

УДК 539.434:677.494

DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_205

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МОРСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КАНАТОВ***

**MATHEMATICAL MODELING
AND COMPUTER PREDICTION
OF DEFORMATION PROCESSES OF MARINE POLYMER ROPES**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.М. ЛИТВИНОВ, А.А. МАКАРОВА, С.В. КИСЕЛЕВ

N.V. PEREBOROVA, A.M. LITVINOV, A.A. MAKAROVA, S.V. KISELEV

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

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

E-mail: ninal332@yandex.ru; litalmih@yandex.ru; anastasiaquish@yahoo.com; sergkise@mail.ru

В статье рассматриваются методы моделирования и прогнозирования деформационных процессов морских полимерных канатов различного компонентного состава, различного диаметра и типа плетения, капроновых линий и фалов. Методики прогнозирования вязкоупругости указанных материалов основаны на математическом моделировании их деформационных свойств. Дается методика решения задач сравнительного анализа свойств материалов, исследования взаимосвязи свойств со структурой, прогнозирования кратковременных и длительных механических воздействий.

The article discusses methods for modeling and predicting the deformation processes of marine polymeric ropes of various component composition, various diameters and types of weaving, nylon lines and halyards. Methods for predicting the viscoelasticity of these materials are based on mathematical modeling of their deformation properties. A technique is given for solving problems of comparative analysis of the properties of materials, studying the relationship between properties and structure, predicting short-term and long-term mechanical effects.

Ключевые слова: компьютерное прогнозирование, математическое моделирование, морские полимерные канаты, деформационные свойства, релаксация, ползучесть.

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

Keywords: computer prediction, mathematical modeling, marine polymer ropes, deformation properties, relaxation, creep.

Изучение деформационных свойств морских полимерных канатов и других изделий, относящихся к классу вязкоупругих твердых тел, в области действия неразрушающих нагрузок, близких к условиям их эксплуатации, продиктована расширением областей их применения и условий эксплуатации. Такие исследования возможны на основе математического моделирования процессов деформирования, которые включают в себя как вязкоупругую релаксацию, так и вязкоупругую ползучесть [1].

Для сравнительного анализа и прогнозирования деформационных свойств морских полимерных канатов необходима разработка адекватной математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания вязкоупругости. Следует заметить, что изучение механических свойств морских полимерных канатов, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, по которым нельзя получить полноценную объективную оценку свойств материала. Особую ценность имеет решение задачи прогнозирования деформационных процессов для морских полимерных канатов, когда помимо сопоставления их механических свойств, приходится учитывать условия эксплуатации изделий [2].

Появление новых полимерных канатов и других изделий 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 материалов морского назначения способствует повышению достоверности прогнозирования деформационных процессов [3].

В основе исследования механических свойств и прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов морского назначения лежит математическое моделирование вязкоупругости на

основе данных краткосрочного эксперимента на простую релаксацию или простую ползучесть. Одним из развиваемых в настоящее время вариантов математического моделирования вязкоупругости полимеров является вариант, основанный на аналитической аппроксимации экспериментальных "семейств" кривых релаксации и ползучести с помощью различных нормированных релаксационных функций и функций запаздывания по логарифмической шкале приведенного времени [4].

В частности, показано, что, если для математического моделирования вязкоупругих свойств полимерных материалов относительно простой макроструктуры типа нитей достаточно использовать в качестве релаксационной функции или функции запаздывания интеграл вероятности или гиперболический тангенс, то для полимерных материалов сложной макроструктуры, к которым следует отнести полимерные изделия морского назначения (канаты, линии, фалы и т.п.), целесообразно использовать функцию нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая задает вероятностное распределение Коши, главным достоинством которого является свойство замкнутости относительно операции сложения случайных величин (то есть сумма случайных величин, распределенных по закону Коши, также распределена по этому закону) [5].

Из этого важного свойства закона распределения Коши следует, что деформационные процессы, как составных частей морского каната (пряжей, линей, коболок, нитей, волокон), так и самого каната в целом, могут быть описаны одной математической моделью, в основе которой лежит функция НАЛ, что существенно упрощает процесс математического моделирования вязкоупругости.

