

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2021_1_157

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ
ХИРУРГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ***

**MATHEMATICAL MODELING AND SYSTEM ANALYSIS
OF THE PROCESSES OF RELAXATION OF TEXTILE ELASTOMERS
OF SURGICAL PURPOSES FOR A QUALITATIVE ASSESSMENT
OF THEIR FUNCTIONAL AND OPERATIONAL PROPERTIES**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.Г. МАКАРОВ, Е.А. БУРЯК, А.А. МАКАРОВА, М.И. АЛЕКСАНДРОВА

N.V. PEREBOROVA, A.G. MAKAROV, E.A. BURYAK, A.A. MAKAROVA, M.I. ALEKSANDROVA

(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; sjc426@mail.ru

В статье описываются методы математического моделирования и системного анализа процессов релаксации полимерных текстильных эластомеров для хирургической имплантации. Математическое моделирование и последующий системный анализ указанных материалов позволяет провести качественную оценку функциональных и эксплуатационных возможностей хирургических имплантатов, что особенно важно на стадии их проектирования и организации производства.

The article describes the methods of mathematical modeling and systemic analysis of the processes of relaxation of polymer textile elastomers for surgical implantation. Mathematical modeling and subsequent system analysis of these materials makes it possible to conduct a qualitative assessment of the functional and operational capabilities of surgical implants, which is especially important at the stage of their design and organization of production.

Ключевые слова: текстильные эластомеры, релаксация, функциональные свойства, эксплуатационные свойства, математическое моделирование, системный анализ, качественная оценка.

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

Keywords: textile elastomers, relaxation, functional properties, operational properties, mathematical modeling, system analysis, high-quality assessment.

Текстильные эластомеры находят все более широкое применение в медицине, где чаще всего они используются для укрепления ослабших внутренних тканей человека при грыжах и механических повреждениях. Этим вызван возрастающий интерес к исследованию функциональных и эксплуатационных свойств этих материалов. Важными функциональными свойствами текстильных эластомеров во время эксплуатации являются их релаксационные свойства. Именно поэтому следует уделять особое внимание изучению релаксационных свойств указанных материалов через математическое моделирование и системный анализ их процессов релаксации.

Исходными данными для построения математической модели релаксации текстильных эластомеров является эксперимент. С помощью приборов релаксметров напряжения исследуются образцы эластомеров. Закрепленные в приборе образцы (как правило, базовой длины 10 см) удлиняются на величину деформации ε , %. Далее в определенные периоды времени снимаются показания изменяющегося напряжения σ , МПа. По данным проведенного эксперимента в логарифмическо-временной шкале приведенного времени строится "семейство" кривых релаксации, то есть "семейство" кривых зависимости напряжения σ от логарифма приведенного времени для разных уровней постоянной деформации ε .

Далее указанное "семейство" кривых релаксации на основе формулы:

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

перестраивается в "семейство" кривых модуля релаксации $E_{\varepsilon t} = E(\varepsilon, t)$.

Моделирование релаксации проводится на основе принципа деформационно-временной аналогии, когда "семейство" кривых модуля релаксации (σ – напряжение, ε – деформация, t – время), построенное по логарифмической шкале приведенного времени $\ln(t/t_1)$ (t_1 – некоторое фиксирован-

ное значение "базового" времени), путем параллельных сдвигов вдоль логарифмическо-временной шкалы накладывается на некоторую "обобщенную" кривую релаксации, задаваемую нормированной функцией $\varphi(\ln(t/t_1))$.

При этом в качестве нормированной функции φ , как правило, выбирают одну из следующих 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)

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

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)

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

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

При этом аппроксимация модуля релаксации $E_{\varepsilon t} = E(\varepsilon, t)$ с помощью какой-нибудь нормированной релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t} = \varphi(\varepsilon, t)$ типа (2)...(5) будет

иметь следующий вид:

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

где E_0 – модуль упругости, E_∞ – модуль вязкоупругости.

