

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_285

**ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РЕЛАКСАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**OPTIMIZATION OF MATHEMATICAL MODELING
POLYMERIC TEXTILE MATERIALS
RELAXATION AND RECOVERY PROCESSES**

А.В. ДЕМИДОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.Г. МАКАРОВ, С.В. КИСЕЛЕВ

A.V. DEMIDOV, N.V. PEREBOROVA, A.G. MAKAROV, S.V. KISELEV

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: rector@sutd.ru; Nina1332@yandex.ru; makvin@mail.ru; sergkise@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы поиска оптимальной математической модели релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов. Оптимизация проводится на основе разработанного интегрального критерия достоверности прогнозирования указанного процесса.

The article deals with the search for an optimal mathematical model of polymeric textile materials relaxation-recovery processes. Optimization is carried out on the basis of the developed integral reliability criterion for predicting the specified process.

Ключевые слова: полимерные материалы, релаксационно-восстановительные процессы, математическое моделирование, критерий оптимальности математического моделирования.

Keywords: polymeric materials, relaxation-recovery processes, mathematical modeling, optimality criterion for mathematical modeling.

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

При прогнозировании релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов встает вопрос об оценке точности такого прогнозирования. Для повышения точности указанного прогнозирования релаксационно-восстановительных процессов исследуемых материалов следует провести поиск наилучшей математической модели указанных процессов, применение которой дает наименьшие отклонения прогнозируемых релаксационных характеристик от полученных экспериментально.

В этом и состоит предлагаемая идея оптимизации математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов, которая и будет заложена в основу разработки соответствующего критерия [1...3].

Критерий оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов может быть получен из определяющего уравнения релаксационного процесса Больцмана-Вольтерра [4...7]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_0 \varphi'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta, \quad (1)$$

где t – время; σ_t – напряжение; ε_t – деформация; $\varphi'_{\varepsilon;t}$ – ядро релаксации; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости.

Деля обе части уравнения (1) на $\sigma_t = \text{const} \neq 0$, имеем:

$$E_0 D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma \theta} E'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta = 1, \quad (2)$$

где $D_{\sigma t} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma}$ – податливость; $E_{\varepsilon t} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}$ – модуль релаксации; $E'_{\varepsilon t} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial (\ln(t/t_1))}$.

Или, введя в обозначение безразмерную функцию:

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) = E_0 D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma \theta} E'_{\varepsilon;t-\theta} d\theta, \quad (3)$$

получаем другую форму записи для уравнения (2):

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) = 1. \quad (4)$$

Уравнение (4) соответствует идеальному варианту модели релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов, являющемуся на практике не достижимым. Поэтому критерий оптимальности математического моделирования указанных процессов может быть записан в виде [8...10]:

$$\max_{t \in [0, T]} \left| \chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где T – полное время прогнозирования релаксационно-восстановительного процесса.

Таким образом, идея создания критерия оптимальности математического моделирования функционально-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов основана на том факте, что, чем более удачным будет выбор нормированной функции $\varphi_{\varepsilon t}$, а следовательно, и интегрального ядра $\varphi'_{\varepsilon;t}$, тем отклонение левой части уравнения (2) от "единичного" значения будет наименьшим [11...15].

Для иллюстрации сказанного приведем пример использования функции $\varphi_{\varepsilon t}$ при прогнозировании релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов в виде:

- нормированного арктангенса логарифма приведенного времени (НАЛ) – интегральной функции вероятностного распределения Коши;

- интеграла вероятности – интегральной функции нормального вероятностного распределения.

Следует заметить, что функция НАЛ хорошо себя зарекомендовала при прогнозировании релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов сложной макроструктуры [16...18].

Ее можно записать в виде:

$$\varphi_{\text{et}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg(W_{\text{et}}) = \psi(W_{\text{et}}) \quad (6)$$

с аргументом

$$W_{\text{et}} = \frac{1}{b_{\text{не}}} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{1}{b_{\text{не}}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right), \quad (7)$$

где $b_{\text{не}}$ – параметр интенсивности процесса релаксации, характеризующий скорость указанного процесса; t_1 – некоторое значение базового лабораторного времени, обычно принимаемое за $t_1 = 60\text{с}$; τ_{ε} – время релаксации, то есть время, за которое происходит половина релаксационного процесса при деформации ε .

Тогда, с учетом сказанного, подынтегральное ядро φ'_{et} – производная от функции НАЛ (6) будет выглядеть следующим образом:

$$\varphi'_{\text{et}} = \frac{\partial \varphi_{\text{et}}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{\text{не}}} \frac{1}{1 + W_{\text{et}}^2} \frac{1}{t}. \quad (8)$$

Другим примером выбора нормированной функции φ_{et} при прогнозировании релаксационно-восстановительного процесса полимерных текстильных материалов является интеграл вероятности (ИВ) [19...22]:

$$\varphi_{\text{et}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_{\text{не}}^{-1} \ln(t/\tau_{\varepsilon})} e^{-z^2/2} dz, \quad (9)$$

где $a_{\text{не}}$ – параметр интенсивности процесса релаксации.