Учитывая сказанное, математическое моделирование процессов релаксации и ползучести полимерных изделий морского назначения проводилось на основе нормированной функции НАЛ. Одним из осново-

полагающих достоинств предлагаемой математической модели вязкоупругости является выполнение требования к наименьшему числу параметров-характеристик модели и их физическая обоснованность. К тому же выбранная модель вязкоупругости обладает достаточной простотой, достигаемой за счет учета нелинейности в интегральных ядрах релаксации и запаздывания (времена релаксации и запаздывания вводятся как параметры модели), а не за счет усложнения самих ядер [6].

В качестве объектов исследования брались морские полимерные канаты (табл.1), морские капроновые линии (табл.2) и капроновые фалы (табл.3). Если в качестве образцов морских линий и фалов были выбраны только капроновые изделия, то образцы морских канатов представлены более ши-

роко (капроновые, полипропиленовые, полистиловые). Исследуемые образцы канатов отличаются также и по типу плетения.

Математическое моделирование вязкоупругости указанных материалов морского назначения проводилось на основе функции НАЛ, применяемой в виде функции релаксации [7]:

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{\text{н}\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} \right) - \quad (1)$$

для процесса релаксации и в виде функции запаздывания

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{\text{н}\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) - \quad (2)$$

для процесса ползучести.

Т а б л и ц а 1

Материал	Тип плетения	Диаметр, мм	Линейная плотность, Мтекс	Разрывная нагрузка, кН
капрон	трехрядный	8	0,045	9,9
		16	0,17	35,3
		32	0,68	137
		48	1,53	290
		64	2,62	498
капрон	восьмирядный	16	0,31	93
		32	0,94	186
		48	1,84	405
		64	3,14	746
		80	4,91	1155
полипропилен–50%, капрон – 50%	четырёхрядный	8	0,17	29
		16	0,48	82
		32	1,47	171
		48	2,73	378
		64	3,28	674
полипропилен	трехрядный	8	0,039	8,7
		16	0,11	25,2
		32	0,37	81
		48	0,84	149
		64	1,44	235
полипропилен	восьмирядный	16	0,27	73
		32	0,45	97
		48	1,01	225
		64	1,73	385
		80	2,71	604
полистил (полипропилен–75%, полиэтилен – 25%)	трехрядный	8	0,082	21
		16	0,25	64
		32	0,43	88
		48	0,99	206
		64	1,69	361
полистил (полипропилен – 75%, полиэтилен – 25%)	восьмирядный	16	0,31	121
		32	0,52	175
		48	1,19	339
		64	2,03	605
		80	3,21	989

Т а б л и ц а 2

Диаметр, мм	Число каболок в линии	Разрывная нагрузка каболок, кН	Разрывная нагрузка линия, кН
4,5	6	0,92	3,6
5,6	9	0,92	6,0
6,8	12	0,92	6,9
8,5	12	1,58	9,4
10,3	12	1,58	11,8

Т а б л и ц а 3

Диаметр шнура, мм	Линейная плотность, ктекс	Разрывная нагрузка, кН	Количество нитей		
			в оплетке	в сердечнике	всего в шнуре
4	11	2,9	2 x 8	13	29
6	20	3,5	4 x 8	17	49
8	33	7,0	4 x 8	51	91
10	53	10	7 x 8	88	144
12	84	17	10 x 8	141	221

С учетом сказанного, математические модели релаксации (3) и ползучести (4) имеют вид [8]:

$$E_{\text{et}} = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_{\text{et}}, \quad (3)$$

$$D_{\text{ot}} = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{\text{ot}}, \quad (4)$$

где t – время, $1/b_{\text{не}}$ – параметр интенсивности процесса релаксации; $1/b_{\text{но}}$ – параметр интенсивности процесса ползучести; τ_ε – время релаксации (время, за которое проходит половина процесса релаксации при величине деформации ε); τ_σ – время запаздывания (время за которое проходит половина процесса ползучести при величине напряжения σ); $E_{\text{et}} = \sigma/\varepsilon$ – модуль релаксации; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; $D_{\text{ot}} = \varepsilon/\sigma$ – податливость; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельная равновесная податливость; ε – деформация; $\sigma = F/S$ –

напряжение; F – усилие при растяжении; S – площадь поперечного сечения образца.

