

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_243

**СПЕКТРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РЕЛАКСАЦИОННЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**SPECTRAL MODELING
OF POLYMER TEXTILE MATERIALS RELAXATION
AND DEFORMATION PROCESSES**

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

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

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: makvin@yandex.ru; nina1332@yandex.ru; litalmih@yandex.ru; aakozlov92@mail.ru

В статье рассматривается спектральное моделирование релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов, на основе которых осуществляется их компьютерное прогнозирование. Рассматриваются релаксационные и деформационные процессы различной сложности – от простой релаксации при постоянной деформации и простой ползучести при постоянной нагрузке до сложных процессов обратной релаксации и деформационно-восстановительных процессов с многоступенчатой нагрузкой.

The article deals with spectral modeling of polymeric textile materials relaxation and deformation processes, on their basis the computer prediction is carried out. Relaxation and deformation processes of varying complexity are considered - from simple relaxation under constant deformation and simple creep under constant load to complex processes of reverse relaxation and deformation-recovery processes with multistage load.

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

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

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

Введение

На изучаемые деформационные свойства полимерных материалов оказывают влияние температурные воздействия, а также уровни и длительности механических воздействий. Для сравнительного анализа и прогнозирования указанных свойств необходима разработка математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания этих влияний. В этом направлении постоянно проводятся исследования по применению уравнений наследственной механики твердых деформируемых тел к различным полимерным материалам, включая текстильные материалы, в том числе синтетические нити, ткани, пряжу, ленты, жгуты и др. 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].

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 материалов помимо вязкоупругих свойств проявляются также и пластические свойства, то есть появляется необратимый компонент деформации, которому также следует уделять особое внимание [2].

Особую ценность имеют решения таких задач для полимерных 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 теоре-

тическим разработкам [3].

В настоящее время широкое разнообразие полимерных материалов и большой объем накопленного эксперимента доказывают необходимость, как разработки новых методов исследования их релаксационных свойств и ползучести, так и создания на этой основе практических методик. Появление новых полимерных материалов с различными вязкоупругими свойствами обостряет поиск новых математических моделей указанных свойств и применение для исследований компьютерных методов обработки экспериментальной информации. Создание новых методов исследования механических свойств полимерных материалов способствует наиболее достоверному прогнозированию релаксационных процессов и ползучести.

Методы

Для исследования релаксационных свойств и ползучести полимерных материалов, наряду с традиционными моделями, предлагаются математические модели релаксации (изменение во времени напряжения σ , зависящего от деформации ε):

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

и ползучести (изменение во времени деформации ε , зависящей от напряжения σ):

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

где t – время; E_0 – модуль упругости; E_∞ – 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:

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

характеризующий квазимгновенное значение модуля релаксации $E(\varepsilon, t) = \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon}$, то есть его значение в начале процесса релаксации;

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

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

- структурные параметры A_ε и A_σ , характеризующие скорость (интенсивность) процессов релаксации и ползучести;

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

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

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 [7], 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 деформационных процессов [4]

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

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

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 релаксационных процессов и быстротекущей ползучести. 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.

Следует заметить, что выбор аналогов нормированных функций (5), (6) для моделей механических свойств полимерных 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 релаксационных процессов и процессов ползучести на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [5] для повышения точности прогноза следует учитывать пластическую компоненту деформации $\varepsilon_{пл}$. в виде введения в определяющие уравнения вязкоупругости коэффициента обратимости деформации η :

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

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

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 η определяется экспериментально по деформационно-восстановительному процессу на основе соотношения (8), которое получается из (7).

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

Аналогично учет коэффициента обратимости при прогнозировании процесса релаксации проводится по формуле [15]

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

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

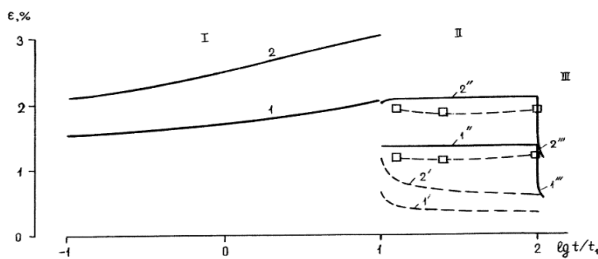


Рис. 1

В качестве примера сложного режима деформирования можно привести процесс сложной ползучести, происходящий после квазимгновенного изменения нагрузки [8].

