

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_4\_186

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ\***

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR SPECTRAL MODELING  
OF POLYMERIC TEXTILE MATERIAL  
DEFORMATION-RELAXATION PROCESSES**

*Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.Г. МАКАРОВ, М.А. ЕГОРОВА, А.А. МАКАРОВА*

*N.V. PEREBOROVA, A.G. MAKAROV, M.A. EGOROVA, A.A. MAKAROVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

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

E-mail: Nina1332@yandex.ru; makvin@mail.ru; maregoro@mail.ru

*В статье рассматриваются методы спектрального моделирования основополагающих вязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов – релаксационного и деформационного, а также их комбинаций. Разрабатываемые методы спектрального моделирования указанных процессов позволяют выявить деформационно-релаксационные свойства изучаемых материалов, знание которых лежит в основе проектирования новых материалов со специальными функциональными свойствами.*

*The article deals with the methods of the fundamental viscoelastic processes of polymer textile materials spectral modeling - relaxation and deformation, as well as their combinations. The developed methods of spectral modeling of these processes allow us to identify the deformation-relaxation properties of the studied materials, their knowledge is central to the design of new materials with special functional properties.*

**Ключевые слова:** ползучесть, вязкоупругость, пластичность, упругость, деформация, релаксация, полимерные текстильные материалы, прогнозирование, спектральное моделирование.

**Keywords:** creep, viscoelasticity, ductility, elasticity, deformation, relaxation, polymeric textile materials, forecasting, spectral modeling.

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

Изучая функциональные свойства полимерных текстильных материалов, надо учитывать, что основной интерес представляют вязкоупругие процессы, основополагающими представителями которых являются релаксационные и деформационные процессы. При этом на изучаемые деформационно-релаксационные свойства полимерных текстильных материалов могут оказывать влияние различные факторы, например, температурные воздействия, уровни и длительности механических воздействий и др.

Для сравнительного анализа и прогнозирования указанных процессов необходима разработка математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания этих влияний.

В этом направлении в ряде технологических вузов России ведутся работы по применению уравнений наследственной механики твердых деформируемых тел к различным полимерным текстильным материалам. Различия в предлагаемых решениях этих задач объясняются их сложностью. Наибольшего внимания заслуживают те варианты решений, когда имеется физическая обоснованность выбранных уравнений в сочетании с минимумом количества используемых параметров [1...3].

Следует заметить, что изучение механических свойств указанных материалов, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, которые далеки от объективной оценки свойств материала.

Задача значительно усложняется, когда у полимерных текстильных материалов помимо вязкоупругих свойств проявляются также и пластические свойства, то есть появляется необратимый компонент деформации, которому также следует уделить особое внимание [4...6].

Особую ценность имеет решение такой задачи для полимерных текстильных материалов, когда помимо сопоставления механических свойств материалов приходится также делать расчеты на условия эксплуатации изделий. Без измерений таких простых процессов, как ползучесть, релаксация и восстановление, такую задачу решить

невозможно. Именно поэтому у материаловедческих лабораторий имеются определенные преимущества по отношению к теоретическим разработкам.

В настоящее время широкое разнообразие полимерных текстильных материалов и большой объем накопленного эксперимента доказывают необходимость как разработки новых методов исследования их деформационно-релаксационных свойств, так и создания на этой основе практических методик.

Появление новых полимерных текстильных материалов с различными вязкоупругими свойствами обосновывает поиск новых математических моделей указанных свойств и применение для исследований компьютерных методов обработки экспериментальной информации. Создание новых методов исследования механических свойств полимерных текстильных материалов способствует наиболее достоверному прогнозированию деформационно-релаксационных процессов [7...10].

Для исследования деформационно-релаксационных свойств полимерных текстильных материалов, наряду с традиционными моделями, предлагаются математические модели релаксации (изменение во времени напряжения  $\sigma$ , зависящего от деформации  $\varepsilon$ ) [11...13]:

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

и ползучести (изменение во времени деформации  $\varepsilon$ , зависящей от напряжения  $\sigma$ ):

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

где  $t$  – время;  $E_0$  – модуль упругости;  $E_\infty$  – модуль вязкоупругости;  $\tau(\varepsilon)$  – время релаксации, как функция деформации;  $\tau(\sigma)$  – время запаздывания, как функция напряжения.