Математическое моделирование релаксации (изменение во времени напряжения σ , зависящего от деформации ε) и ползучести (изменение во времени деформации ε , зависящей от напряжения σ) основано на интерполировании экспериментальных "семейств" кривых модуля релаксации и податливости обобщенными кривыми (3) и (4). Указанная интерполяция становится возможной при выполнении условий равенства производных модуля релаксации и податливости для равных значений модуля релаксации и податливости, что приводит к наложению экспериментальных кривых "семейств" при их временных сдвигах вдоль логарифмическо-временной шкалы на обобщенные кривые [9].

Несомненным достоинством математических моделей (3), (4) является то, что они содержат минимальное число параметров, имеющих четкий физический смысл: E_0 , E_∞ , D_0 , D_∞ – асимптотические значения модуля релаксации и податливости:

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_{\text{et}}, \quad E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_{\text{et}}, \quad D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_{\text{ot}}, \quad D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\text{ot}}; \quad (5)$$

- структурные параметры $b_{\text{не}}$ и $b_{\text{но}}$ характеризуют скорость процессов релаксации и ползучести; указанные параметры соответствуют логарифму приведенного времени "полурелаксации" (половина процесса

релаксации при деформации ε происходит в интервале времени $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_\varepsilon) = -b_{\text{не}}$, $\ln(t''/\tau_\varepsilon) = b_{\text{не}}$) и "полузапаздывания" (половина процесса

ползучести при напряжении σ происходит в интервале времени $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_\sigma) = -b_{n\sigma}$, $\ln(t''/\tau_\sigma) = b_{n\sigma}$);
 - функции времен релаксации $f_{\varepsilon_1\varepsilon} = \ln(t_1/\tau_\varepsilon)$ и времен запаздывания $f_{\sigma_1\sigma} = \ln(t_1/\tau_\sigma)$, характеризующие сдвиги кривых "семейств" релаксации и ползучести вдоль логарифмическо-временной шкалы содержатся, соответственно, в структурно-деформационно-временном аргументе-функционале

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad (6)$$

и в структурно-сило-временном аргументе-функционале:

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right). \quad (7)$$

Использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математических моделей вязкоупругости, позволяет с достаточной степенью точности моделировать деформационные свойства полимерных материалов морского назначения. Указанное моделирование расширяет деформационно-временные и сило-временные границы прогнозирования деформационных процессов за счет достаточно медленной сходимости функции НАЛ к своим асимптотическим значениям.

Аналитическое задание функции НАЛ и принадлежность ее к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования в рамках рассматриваемой математической модели и облегчает процесс нахождения вязкоупругих характеристик.

Прогнозирование деформационных процессов на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [10] (8) – для процесса нелинейно-наследственной релаксации и (9) – для процесса нелинейно-наследственной ползучести:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta, \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta, \quad (9)$$

с интегральными ядрами релаксации [11] (8) и запаздывания (9), соответствующими нормированным функциям (1), (2):

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \frac{1}{t}, \quad (10)$$

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{n\sigma}} \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \frac{1}{t}. \quad (11)$$

Преимущество применения для моделирования деформационных процессов интегральных ядер (10), (11), как следствие математической модели (3), (4), состоит в возможности расширения области доверительного прогнозирования в сторону "больших" (длительные процессы) и в сторону "малых" времен (кратковременные процессы) с уменьшением погрешности прогноза за счет снижения влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса [12].

Кроме того, повышение точности прогнозирования основано на разработанных методах вычисления несобственных нелинейно-наследственных интегралов (8), (9), основанных на неравномерном разбиении временной шкалы с учетом специфики рассматриваемого процесса [13].

Например, при прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, целесообразно разбиение временной шкалы по возрастающей геометрической прогрессии – с целью наилучшего учета влияния квазамгновенного фактора деформирования в начале процесса.

При прогнозировании же длительных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, целесообразно разбиение временной шкалы по убывающей геометрической прогрессии – с целью наилучшего учета длительных деформационных воздействий.

