5} \sigma_t \approx E_{\infty}^{0.5} \varepsilon_t, \text{ то есть } \sigma_t \approx E_{\infty} \varepsilon_t. \quad (21)$$

На рис. 1 и рис. 2 приведены графики деформационной и силовой функций капроновой нити 187 текс, для которой в качестве нормированных функций $\phi_{\sigma t}$ и $\phi_{\sigma t}$ выбирался нормированный арктангенс [18]:

$$\phi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{ne}} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} \right), \quad (22)$$

$$\phi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{nc}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right). \quad (23)$$

Применение интегрального критерия (15) в виде (3) к капроновой нити 187 текс (рис.3-а), к нити нитрон 33,3 текс (рис.3-б) и к лавсановой нити 114 текс (рис.3-в) [19] дает сходные результаты. Как видно из при-

веденных графиков (рис.3), отклонение интегральных кривых от значения "1" составляет величину, не превосходящую 10%. Это отклонение характеризует точность полученного решения определяющего урав-

нения в виде (1), (2) или (19) при задании функций (6) и (7) и отыскании параметров этих функций [20].

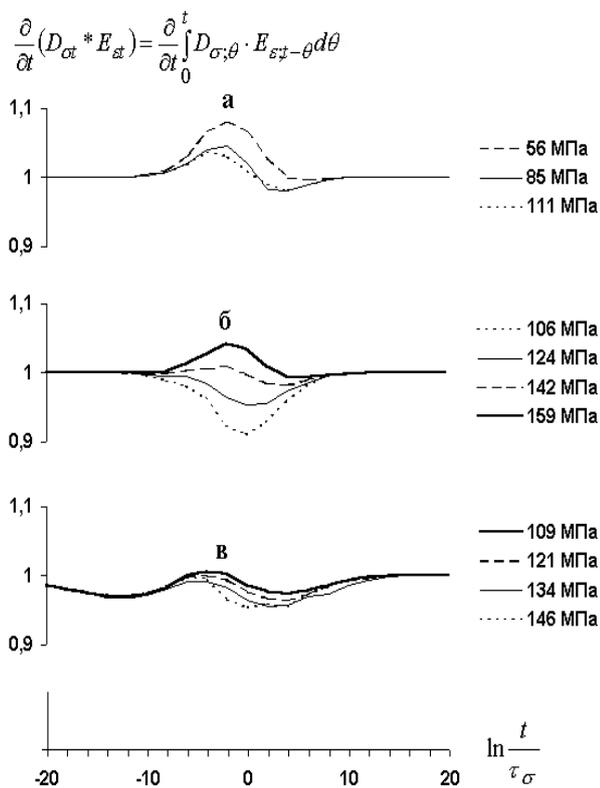


Рис. 3

Аналогичные результаты получаются при применении интегрального критерия (15) в виде (4) (рис.4).

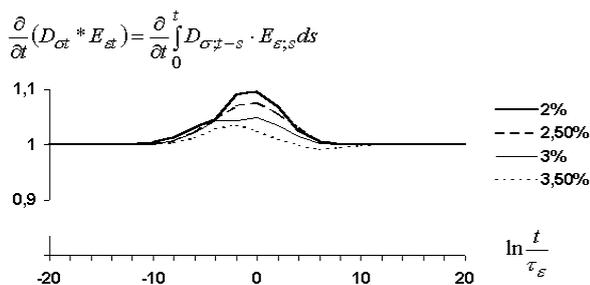


Рис. 4

Критерий (15) в развернутом виде (3) и (4) или (8) - (11) может быть использован также для уточнения решения уравнения (19) в виде (1) или (2) относительно искомых функций (6) и (7) [21].

В случае повышения требований к точности прогнозирования нагруженных состояний в условиях эксплуатации изделий

наряду с рассмотренным критерием (15) для контроля и уточнения физико-механических характеристик можно использовать также диаграммы растяжения, получаемые в широком диапазоне скоростей деформирования, типичных для условий эксплуатации [22].

ВЫВОДЫ

1. Идентичность наследственных уравнений релаксации и ползучести, а также определенная символическая симметрия модуля релаксации и податливости, распространяются на развиваемый вариант теории наследственной нелинейной вязкоупругости и тем самым принципиально допускается совместимость получаемых функций среднестатистических времен релаксации и запаздывания. Тем самым оказываются совместимыми две нормированные аналогии – деформационно-временная и сило-временная.