Несомненным достоинством моделей (1) и (2) является то, что они содержат минимальное число параметров, имеющих

определенный физический смысл [14...16]:

$$- E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon} - \text{модуль упругости,}$$

характеризующий квазимгновенное значение релаксирующего модуля

$$E(\varepsilon, t) = \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon}, \text{ то есть его значение в}$$

начале процесса релаксации;

$$- E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon} - \text{модуль вязкоупру}$$

гости, характеризующий квазиравновесное значение релаксирующего модуля, то есть его значение в конце процесса релаксации;

- структурные параметры  $A_\varepsilon$  и  $A_\sigma$ , характеризующие скорость (интенсивность) процессов релаксации и ползучести;

- время релаксации  $\tau(\varepsilon)$ , характеризующее время прохождения половины процесса релаксации при заданном значении деформации  $\varepsilon$ ;

- время запаздывания  $\tau(\sigma)$ , характеризующее время прохождения половины процесса ползучести при заданном значении напряжения  $\sigma$ .

Другим достоинством предлагаемых моделей релаксации (1) и ползучести (2) является то, что производные  $\frac{\partial \sigma(\varepsilon, t)}{\partial \ln(t/\tau(\varepsilon))}$  и

$$\frac{\partial \sigma(\sigma, t)}{\partial \ln(t/\tau(\sigma))}$$
 рекуррентным образом выра-

жаются через параметры модели, что оптимальным образом сказывается как на упрощении дальнейших аналитических преобразований, так и на повышении точности определения вязкоупругих параметров-характеристик и, как следствие, на повышении достоверности прогнозирования деформационно-релаксационных процессов [17...19]:

$$\frac{\partial \sigma(\varepsilon, t)}{\partial \ln(t/\tau(\varepsilon))} = -(E_0 - E_\infty) \varepsilon A_\varepsilon \varphi(\varepsilon, t) (1 - \varphi(\varepsilon, t)), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon(\sigma, t)}{\partial \ln(t/\tau(\sigma))} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0 E_\infty} \sigma A_\sigma \varphi(\sigma, t) (1 - \varphi(\sigma, t)), \quad (4)$$

где

$$\varphi(\varepsilon, t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{th} \left( \frac{A_\varepsilon}{2} \ln \left( \frac{t}{\tau(\varepsilon)} \right) \right) \right) \quad (5)$$

– функция релаксации,

$$\varphi(\sigma, t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{th} \left( \frac{A_\sigma}{2} \ln \left( \frac{t}{\tau(\sigma)} \right) \right) \right) \quad (6)$$

– функция запаздывания, что упрощает аналитические преобразования.

Математические модели релаксации и ползучести (1), (2) с нормированной функцией в виде гиперболического тангенса (5), (6), кроме вышесказанного, имеют преимущество перед другими известными математическими моделями при прогнозировании быстротекущих деформационно-релаксационных процессов. Данное обстоятельство вытекает из достаточно быстрой сходимости функций (5) и (6) к своим асимптотическим значениям по сравнению с другими известными математическими моделями и подтверждено сравнением расчетного прогнозирования с экспериментальными данными [20...22].

Следует заметить, что выбор аналогов нормированных функций (5), (6) для моделей механических свойств полимерных текстильных материалов осложняется тем, что нельзя априорно отдать предпочтение какой-то из них. Основным критерием для отбора служит эксперимент. Наличие нескольких нормированных функций для моделирования позволяет сделать оптимальный выбор и тем самым повысить надежность прогнозирования.

При прогнозировании деформационно-релаксационных процессов на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [23...25] следует учитывать пластическую компоненту деформации  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в виде введения в определяющие уравнения вязкоупругости коэффициента обратимости деформации  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{\text{полн}} - \varepsilon_{\text{ост}}}{\varepsilon_{\text{полн}}}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_{\text{полн}} (1 - \eta), \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{\text{полн}}$  – значение "полной" деформации, то есть перед снятием нагрузки;  $\varepsilon_{\text{ост}}$  – значение "остаточной" деформации, то есть после снятия нагрузки.

Коэффициент обратимости деформации  $\eta$  определяется экспериментально по деформационно-восстановительному процессу на основе соотношения (8), которое получается из (7).