На рис. 1 показан деформационно-восстановительный процесс с частичной разгрузкой трехрядного капронового каната 680 ктекс, $T=20^\circ$, диаметр 32 мм (линии – эксперимент, * – расчет по формуле (9)); на

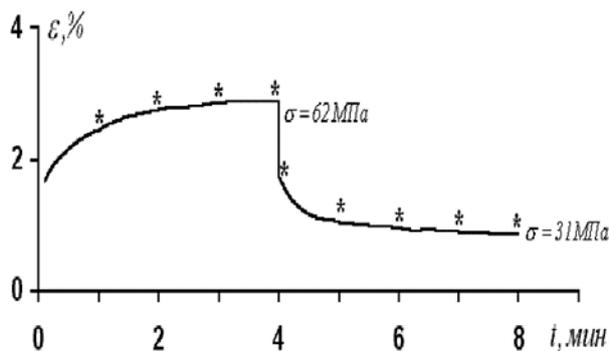


Рис. 1

рис. 2 – процесс обратной релаксации с частичной разгрузкой трехрядного капронового каната 680 ктекс, $T=20^\circ$, диаметр 32 мм (линии - эксперимент, * – расчет по формуле (8)).

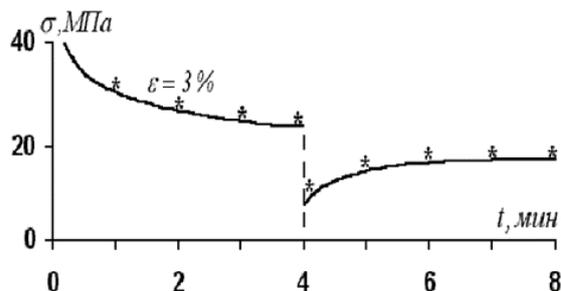


Рис. 2

Разработанные методы вычисления интеграла нелинейно-наследственной вязкоупругости (8), (9) на основе математической модели с функцией НАЛ и соответствующее программное обеспечение опробованы на различных видах деформационно-восстановительных процессов и процессов обратной релаксации. Близость расчетных точек к экспериментальным значениям наблюдается для всех рассмотренных материалов (рис. 1, рис. 2).

Разложение полной деформации ε_t на две компоненты: ε_y – упругую деформацию и ε_{vp} – вязкоупругопластическую деформацию:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{vp} \quad (12)$$

может быть произведено на основе интегрального соотношения (8):

$$\varepsilon_y = \varepsilon_t - (1 - E_\infty E_0^{-1}) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \phi'_{es} ds, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{vp} = (1 - E_\infty E_0^{-1}) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \phi'_{es} ds. \quad (14)$$

Указанное разделение весьма условно и трактуется разными авторами по-разному. Однако такое разделение полной деформации полезно, так как позволяет ответить на многие вопросы относительно упругих и вязкоупругопластических свойств полимерных канатов.

Например, если полимерный канат изготовлен из полимерных нитей со значительным преобладанием упругой составляющей деформации, то он будет хорошо восстанавливать свою форму после деформирования и его целесообразно использовать при постановке оборудования на заданное заглубление (постановка батометрических станций) и при буксировке оборудования на заданной глубине (профилографа, эхолота, эхографа).

Однако, если требуется канат, обладающий вязкоупруго-пластическими свойствами, например, для целей швартовки судов, постановки судов на якорь, постановки плавучего навигационного ограждения (буев), то для этих целей лучше подойдут материалы с преобладанием вязкоупруго-пластической деформации, так как они смогут наилучшим образом гасить вредные механические воздействия (шторм, приливы-отливы, рывки при швартовке), обладая, к тому же, большей долговечностью в режимах неразрушающего деформационного воздействия.

Проведенный анализ деформационных свойств полимерных материалов морского назначения выявил влияние геометрических размеров, линейной плотности, способа переплетения прядей и компонентного состава на их деформационные свойства. Для такого анализа исследуем некоторые

расчетные характеристики (табл. 4 – расчетные характеристики интенсивности про-

цессов релаксации и ползучести морских полимерных канатов диаметром 32 мм).