На рис. 1 (деформационно-восстановительный процесс (1; 2) полиэфирной нити с полным разгрузением (1'; 2') и со ступенчатым разгрузением: (1''; 2'') - снятие половинной нагрузки; (1'''; 2''') - полное снятие нагрузки. $T = 40^\circ\text{C}$. Напряжение: 121 МПа (1), 146 МПа (2); 0 МПа (1'; 2'); 60,5 МПа (1''), 73 МПа (2''); 0 МПа (1'''; 2'''). □ - расчет точек линий 1''; 2''') приведены два варианта такого изменения: деформационно-восстановительный процесс с полным

Учет коэффициента обратимости деформации при прогнозировании процесса ползучести приводит к расчетной формуле для деформации [6]:

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

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 [7]:

разгрузением и деформационно-восстановительный процесс с частичным разгрузением. Расчет указанных процессов проводится по формулам (9), (10).

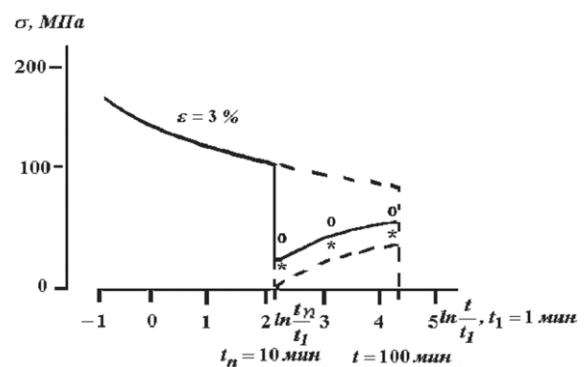


Рис. 2

Аналогично рассматривался сложный режим обратной релаксации, расчет которого проводится по формулам (11), (12). На рис. 2 (процесс обратной релаксации полиэфирной нити с полным разгрузением (---) и со снятием половинной нагрузки (—). $T = 40^\circ\text{C}$. * – расчет процесса с полным

разгрузкой; σ – расчет процесса с половинной разгрузкой) приведен пример такого процесса с полной и с половинной разгрузкой [9].

Точность прогнозирования как простых (при $\sigma = \text{const}$ или $\varepsilon = \text{const}$), так и сложных (при $\sigma \neq \text{const}$ или $\varepsilon \neq \text{const}$) деформационных 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-наследственных интегралов, входящих в формулы (10) и (12), обладающих сингулярной особенностью.

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 [10].

Например, следует учитывать, что при прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, целесообразно проводить разбиение временной шкалы по возрастающей геометрической прогрессии – с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса, а при прогнозировании длительных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, целесообразно разбиение временной шкалы по убывающей геометрической прогрессии – с целью наилучшего учета длительных деформационных воздействий.

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

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 износо-

стойкий. И наоборот, материалы с преобладанием вязкоупруго-пластической энергетической компоненты целесообразно использовать, например, при конструировании ударозащитных конструкций, где важна способность материала гасить вредные ударные воздействия, а сохранение формы материала не столь важно.

Разработаны методики оптимального выбора математической модели из предложенных вариантов. Оптимизация такого выбора основана на применении интегральных критериев релаксации и ползучести, полученных из уравнений нелинейно-наследственной вязкоупругости (10), (12) [12]:

$$\left| E_0 D(\sigma, t) + \int_0^t D(\sigma, t - \theta) \frac{\partial E(\varepsilon, \theta)}{\partial \theta} d\theta - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (13)$$

$$\left| D_0 E(\varepsilon, t) + \int_0^t E(\varepsilon, t - \theta) \frac{\partial D(\sigma, \theta)}{\partial \theta} d\theta - 1 \right| \rightarrow \min. \quad (14)$$

Чем удачнее выбор интегральных ядер, тем меньше отклонение функций [25]

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau(\sigma)} \right) = E_0 D(\sigma, t) + \int_0^t D(\sigma, t - \theta) \frac{\partial D(\varepsilon, \theta)}{\partial \theta} d\theta, \quad (15)$$

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau(\varepsilon)} \right) = D_0 E(\varepsilon, t) + \int_0^t E(\varepsilon, t - \theta) \frac{\partial D(\sigma, \theta)}{\partial \theta} d\theta, \quad (16)$$

от "единицы":

Критерии оптимальности выбора математической модели вязкоупругости (13), (14) можно использовать для численного нахождения оптимального ядра релаксации по заданному ядру запаздывания и наоборот, нахождению оптимального ядра запаздывания по заданному ядру релаксации [13].

Данная задача для случая нелинейной вязкоупругости в аналитическом виде не решена. Сложность решения указанной задачи при нелинейности вязкоупругих свойств полимерных материалов объясняется необходимостью учета активирующего влияния приложенной деформации и нагрузки на времена релаксации и запаздывания. Указанное влияние зависит от многих факторов – компонентного состава, внутренней структуры полимерных мате-

риалов, температуры и т.д. Учет активирующего влияния деформации и нагрузки на ускорение процессов релаксации и ползучести возможен только при компьютерной обработке экспериментальных данных [14].