Учет коэффициента обратимости деформации при прогнозировании процесса

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \frac{E_0 - E_\infty}{E_0 E_\infty} \frac{A_\sigma}{4} \int_0^t \sigma(t - \theta) \left( 1 - \text{th}^2 \left( \frac{A_\sigma}{2} \ln \frac{\theta}{\tau(\sigma)} \right) \right) \frac{1}{\theta} d\theta. \quad (10)$$

Аналогично учет коэффициента обратимости при прогнозировании процесса релаксации проводится по формуле:

$$\sigma_{\text{прог}} = \eta \sigma(t) + (1 - \eta) E_0 \varepsilon(t), \quad (11)$$

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - (E_0 - E_\infty) \frac{A_\varepsilon}{4} \int_0^t \varepsilon(t - \theta) \left( 1 - \text{th}^2 \left( \frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{\theta}{\tau(\varepsilon)} \right) \right) \frac{1}{\theta} d\theta. \quad (12)$$

В качестве сложного режима нагружения рассматривались деформационные процессы, происходящие после квазимгновенного изменения нагрузки. В частности, рассматривались два варианта такого изменения: деформационно-восстановительный процесс с полным разгрузением и деформационно-восстановительный процесс с частичным разгрузением. Расчет указанных процессов проводится по формулам (9), (10).

Аналогично рассматривался сложный режим обратной релаксации, расчет которого проводится по формулам (11), (12).

Точность прогнозирования, как простых (при  $\sigma = \text{const}$  или  $\varepsilon = \text{const}$ ), так и сложных (при  $\sigma \neq \text{const}$  или  $\varepsilon \neq \text{const}$ ) деформационно-релаксационных процессов, зависит не только от надежности определения вязкоупругих характеристик и от выбора соответствующей математической модели релаксации или ползучести, но и от способа вычисления несобственных нелинейно-

ползучести приводит к расчетной формуле для деформации:

$$\varepsilon_{\text{прог}} = (1 - \eta) \varepsilon_{\text{полн}} + \eta \varepsilon(t), \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{\text{прог}}$  – прогнозируемое значение деформации;  $\varepsilon(t)$  – значение деформации, вычисленное по формуле:

где  $\sigma_{\text{прог}}$  – прогнозируемое значение напряжения;  $\sigma(t)$  – значение напряжения, вычисленное по формуле:

наследственных интегралов, входящих в формулы (10) и (12), обладающих сингулярной особенностью [26...29].

Предлагается несколько вариантов вычисления указанных несобственных интегралов, отличающихся друг от друга способами разбиения временной шкалы с учетом специфики прогнозируемого процесса и приводящие к оптимизации вычислительного процесса.

Например, учитывается, что при прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, целесообразно разбиение временной шкалы по возрастающей геометрической прогрессии – с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса, а при прогнозировании же длительных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, целесообразно разбиение временной шкалы по убывающей геометрической про-

грессии – с целью наилучшего учета длительных деформационно-релаксационных воздействий.

В рамках предложенной математической модели релаксации (11), (12) предлагаются методики выделения энергетических компонент – упругой и вязкоупруго-пластической составляющих механической работы деформирования.

Выделение вышеуказанных энергетических компонент важно, например, при оценке эксплуатационных свойств материала. Чем большее значение имеет упругая компонента по сравнению с вязкоупруго-пластической, тем материал более износостойкий. И наоборот, материалы с преобладанием вязкоупругопластической энергетической компоненты целесообразно использовать, например, при конструировании ударозащитных конструкций, где важна способность материала гасить вредные ударные воздействия, а сохранение формы материала не столь важно.

Времена релаксации и запаздывания характеризуют времена перехода релаксирующих или запаздывающих частиц из одного устойчивого состояния в другое. Характер таких переходов может быть различным и обусловлен как строением полимера, так и величиной приложенной деформации или нагрузки. В одних случаях он объясняется конформационными переходами внутри макромолекулы полимера, когда меняется ее форма. В других случаях – происходят сдвиги макромолекул друг относительно друга и т.д.

