

УДК 539.434:677.494

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ХИРУРГИЧЕСКОЙ ИМПЛАНТОЛОГИИ***

**MATHEMATICAL MODELING AND QUALITATIVE ANALYSIS
OF DEFORMATION AND RECOVERY PROCESSES
OF POLYMER TEXTILE ELASTOMERS
USED IN SURGICAL IMPLANTOLOGY**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.Г. МАКАРОВ, А.А. КОРОБОВЦЕВА, А.А. МАКАРОВА, Е.С. ЧИСТЯКОВА
N.V. PEREBOROVA, A.G. MAKAROV, A.A. KOROBVOTSEVA, A.A. MAKAROVA, E.S. CHISTYAKOVA

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: nina1332@yandex.ru; makvin@mail.ru; anastasiaquish@yahoo.com; sjc426@mail.ru

В статье описываются методы математического моделирования и качественного анализа деформационных и восстановительных процессов полимерных текстильных эластомеров, применяемых в хирургической имплантологии. Математическое моделирование и проведение дальнейшего качественного анализа указанных материалов позволяют оценить функциональные и эксплуатационные свойства хирургических имплантатов, что является важным при их проектировании и организации производства.

The article describes the methods of mathematical modeling and qualitative analysis of the deformation and recovery processes of polymer textile elastomers used in surgical implantology. Mathematical modeling and further qualitative analysis of these materials allows one to assess the functional and operational properties of surgical implants, which is important in their design and organization of production.

Ключевые слова: текстильные эластомеры, деформационные процессы, восстановительные процессы, функциональные свойства, эксплуатационные свойства, математическое моделирование, качественный анализ.

Keywords: textile elastomers, deformation processes, recovery processes, functional properties, performance properties, mathematical modeling, qualitative analysis.

* Работа финансировалась в рамках выполнения базовой части государственного задания Минобрнауки РФ, Проект № FSEZ-2020-0001.

Исходными данными для построения математической модели ползучести эластомеров хирургического назначения является эксперимент. С помощью приборов-релаксометров деформации исследуются образцы имеющихся эластомеров. К закрепленным в приборе образцам (как правило, базовой длины 10 см) прикладывается напряжение величины σ , МПа. Далее в определенные периоды времени снимаются показания изменяющейся деформации ε , %. По данным проведенного эксперимента в логарифмической шкале приведенного времени строится "семейство" кривых ползучести, то есть "семейство" кривых зависимости деформации ε от логарифма приведенного времени для разных уровней постоянного напряжения σ .

Далее указанное "семейство" кривых ползучести на основе формулы

$$D(\sigma, t) = \varepsilon(t) / \sigma \quad (1)$$

перестраивается в "семейство" кривых податливости $D_{\sigma t} = D(\sigma, t)$.

Затем на основе принципа силовременной аналогии производится моделирование вязкоупругой ползучести (изменение во времени деформации ε , зависящей от напряжения σ) – "семейство" кривых податливости $D(\sigma, t) = \varepsilon(t) / \sigma$ (σ – напряжение, ε – деформация, t – время), построенное по логарифмической шкале приведенного времени $\ln(t/t_1)$ (t_1 – некоторое фиксированное значение "базового" времени), путем параллельных сдвигов вдоль логарифмическо-временной шкалы накладывается на некоторую "обобщенную" кривую податливости, задаваемую нормированной функцией $\varphi(\ln(t/t_1))$, в качестве которой обычно выбирают одну из функций [1...4].

- интеграл вероятностей (ИВ):

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_n} \ln \frac{t}{\tau} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2)$$

которая является интегральной функцией нормального распределения,

- нормированный арктангенс логарифма (НАЛ):

$$\varphi = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_n} \ln \frac{t}{\tau} \right), \quad (3)$$

которая является интегральной функцией распределения вероятностного закона Коши,

- гиперболический тангенс (ГТ):

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_n}{2} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right), \quad (4)$$

- функцию Кольрауша (ФК):

$$\varphi = 1 - e^{-\left(t/\tau\right)^{k_n}} \quad (5)$$

и некоторые другие (здесь a_n , b_n , A_n , k_n – структурные коэффициенты, характеризующие интенсивность процесса ползучести).