Условия (13), (14) позволяют также контролировать степень точности определения вязкоупругих параметров-характеристик и степень надежности прогнозирования релаксационных процессов и процессов ползучести. Рассмотренные критерии могут также использоваться для подтверждения достоверности определения среднестатистических времен релаксации и запаздывания, которые не подлежат непосредственному определению из эксперимента, а определяются только как параметры модели [15].

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. [16].

Для построения обоснованных математических моделей релаксации и ползучести полимерных 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 [6]. Форма спектров релаксации и запаздывания для случая математической модели (1), (2) определяется соответственно структурными коэффициентами A_ε и A_σ . Например, спектры релаксации и запаздывания полиэфирной нити показаны на рис. 3 (форма спектра времен релаксации полиэфирной нити, $T = 40^\circ\text{C}$) и рис. 4 (форма спектра времен запаздывания полиэфирной нити, $T = 40^\circ\text{C}$) [17].

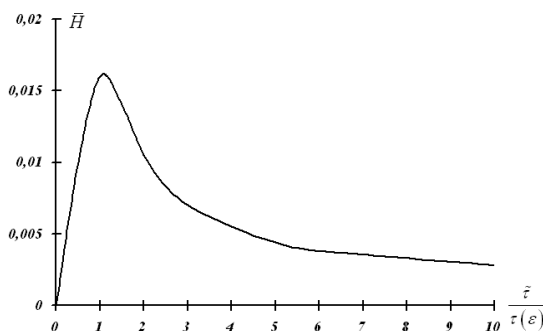


Рис. 3

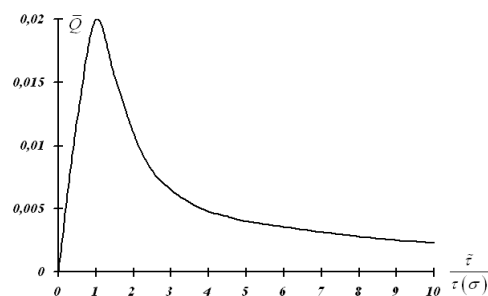


Рис. 4

Следует заметить, что в первом приближении спектры времен релаксации \bar{N}_1 и спектры времен запаздывания \bar{Q}_1 представляют собой производные по логарифмическо-временной шкале от нормированных функций релаксации (5) и запаздывания (6) соответственно. С учетом формул (3), (4), получаем [18]

$$\bar{N}_1 = A_\varepsilon \varphi_{\text{et}} (1 - \varphi_{\text{et}}) \Big|_{t=\bar{\tau}}, \quad (17)$$

$$\bar{Q}_1 = A_\sigma \varphi_{\text{st}} (1 - \varphi_{\text{st}}) \Big|_{t=\bar{\tau}}. \quad (18)$$

Имея представление о форме спектров релаксации и запаздывания, можно интегрированием получить соответствующую нормированную функцию – основу математической модели вязкоупругих свойств [19].

Для последующих приближений спектров релаксации \bar{N}_k и спектров 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 матема-

тической модели вязкоупругости на основе гиперболического тангенса [20].

ВЫВОДЫ

Разработанные методики носят универсальный характер, они применимы для исследования релаксационных свойств и ползучести широкого класса полимерных материалов, применяемых как в текстильной и легкой промышленности, так и в других отраслях техники.

Таким образом:

1. Предлагается критерий оптимального выбора нормированной функции – основы математической модели релаксационных свойств и ползучести полимерных материалов в зоне неразрушающих механических воздействий, позволяющей наиболее достоверно описывать релаксационные процессы и процессы ползучести.

2. Разработаны методики определения характеристик релаксации и ползучести, а также расчетного прогнозирования кратковременных и длительных релаксационных процессов и процессов ползучести полимерных материалов на основе математической модели с нормированной функцией гиперболический тангенс, оптимально учитывающие характер нелинейности процесса.

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

4. Разработаны методики учета необратимого псевдопластического компонента деформации, повышающие надежность прогнозирования сложных режимов релаксации и ползучести полимерных материалов.

5. В рамках построенных математических моделей релаксации и ползучести полимерных материалов на основе гиперболического тангенса разработаны методики определения спектров времен релаксации и спектров времен запаздывания. Показано, что формы указанных спектров характеризуются только параметрами интенсивности процессов релаксации и ползучести.