Для построения обоснованной математической модели механических свойств полимерных текстильных материалов полезно иметь представление о спектрах релаксации  $\bar{N}$  и запаздывания  $\bar{Q}$ , то есть о распределениях релаксирующих или запаздывающих частиц по собственным временам релаксации или запаздывания. Форма спектров релаксации и запаздывания для случая математической модели (1), (2) определяется соответственно структурными коэффициентами  $A_\varepsilon$  и  $A_\sigma$  [30...32].

Следует заметить, что в первом приближении спектры времен релаксации  $\bar{N}_1$  и

времен запаздывания  $\bar{Q}_1$  представляют собой производные по логарифмическо-временной шкале от нормированных функций релаксации (5) и запаздывания (6) соответственно, то есть с учетом формул (3), (4), получаем:

$$\bar{N}_1 = A_\varepsilon \varphi_{\text{ст}} (1 - \varphi_{\text{ст}}) \Big|_{t=\bar{\tau}}, \quad (13)$$

$$\bar{Q}_1 = A_\sigma \varphi_{\text{ст}} (1 - \varphi_{\text{ст}}) \Big|_{t=\bar{\tau}}. \quad (14)$$

Имея представление о форме спектров релаксации и запаздывания, можно интегрированием получить соответствующую нормированную функцию – основу математической модели вязкоупругих свойств.

Для последующих приближений спектров релаксации  $\bar{N}_k$  и запаздывания  $\bar{Q}_k$  была получена рекуррентная формула, а в ходе исследования было показано, что приближения спектров достаточно быстро сходятся к своим предельным значениям  $\bar{N}$  и  $\bar{Q}$  соответственно, что характеризует устойчивость выбранной математической модели вязкоупругости на основе гиперболического тангенса.

Показано, что формы спектров времен релаксации и времен запаздывания характеризуются параметрами интенсивности  $A_\varepsilon$  – для процесса релаксации и  $A_\sigma$  – для процесса ползучести.

Разработанные методики носят универсальный характер, они применимы не только для исследования деформационно-релаксационных свойств полимерных текстильных материалов, но и более широкого класса полимеров, например, материалов, применяемых в легкой промышленности и в других отраслях техники.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны методики определения вязкоупругих характеристик и расчетного прогнозирования кратковременных и длительных деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов на основе математической модели с нормированной функцией гиперболичес-

кий тангенс, оптимально учитывающие характер нелинейности процесса.

2. Предлагаются методики расчета упругой и вязкоупругопластической энергетической компоненты механической работы деформирования.

3. Разработаны методики учета необратимого псевдопластического компонента деформации, повышающие надежность прогнозирования сложных режимов деформирования полимерных текстильных материалов.

4. В рамках построенной математической модели деформационно-релаксационных свойств полимерных текстильных материалов на основе гиперболического тангенса разработаны методики определения спектров времен релаксации и запаздывания.

5. Разработанные методики определения вязкоупругих параметров-характеристик и прогнозирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов позволяют решать задачи технологической направленности по отбору материалов, обладающих оптимальными характеристиками с точки зрения эксплуатационных свойств.

6. Применение разработанных методик прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости к большой группе полимерных текстильных материалов позволяет сделать вывод об универсальности построенной теории и разработанных методик, а также рекомендовать их использование в материаловедческих исследованиях для изучения вязкоупругих свойств широкого круга перспективных полимерных текстильных материалов технического назначения в различных отраслях народного хозяйства.

#### 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 тек-

стильных 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 деформаци-

онно-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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

## REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelineynonasledstvennykh yader relaksatsii i zapazyvaniya sinteticheskikh nitey // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh

Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 komp'yuternoe 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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'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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii,

Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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'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 vyazkoupругoy 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 modelirovaniye 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 modelirovaniye i komp'yuternoe prognozirovaniye vyazkoupругoy 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 eks-pluatatsionnykh 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 // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi 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 // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, № 3. S. 253...257.

29. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Abramova I.V. Modelirovanie i kachestvennyy analiz protsessov polzuchesti geotekstil'nykh netkanykh materialov - osnova povysheniya ikh konkurentosposobnosti // *Khimicheskie volokna*. – 2019, № 5. S. 68...70.

30. Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Korobovtseva A.A. Prognozirovanie polzuchesti, deformatsionnykh i vosstanovitel'nykh protsessov geotekstil'nykh netkanykh materialov // *Khimicheskie volokna*. – 2019, №5. S.71...73.

31. 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.

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

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 17.03.21.