2. Для обеспечения контроля взаимосвязи между получаемыми среднестатистическими временами релаксации и запаздывания, а также между другими характеристиками наследственных ядер, предлагается использовать разработанный интегральный критерий достоверности прогнозирования деформационных процессов.

3. Близость релаксационных и деформационных кривых, полученных для различных значений деформации и напряжения, подтверждает достаточную точность определения функций среднестатистических времен релаксации и запаздывания.

4. С целью расчетного прогнозирования сложных процессов деформирования для аналитического описания нормированных наследственных ядер релаксации и запаздывания полезно использовать в качестве основы математической модели нормированный арктангенс.

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. Макаров А.Г. Определение аналитической взаимосвязи нормированных ядер релаксации и ползучести в линейной теории вязкоупругости текстильных материалов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 2., С. 13...17.
3. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных парашютных строп//Химические волокна. – 2015, № 6. С. 60...67.
4. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Моделирование и расчетное прогнозирование релаксационных и деформационных свойств полимерных парашютных строп// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 6. С. 194...205.
5. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных парашютных строп//Химические волокна. – 2016, № 2. С. 52...58.
6. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А. Прогнозирование деформационно-релаксационных процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С. 250...258.
7. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Качественный анализ деформационно-релаксационных свойств арамидных шнуров горноспасательного назначения//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2. С. 309...313.
8. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Математическое моделирование деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов в условиях переменной температуры // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 4. С. 287...292.
9. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С., Васильева Е.К. Методы математического моделирования и качественного анализа релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 2. С.251...255.
10. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А., Коновалов А.С. Методы моделирования и сравнительного анализа усадки и деформационно-восстановительных свойств арамидных текстильных материалов//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 3. С.253...257.
11. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С. Методы повышения конкурентоспособности отечественных арамидных текстильных материалов на основе комплексного анализа их функциональных свойств//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 6. С.267...272.
12. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов – основа анализа их эксплуатационных свойств//Химические волокна. – 2018, № 2. С.36...39.
13. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Козлов А.А., Шванкин А.М. Компьютерное прогнозирование и качественный анализ полимерных парашютных строп//Химические волокна. – 2018, № 3. С. 94...97.
14. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Козлов А.А., Васильева Е.К. Разработка интегральных критериев оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов//Химические волокна. – 2018, № 4. С. 54...56.
15. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Егорова М.А., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна. – 2018, № 4. С.117...120.
16. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформационно-восстановительных свойств и усадки арамидных текстильных материалов//Химические волокна. – 2018, № 5. С.89...92.
17. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Васильева Е.К., Шванкин А.М., Егоров И.М. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна. – 2018, № 6. С.3...6.
18. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования и анализа их эксплуатационных свойств//Химические волокна. – 2018, № 6. С. 87...90.
19. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен и его применение для оценки их функциональности//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 2. С. 192...198.
20. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Повышение конкурентоспособности полимерных текстильных материалов на основе применения интегральных критериев достоверности математического моделирования вязкоупругости на стадии их проектирования и организации производства//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 3. С. 242...247.
21. Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. Математическое моделирование и расчетное прогнозирование вязкоупругости геотекстильных нетканых полотен - средство оценки их функционально-эксплуатационного назначения//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 4. С. 229...234.

22. Макаров А.Г., Максимов В.В., Коновалов А.С., Козлов А.А., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Компьютерное моделирование и качественный анализ деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов для парашютостроения//Иzv. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 5. С. 248...253.

REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelineynonasledstvennykh yader relaksatsii i zapazdyvaniya sinteticheskikh nitey// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2000, № 2. S.12...16.

2. Makarov A.G. Opreделение analiticheskoy vzaimosvyazi normirovannykh yader relaksatsii i polzuchesti v lineynoy teorii vyazkoprugosti tekstil'nykh materialov// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2002, № 2, S. 13...17.

3. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternoe prognozirovanie deformatsionnykh protsessov polimernykh parashyutnykh strop //Khimicheskie volokna. – 2015, № 6. S. 60...67.

4. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Modelirovanie i raschetnoe prognozirovanie relaksatsionnykh i deformatsionnykh svoystv polimernykh parashyutnykh strop// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2015, № 6. S. 194...205.

5. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternoe prognozirovanie deformatsionnykh protsessov polimernykh parashyutnykh strop//Khimicheskie volokna. – 2016, № 2. S. 52...58.

6. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Prognozirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov poliamidnykh tkaney, primenyaemykh dlya izgotovleniya kupolov parashyutov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2017, № 1. S. 250...258.

7. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Kachestvennyy analiz deformatsionno-relaksatsionnykh svoystv aramidnykh shnurov gornospasatel'nogo naznacheniya//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2017, № 2. S. 309...313.

8. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Matematicheskoe modelirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov polimernykh materialov v usloviyakh peremennoy temperatury // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2017, № 4. S. 287...292.

9. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S., Vasil'eva E.K. Metody matematicheskogo modelirovaniya i kachestvennogo analiza relaksatsionno-deformatsionnykh protsessov aramidnykh tekstil'nykh materialov//Izvestiya Vysshikh

Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2018, № 2. S.251...255.

10. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Konovalov A.S. Metody modelirovaniya i sravnitel'nogo analiza usadki i deformatsionno-vosstanovitel'nykh svoystv aramidnykh tekstil'nykh materialov//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2018, № 3. S.253...257.

11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Metody povysheniya konkurentosposobnosti otechestvennykh aramidnykh tekstil'nykh materialov na osnove kompleksnogo analiza ikh funktsional'nykh svoystv//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2018, № 6. S.267...272.

12. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modelirovanie relaksatsionno-deformatsionnykh protsessov aramidnykh tekstil'nykh materialov – osnova analiza ikh ekspluatatsionnykh svoystv//Khimicheskie volokna. – 2018, № 2. S.36...39.

13. Makarov A.G., Pereborova N.V., Kozlov A.A., Shvankin A.M. Komp'yuternoe prognozirovanie i kachestvennyy analiz polimernykh parashyutnykh strop//Khimicheskie volokna. – 2018, № 3. S. 94...97.

14. Pereborova N.V., Makarov A.G., Kozlov A.A., Vasil'eva E.K. Razrabotka integral'nykh kriteriev optimal'nosti matematicheskogo modelirovaniya relaksatsionno-vosstanovitel'nykh protsessov polimernykh tekstil'nykh materialov//Khimicheskie volokna. – 2018, № 4. S. 54...56.

15. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spektral'nyy analiz vyazkoprugoy polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov//Khimicheskie volokna. – 2018, № 4. S.117...120.

16. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A. Matematicheskoe modelirovanie i sravnitel'nyy analiz deformatsionno-vosstanovitel'nykh svoystv i usadki aramidnykh tekstil'nykh materialov//Khimicheskie volokna. – 2018, № 5. S.89...92.

17. Pereborova N.V., Makarov A.G., Vasil'eva E.K., Shvankin A.M., Egorov I.M. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternoe prognozirovanie vyazkoprugoy polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov//Khimicheskie volokna. – 2018, № 6. S.3...6.

18. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Povyshenie konkurentosposobnosti aramidnykh tekstil'nykh materialov na osnove matematicheskogo modelirovaniya i analiza ikh ekspluatatsionnykh svoystv//Khimicheskie volokna. – 2018, №6. S. 87...90.

19. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Spektral'nyy analiz vyazko-uprugosti geotekstil'nykh netkanykh poloten i ego primeneniye dlya otsenki ikh funktsional'nosti// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2019, № 2. S. 192...198.

20. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Povyshenie konkurentosposobnosti polimernykh tekstil'nykh materialov na osnove pri-

meneniya integral'nykh kriteriev dostovernosti matematicheskogo modelirovaniya vyazko-uprugosti na stadii ikh proektirovaniya i organizatsii proizvodstva//Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2019, № 3. S. 242...247.

21. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Matematicheskoe modelirovanie i raschetnoe prognozirovanie vyazkouprugosti geotekstil'nykh netkanykh poloten - sredstvo otsenki ikh funktsional'no-ekspluatatsionnogo naznacheniya // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2019, № 4. S. 229...234.

22. Makarov A.G., Maksimov V.V., Kononov A.S., Kozlov A.A., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Komp'yuternoe modelirovanie i kachestvennyy analiz deformatsionno-relaksatsionnykh svoystv polimernykh materialov dlya parashyutostroeniya // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2019, № 5. S. 248...253.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 07.09.21.