При этом аппроксимация податливости $D_{\sigma t} = D(\sigma, t)$ с помощью какой-нибудь нормированной функции запаздывания $\varphi_{\sigma t} = \varphi(\sigma, t)$ типа (2) ... (5) будет иметь следующий вид:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \varphi_{\sigma t}, \quad (6)$$

где D_0 – начальная упругая податливость, D_{∞} – предельно-равновесная податливость.

При этом, если в качестве функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ выбрать интеграл вероятностей ИВ, то формула (6) примет вид:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_n \sigma} \ln \frac{t}{\tau} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (7)$$

В случае выбора других функций запаздывания получаем [5...8]:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right) \quad (8)$$

для функции НАЛ,

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\sigma} \ln \frac{t}{\tau_\sigma}}{2} \right) \right) \quad (9)$$

для функции ГТ и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \left(1 - e^{-\left(t/\tau_\sigma \right)^{k_{n\sigma}}} \right) \quad (10)$$

для функции ФК.

В формулах (7) ... (10): τ_σ – время запаздывания, зависящее от напряжения σ ; константы $a_{n\sigma}$, $b_{n\sigma}$, $A_{n\sigma}$, $k_{n\sigma}$ – характеризуют интенсивность процесса ползучести и зависят от свойств исследуемого полимерного эластомера; индекс n указывает на то, что выбрана нормальная логарифмическая шкала приведенного времени.

Несомненным достоинством моделей (7)...(10) является то, что они содержат наименьшее возможное число параметров, имеющих определенный физический смысл:

- $D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} (\varepsilon(\sigma, t)/\sigma)$ – начальная упругая податливость, характеризующая квазимгновенное значение податливости, то есть ее значение в начале процесса ползучести;

- $D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (\varepsilon(\sigma, t)/\sigma)$ – предельно-равновесная податливость, характеризующая квазиравновесное значение податливости, то есть ее значение в конце процесса ползучести;

- структурные параметры $a_{n\sigma}$, $b_{n\sigma}$, $A_{n\sigma}$, $k_{n\sigma}$ характеризуют скорость (интенсивность) процесса ползучести;

- время запаздывания (ползучести) $\tau_\sigma = \tau(\sigma)$ характеризует время прохождения половины процесса ползучести при заданном значении напряжения σ .

Учитывая, что податливость определяется формулой (6), получаем простейшие выражения для прогнозирования деформации [9...12]:

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0 \sigma + (D_\infty - D_0) \sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (11)$$

для функции ИВ,

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0 \sigma + (D_\infty - D_0) \sigma \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \right) \quad (12)$$

для функции НАЛ,

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0 \sigma + (D_\infty - D_0) \sigma \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\sigma}}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau_\sigma} \right) \right) \right) \quad (13)$$

для функции ГТ и

$$\varepsilon(\sigma, t) = D_0 \sigma + (D_\infty - D_0) \sigma \left(1 - e^{-\left(t/\tau_\sigma \right)^{k_{n\sigma}}} \right) \quad (14)$$

для функции ФК.

Формулы (11)...(14) являются простейшими и не учитывают наследственного характера процесса ползучести, поэтому ими можно пользоваться только для контроля получаемых характеристик ползучести.

Для прогнозирования сложных деформационных и восстановительных процессов с изменяющимся во времени значением приложенного напряжения σ следует пользоваться определяющим интегральным со-

отношением Больцмана-Вольтерра, которое имеет следующий вид [13...17]:

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \varphi'_{\sigma; t-\theta} d\theta, \quad (15)$$

где t – время; ε_t – деформация; σ_t – напряжение; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельно-равновесная податливость; $\varphi'_{\sigma t}$ – ядро запаздывания (ползучести), соответствующее одной из нормированных функций (2)...(5), либо аналогичных [18...22].

На основе численного решения интегрального уравнения (15) осуществляется прогнозирование деформационных и восстановительных процессов текстильных эластомеров. Полученные в ходе деформационного или восстановительного процесса численные характеристики изменяющейся деформации текстильных эластомеров могут быть использованы для проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств этих материалов [23...28].

Таким образом:

1. Для описания деформационных и восстановительных процессов текстильных эластомеров предложены четыре варианта математических моделей.

2. Разработаны методы численного прогнозирования деформационных и восстановительных процессов текстильных эластомеров с учетом предложенных вариантов математических моделей.

3. Предложены варианты проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств текстильных эластомеров.

Л И Т Е Р А Т У Р А

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., 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.