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

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (7)$$

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

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right). \quad (8)$$

для функции НАЛ,

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\varepsilon}}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right). \quad (9)$$

для функции ГТ и

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \left(1 - e^{-\left(t/\tau_\varepsilon\right)^{k_{n\varepsilon}}} \right). \quad (10)$$

для функции ФК.

В формулах (7)...(10): τ_ε , – время релаксации, зависящее от деформации ε ; константы $a_{n\varepsilon}$, $b_{n\varepsilon}$, $A_{n\varepsilon}$, $k_{n\varepsilon}$ – характеризуют интенсивность процесса релаксации и зависят от свойств исследуемого образца текстильного эластомера; индекс n указывает на то, что выбрана нормальная логарифмическая шкала приведенного времени.

Несомненным достоинством моделей (6)...(10) является то, что они содержат наименьшее возможное число параметров, имеющих определенный физический смысл:

- $E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} (\sigma(\varepsilon, t)/\varepsilon)$ – модуль упругости, характеризующий квазимгновенное значение модуля релаксации, то есть его значение в начале процесса релаксации;

- $E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (\sigma(\varepsilon, t)/\varepsilon)$ – модуль вязкоупругости, характеризующий квазиравновесное значение модуля релаксации, то есть его значение в конце процесса релаксации;

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

- время релаксации $\tau_\varepsilon = \tau(\varepsilon)$ характеризует время прохождения половины процесса релаксации при заданном значении деформации ε .

Учитывая, что модуль релаксации определяется формулой (1), получаем простейшие выражения для прогнозирования изменения напряжения при релаксации [9...12]:

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - (E_0 - E_\infty) \varepsilon \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (11)$$

для функции ИВ,

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0\varepsilon - (E_0 - E_\infty)\varepsilon \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) - \quad (12)$$

для функции НАЛ,

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0\varepsilon - \frac{E_0 - E_\infty}{2} \varepsilon \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_{n\varepsilon}}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \right) - \quad (13)$$

для функции ГТ и

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0\varepsilon - (E_0 - E_\infty)\varepsilon \left(1 - e^{-\left(t/\tau_\varepsilon\right)^{k_{n\varepsilon}}} \right) - \quad (14)$$

для функции ФК.

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

Для прогнозирования сложных релаксационных процессов с изменяющимся во времени значением приложенной деформации ε следует пользоваться определяющим интегральным соотношением Больцмана-Вольтерра, которое имеет следующий вид [13...17]:

$$\sigma_t = E_0\varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \phi'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta, \quad (15)$$

где t – время, ε_t – деформация, σ_t – напряжение, E_0 – модуль упругости, E_∞ – модуль вязкоупругости, $\phi'_{\varepsilon t}$ – ядро релаксации, соответствующее одной из нормированных функций (2)...(5), либо аналогичных [18...22].

На основе численного решения интегрального уравнения (15) осуществляется прогнозирование процессов релаксации текстильных эластомеров. Полученные численные характеристики изменяющегося напряжения в ходе процесса релаксации текстильных эластомеров могут быть использованы для проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств указанных материалов на основе системного анализа этих свойств [23...28].

ВЫВОДЫ

1. Для описания процессов релаксации текстильных эластомеров предложены четыре варианта математических моделей.
2. Разработаны методы численного прогнозирования процессов релаксации текстильных эластомеров с учетом предложенных вариантов математических моделей.
3. Предложены варианты проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств текстильных эластомеров на основе системного анализа этих свойств.

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., 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 Phys-

ical 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, Issue 12, 2013. P.1829...1847.

6. *Макаров А.Г., 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 темпе-

ратуры // 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 ара-

мидных 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, Issue 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 komp'yuternoye 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. Modelirovaniye i raschetnoye

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 modelirovaniye i komp'yuternoye 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 shnurrov 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 modelirovaniye 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. Modelirovaniye 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'yuternoye 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 prognozirovanie vyazkouprugoy 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. Povyshenie 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 05.07.19.