Т а б л и ц а 4

Материал	Тип плетения	Линейная плотность, Мтекс	Интенсивность релаксации $b_{не}$	Интенсивность ползучести $b_{пс}$
капрон	трехрядный	0,68	4,53	3,17
капрон	восьмирядный	0,94	3,38	2,29
полипропилен–50%, капрон – 50%	четырёхрядный	1,47	2,91	1,93
полипропилен	трехрядный	0,37	9,52	6,48
полипропилен	восьмирядный	0,45	6,42	4,37
полистил (полипропилен–75%, полиэтилен – 25%)	трехрядный	0,43	8,28	5,92
полистил (полипропилен – 75%, полиэтилен – 25%)	восьмирядный	0,52	2,76	1,86

Сравнивая расчетные характеристики для образцов морских канатов с одинаковым типом переплетения и одного диаметра, но разного компонентного состава (капрон и полипропилен), получаем почти двукратное увеличение структурных коэффициентов $b_{не}$ и $b_{пс}$ для изделий из полипропилена, по сравнению с капроном, что означает более быструю релаксацию капрона. В данном случае на процессы релаксации и ползучести оказывает влияние компонентный состав соответствующих образцов.

Аналогично, рассматривая образцы морских канатов, произведенных из одного типа полимеров и одинакового диаметра, но различные по типу прядения и по линейной плотности, отмечаем уменьшение структурных коэффициентов $b_{не}$ и $b_{пс}$ (процессы релаксации и ползучести ускоряются), несмотря на увеличение линейной плотности.

Другим примером применения разработанных методов определения вязкоупругих характеристик полимерных канатов служит задача о влиянии диаметра каната на его деформационные свойства. С уменьшением диаметра канатов, изготовленных из одного полимерного материала с помощью одного типа прядения, происходит уменьшение структурных параметров $b_{не}$ и $b_{пс}$, что означает ускорение процессов релаксации и ползучести. Кроме того, с умень-

шением диаметра каната функции среднестатистических времен релаксации и запаздывания сдвигаются в сторону малых деформаций и напряжений. Данное обстоятельство также говорит об ускорении указанных процессов.

Применение разработанных методов на практике заметно упрощается благодаря автоматизации вычислений с помощью соответствующего программного обеспечения. Объединение программ в единый программный комплекс с общим интерфейсом определяет их универсальность и возможность параллельного использования при моделировании деформационных свойств полимерных материалов морского назначения.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные компьютерные методики прогнозирования релаксации и ползучести полимерных изделий морского назначения на основе предлагаемой математической модели релаксации позволяют с большой степенью точности рассчитывать характеристики релаксации и ползучести.

2. Предложенные компьютерные методики прогнозирования деформационных и восстановительных процессов на основе предлагаемых математических моделей релаксации и ползучести позволяют с большой степенью надежности прогнозировать

деформационные и восстановительные процессы полимерных изделий морского назначения, что подтверждено данными эксперимента.

3. Разработанные компьютерные методики разделения полной деформации и соответствующей ей механической энергии деформирования на компоненты позволяют производить оценки упругих и вязкоупругопластических свойств полимерных изделий морского назначения, играющих важную роль при отборе материалов, обладающих требуемыми упругими, вязкоупругими и пластическими свойствами.

4. Разработанные компьютерные методики определения вязкоупругих характеристик полимерных изделий морского назначения позволяют производить технологический отбор материалов и давать рекомендации по их техническому использованию.

5. Все разработанные компьютерные методики были опробованы на большой группе морских полимерных канатов, линей и фалов и дали положительный результат, что дает основание считать данные методики универсальными и рекомендовать их для широкого внедрения в научно-исследовательский процесс материаловедческих лабораторий.

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. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных парашютных строп // Химические волокна. – 2015, № 6. С. 60...67.

4. 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.

5. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации синте-

тических нитей// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 3. С. 8...13.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

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

REFERENCES

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

2. Makarov A.G. Determination of the analytical relationship between normalized relaxation kernels and

creep 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. Mathematical modeling and computer prediction of deformation processes of polymeric parachute lines // *Chemical fibers.* - 2015, No. 6. S. 60...67.

4. 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.

5. Stalevich A.M., Makarov A.G. Variant of the spectrum of hereditary-viscoelastic relaxation of synthetic threads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2000, No. 3. S. 8 ... 13.

6. 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.

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

8. 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.

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

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

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

12. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Spectral analysis of viscoelasticity of geotextile non-woven fabrics and its application for evaluating their functionality // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* - 2019, No. 2. S. 192 ... 198.

13. 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.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем защиты информации. Поступила 11.05.22.