4. Головина В.В., Рымкевич П.П., Макаров А.Г., Романова А.А. Прогнозирование деформационных и релаксационных процессов в одноосноориентированных полимерных материалах // Химические волокна. – 2013, № 6. С. 33...40.

5. 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. – Vol. 52, Is. 12, 2013. P.1829...1847.

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

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

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. Makarov A.G. Opredelenie analiticheskoy vzaimosvyazi normirovannykh yader relaksatsii i polzuchesti v lineynoy teorii vyazkouprugosti tekstil'nykh materialov// Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2002, № 2. S. 13...17.

3. 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.

4. Golovina V.V., Rymkevich P.P., Makarov A.G., Romanova A.A. Prognozirovaniye deformatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov v odnoosnoorientirovannykh polimernykh materialakh // Khimicheskie volokna. – 2013, № 6. S. 33...40.

5. 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. – Vol. 52, Is. 12, 2013. P.1829...1847.

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

7. Makarov A.G., Slutsker G.Ya., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Nachal'naya stadiya relaksatsii napryazheniya v orientirovannykh polimerakh // Fizika tverdogo tela. – 2015. T. 58, № 4. S. 814...820.

8. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Matematicheskoe modelirovaniye i kompyuternoe prognozirovaniye deformatsionnykh protsessov polimernykh parashyutnykh strop // Khimicheskie volokna. – 2015, № 6. S. 60...67.

9. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Sravnitel'nyy analiz deformatsionnykh svoystv aramidnykh nitey i tekstil'nykh materialov iz nikh // *Khimicheskie volokna*. – 2015, № 6. S. 68...72.
10. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Razrabotka metodiki provedeniya sravnitel'nogo analiza deformatsionnykh i relaksatsionnykh svoystv aramidnykh nitey i tekstil'nykh materialov na ikh osnove // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2015, № 5. S. 48...58.
11. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Modelirovanie i raschetnoe prognozirovaniye relaksatsionnykh i deformatsionnykh svoystv polimernykh parashyutnykh strop // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2015, № 6. S.194...205.
12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Sravnitel'nyy analiz deformatsionnykh svoystv aramidnykh nitey i tekstil'nykh materialov iz nikh // *Khimicheskie volokna*. – 2016, № 1. S.37...42.
13. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternoe prognozirovaniye deformatsionnykh protsessov polimernykh parashyutnykh strop // *Khimicheskie volokna*. – 2016, № 2. S. 52...58.
14. Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. Prognozirovaniye deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov poliamidnykh tkaney, primenyaemykh dlya izgotovleniya kupolov parashyutov // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2017, № 1. S. 250...258.
15. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Kachestvennyy analiz deformatsionno-relaksatsionnykh svoystv aramidnykh shnurov gornospasatel'nogo naznacheniya // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2017, № 2. S. 309...313.
16. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Matematicheskoe modelirovanie deformatsionno-relaksatsionnykh protsessov polimernykh materialov v usloviyakh peremennoy temperatury // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2017, № 4. S. 287...292.
17. 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.
18. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Razrabotka kriteriev dostovernosti prognozirovaniya deformatsionnykh i relaksatsionnykh protsessov polimernykh materialov // *Khimicheskie volokna*. – 2017, № 2. S. 59...63.
19. 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.
20. 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.
21. Makarov A.G., Pereborova N.V., Kozlov A.A., Shvankin A.M. Komp'yuternoe prognozirovaniye i kachestvennyy analiz polimernykh parashyutnykh strop // *Khimicheskie volokna*. – 2018, № 3. S. 94...97.
22. 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.
23. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spektral'nyy analiz vyazkouprugoy polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov // *Khimicheskie volokna*. – 2018, № 4. S.117...120.
24. 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*. – 2019, № 5. S. 89...92.
25. Pereborova N.V., Makarov A.G., Vasil'eva E.K., Shvankin A.M., Egorov I.M. Matematicheskoe modelirovanie i komp'yuternoe prognozirovaniye vyazko-uprugoy polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov // *Khimicheskie volokna*. – 2018, № 6. S. 3...6.
26. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Povysheniye konkurentosposobnosti aramidnykh tekstil'nykh materialov na osnove matematicheskogo modelirovaniya i analiza ikh ekspluatatsionnykh svoystv // *Khimicheskie volokna*. – 2018, № 6. S. 87...90.
27. 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 // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2018, № 2. S. 251...255.
28. 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 // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2018, № 3. S. 253...257.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 04.02.20.