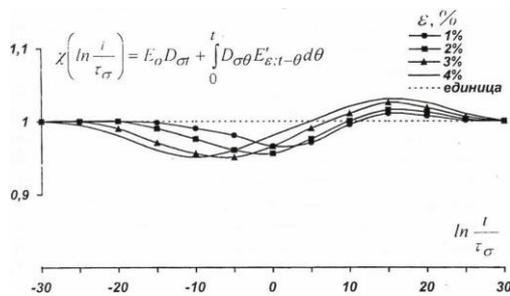


Рис. 1

Практическое применение разработанного интегрального критерия оптималь-

ности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов является достаточно трудоемким и существенно облегчается применением компьютерной техники ввиду большого объема численных операций.

На рис. 1 и рис. 2 графически проиллюстрированы результаты применения интегрального критерия (5) оптимальности математического моделирования функционально-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов для различных значений деформации ε , соответствующих различным нормированным функциям φ_{et} (6) и (9), при прогнозировании эксплуатационно-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерной лавсановой нити линейной плотности 114 текс.

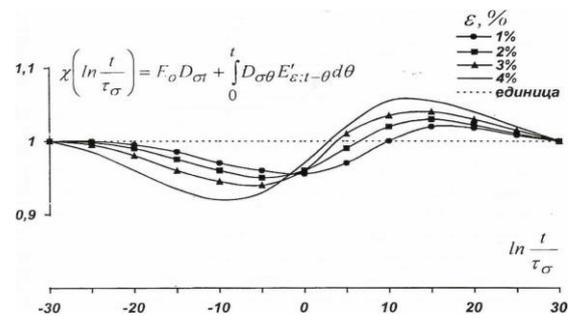


Рис. 2

Приведенные на рис. 1 и рис. 2 результаты применения интегрального критерия оптимальности математического моделирования функционально-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов (5) визуально показывают преимущество функции НАЛ перед функцией ИВ при прогнозировании эксплуатационно-потребительских релаксационно-восстановительных характеристик полимерной лавсановой нити.

Этот факт является важным аргументом в пользу выбора для оценки релаксационно-восстановительных свойств и качественных характеристик полимерных текстильных материалов вероятностного распределения Коши, интегральной функцией

распределения которого является функция НАЛ [23...26].

Практическое применение разработанного интегрального критерия оптимальности математического моделирования функционально-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов (5) позволяет ответить на вопрос о выборе наилучшей математической модели релаксационно-восстановительных свойств указанных материалов для прогнозирования их функционально-потребительских свойств [27...29].

Разработанный интегральный критерий оптимальности математического моделирования функционально-потребительских релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов (5) позволяет проводить оценку эксплуатационных свойств указанных материалов на стадии ее производства и проектирования.

ВЫВОДЫ

Предложен к практическому применению разработанный интегральный критерий оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов;

- основой для разработки интегрального критерия оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов является определяющее уравнение Больцмана-Вольтерра указанных процессов, что подтверждает надежность и адекватность такой оптимизации;

- практическое применение интегрального критерия оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов достаточно трудоемко и возможно только на основе использования компьютерных технологий ввиду большого объема численных операций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rymkevich P.P., Romanova A.A., Golovina V.V., Makarov A.G. The Energy Barriers Model for the

Physical Description of the Viscoelasticity of Synthetic Polymers: Application to the Uniaxial Orientational Drawing of Polyamide Films//Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – 2013. Vol. 52. Is. 12. P.1829...1847.

2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers//Technical Physics. –Vol. 60. № 2. 2015. P. 240...245.

3. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Гофман И.В., Васильева В.В. Начальная стадия релаксации напряжения в ориентированных полимерах//Физика твердого тела. – 2015. Т. 58, № 4. С. 814...820.

4. 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.

5. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов из них // Химические волокна. – 2015, № 6. С. 68...72.

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

7. 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.

8. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов из них // Химические волокна. – 2016, № 1. С.37...42.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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 про-

мышленности. – 2017, №4. С. 287...292.

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

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

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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. – 2019, № 5. С.89...92.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Абрамова И.В. Моделирование и качественный анализ процессов ползучести геотекстильных нетканых материалов - основа повышения их конкурентоспособности// Химические волокна. – 2019, № 5. С. 68...70.

26. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Коробовцева А.А. Прогнозирование ползучести, деформационных и восстановительных процессов геотекстильных нетканых материалов// Химические волокна. – 2019, № 5. С.71...73.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

REFERENCES

1. Rymkevich R.R., Romanova A.A., Golovina V.V., Makarov A.G. The Energy Barriers Model for the Physical Description of the Viscoelasticity of Synthetic Polymers: Application to the Uniaxial Orientational Drawing of Polyamide Films//Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics. – 2013. Vol. 52. Is. 12. P.1829...1847.