6. Разработанные методики определения параметров-характеристик релаксации

и ползучести, а также прогнозирования процессов релаксации и процессов ползучести полимерных материалов позволяют решать задачи технологической направленности по отбору материалов, обладающих оптимальными характеристиками с точки зрения эксплуатационных свойств.

7. Применение разработанных методик прогнозирования нелинейно-наследственной релаксации и нелинейно-наследственной ползучести к большой группе полимерных 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 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 текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 2. С. 13...17.

3. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Моделирование и расчетное прогнозирование релаксационных и деформационных свойств полимерных парашютных строп // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 6. С. 194...205.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С.* Методы повышения конкурентоспособности отечественных арамидных текстильных материалов на основе комплексного анализа их функциональных свойств // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, № 6. С.267...272.

8. *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.

9. *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.

10. *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.

11. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А.* Математическое моделирование и сравнительный анализ деформационно-восстановительных свойств и усадки арамидных текстильных материалов // Химические волокна. – 2018, № 5. С.89...92.

12. *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.

13. *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.

14. *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.

15. *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.

16. *Макаров А.Г., Максимов В.В., Коновалов А.С., Козлов А.А., Вагнер В.И., Васильева Е.К.* Компьютерное моделирование и качественный анализ деформационно-релаксационных свойств полимер-

ных материалов для парашютостроения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 5. С. 248...253.

17. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Коробовцева А.А., Макарова А.А., Чистякова Е.С.* Математическое моделирование и качественный анализ деформационных и восстановительных процессов полимерных текстильных эластомеров, применяемых в хирургической имплантологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С.196...201.

18. *Макаров А.Г., Переборова Н.В., Буряк Е.А., Козлов А.А.* Математическое моделирование и методы определения функционально-потребительских релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов // Химические волокна. – 2020, № 3. С. 3...7.

19. *Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егоров И.М., Вагнер В.И.* Методы численного прогнозирования релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов // Химические волокна. – 2020, № 3. С. 21...24.

20. *Переборова Н.В.* Критерии качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Химические волокна. – 2020, № 3. С.39...42.

REFERENCES

1. Makarov A.G. Control of the parameters of non-linear hereditary nuclei of relaxation and delay of synthetic threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2000, No. 2. P.12 ... 16.

2. Makarov A.G. Determination of the analytical relationship between normalized relaxation and creep kernels in the linear theory of viscoelasticity of textile materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2002, No. 2. S. 13 ... 17.

3. 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.

4. 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.

5. 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 purposes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.- 2017, No. 2. P.309 ... 313.

6. 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. S. 287...292.
7. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Methods for improving the competitiveness of domestic aramid textile materials based on a comprehensive analysis of their functional properties // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2018, No. 6. P. 267 ... 272.
8. 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 operational properties // *Chemical fibers.* – 2018, No. 2. P.36...39.
9. Pereborova N.V., Makarov A.G., Kozlov A.A., Vasil'eva E.K. Development of integral criteria for the optimality of mathematical modeling of relaxation-recovery processes of polymer textile materials // *Chemical Fibers.* – 2018, No. 4. S. 54...56.
10. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spectral analysis of viscoelastic creep of geotextile nonwoven materials // *Chemical Fibers.* – 2018, No. 4. P.117...120.
11. 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.* – 2018, No. 5. P.89...92.
12. 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 nonwoven materials // *Chemical Fibers.* – 2018, No. 6. P.3...6.
13. 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.
14. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Improving the competitiveness of polymeric textile materials based on the use 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.
15. 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. S. 229 ... 234.
16. Makarov A.G., Maksimov V.V., Konovalov A.S., Kozlov A.A., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Computer modeling and qualitative analysis of the deformation-relaxation properties of polymeric materials for parachute construction // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2019, No. 5. S. 248...253.
17. Pereborova N.V., Makarov A.G., Korobovtseva A.A., Makarova A.A., Chistyakova E.S. Mathematical modeling and qualitative analysis of deformation and recovery processes of polymeric textile elastomers used in surgical implantology // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2020, No. 6. P.196...201.
18. Makarov A.G., Pereborova N.V., Buryak E.A., Kozlov A.A. Mathematical modeling and methods for determining the functional and consumer relaxation and recovery properties of polymeric textile materials // *Chemical fiber.* – 2020, No. 3. S. 3...7.
19. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorov I.M., Vagner V.I. Methods for numerical prediction of relaxation and recovery properties of polymer textile materials // *Chemical Fibers.* – 2020, No. 3. S. 21 ... 24.
20. Pereborova N.V. Criteria for a qualitative assessment of the relaxation and recovery properties of polymeric textile materials for technical purposes // *Chemical fibers.* – 2020, No. 3. P.39 ... 42.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 17.03.22.