2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers//Technical Physics. –Vol. 60. № 2. 2015. P. 240...245.

3. Makarov A.G., Slutsker G.Ya., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. The initial stage of stress relaxation in oriented polymers//Physics of the Solid State. – 2015. V. 58, No. 4. S. 814...820.

4. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Mathematical modeling and computer

prediction of deformation processes of polymeric parachute lines//Chemical fibers. – 2015, No. 6. S. 60...67.

5. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Comparative analysis of the deformation properties of aramid yarns and textile materials from them // Chemical fibers. - 2015, No. 6. From 68...72.

6. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Development of a methodology for conducting a comparative analysis of the deformation and relaxation properties of aramid yarns and textile materials based on them // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2015, No. 5. P.48...58.

7. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Modeling and computational prediction of relaxation and deformation properties of polymeric parachute lines// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2015, No. 6. S. 194...205.

8. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Comparative analysis of the deformation properties of aramid yarns and textile materials from them // Chemical fibers. – 2016, No. 1. P.37...42.

9. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Mathematical modeling and computer prediction of deformation processes of polymeric parachute lines // Chemical fibers. – 2016, No. 2. S. 52...58.

10. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Prediction of deformation-relaxation processes of polyamide fabrics used for the manufacture of parachute domes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2017, No. 1. P. 250...258.

11. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Qualitative analysis of the deformation-relaxation properties of aramid cords for mine rescue// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2017, No. 2. P.309...313.

12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Mathematical modeling of deformation-relaxation processes of polymeric materials under conditions of variable temperature // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2017, No. 4. pp.287...292.

13. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Development of methods for mathematical modeling of the processes of relaxation and creep of polymer threads based on their spectral interpretation// Chemical fiber. – 2017, No. 1. S. 69...73.

14. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Development of reliability criteria for predicting deformation and relaxation processes of polymeric materials// Chemical fibers. – 2017, No. 2. S.59...63.

15. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Variants of mathematical modeling and system analysis of mechanical relaxation and creep of polymeric materials // Chemical Fibers. – 2017, No. 4. S. 46...51.

16. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modeling of relaxation-deformation processes of aramid textile materials - the basis for the analysis of their performance properties // Chemical fibers. – 2018, No. 2. P.36...39.

17. Makarov A.G., Pereborova N.V., Kozlov A.A., Shvankin A.M. Computer forecasting and qualitative analysis of polymeric parachute lines// Chemical fibers. – 2018, No. 3. S. 94...97.

18. Pereborova N.V., Makarov A.G., Kozlov A.A., Vasil'eva E.K. Development of integral optimality criteria for mathematical modeling of relaxation-recovery processes of polymeric textile materials// Chemical fiber. – 2018, No. 4. S. 54...56.

19. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spectral analysis of viscoelastic creep of geotextile nonwovens//Chemical fibers. – 2018, No. 4. P.117...120.

20. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A. Mathematical modeling and comparative analysis of deformation-recovery properties and shrinkage of aramid textile materials// Chemical fibers. – 2019, No. 5. P.89...92.

21. Pereborova N.V., Makarov A.G., Vasil'eva E.K., Shvankin A.M., Egorov I.M. Mathematical modeling and computer prediction of viscoelastic creep of geotextile nonwovens // Chemical fiber. – 2018, No. 6. P.3...6.

22. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Improving the competitiveness of aramid textile materials on the basis of mathematical modeling and analysis of their performance properties // Chemical fibers. – 2018, No. 6. P. 87...90.

23. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S., Vasil'eva E.K. Methods of mathematical modeling and qualitative analysis of relaxation-deformation processes of aramid textile materials// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, No.2. S. 251...255.

24. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Konovalov A.S. Methods of modeling and comparative analysis of shrinkage and deformation-recovery properties of aramid textile materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2018, No. 3. P.253 ... 257.

25. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Abramova I.V. Modeling and qualitative analysis of creep processes of geotextile nonwoven materials - the basis for increasing their

competitiveness // Chemical fibers. – 2019, No. 5. S. 68...70.

26. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Korobovtseva A.A. Prediction of creep, deformation and recovery processes of geotextile nonwoven materials// Chemical fibers. – 2019, No. 5. P.71...73.

27. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Spectral analysis of viscoelasticity of geotextile nonwoven fabrics and its application to assess their functionality// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2019, No. 2. S. 192...198.

28. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Improving the competitiveness of polymeric textile materials based on the application of

integral criteria for the reliability of mathematical modeling of viscoelasticity at the stage of their design and organization of production // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2019, No. 3. P.242 ... 247.

29. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Mathematical modeling and computational prediction of viscoelasticity of geotextile nonwoven fabrics - a means of assessing their functional and operational purpose // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2019, No. 4. pp. 229...234.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 17.03.21.
