

УДК 539.434:677.494

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ПОЛИАМИДНЫХ ТКАНЕЙ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КУПОЛОВ ПАРАШЮТОВ\***

**FORECASTING OF DEFORMATION-RELAXATION PROPERTIES  
OF POLYAMIDE FABRIC  
USED TO MAKE THE CANOPY**

*А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, М.А. ЕГОРОВА  
A.V. DEMIDOV, A.G. MAKAROV, N.V. PEREBOROVA, M.A. EGOROVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
Санкт-Петербургский государственный университет)  
(St-Petersburg State University of Industrial Technology and Design,  
St-Petersburg State University)  
E-mail: makvin@mail.ru

*В статье рассмотрены методы математического моделирования и компьютерного прогнозирования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов. В основе моделирования указанных свойств полиамидных тканей лежит аналитическая аппроксимация деформационно-релаксационных процессов посредством нормированных функций релаксации и ползучести. Предложен метод сравнительного анализа деформационно-релаксационных свойств полимерных материалов для проведения качественной оценки указанных свойств.*

*The article deals with the methods of mathematical modeling and computer prediction of the strain-relaxation properties of polyamide fabric, used to make the canopy. The basis of the simulation of these properties of polyamide fabrics is an analytical approximation of the strain-relaxation processes via the normalized relaxation and creep functions. The method of comparative analysis of strain-relaxation properties of polymer materials for the qualitative evaluation of these properties.*

**Ключевые слова:** деформация, релаксация, парашюты, полиамидные ткани, прогнозирование, математическое моделирование, качественный анализ.

\* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ, Проект №11.4696.2017/БЧ.

**Keywords: deformation, relaxation, parachutes, nylon fabric, forecasting, mathematical modeling, qualitative analysis.**

Для изготовления куполов парашютов используются полимерные ткани (в основном, полиамидные), обладающие определенными физико-механическими характеристиками. Имеющееся в настоящее время многообразие полиамидных тканей предопределяет разработку и совершенствование методик системной оценки их деформационно-релаксационных свойств с целью проведения комплексного технологического отбора образцов, лучшим образом подходящих для изготовления парашютных куполов. Эксплуатация парашютов предполагает значительные нагрузки для их куполов в течение не очень больших времен [1]. От надежности парашютных систем зависят человеческие жизни и сохранность спускаемой на парашютах техники. Поэтому величины эксплуатационных нагрузок на парашютные купола должны быть намного меньше разрывных усилий. Кроме этого, применяемые парашютные системы предназначены для решений соответствующих задач, поставленных перед ними. Этим определяются различные требования к деформационно-релаксационным параметрам куполов парашютов, относящиеся к их вязкоупруго-пластическим свойствам [2]. Системное изучение и комплексное прогнозирование деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов проводится на основе математического моделирования и сравнительного анализа деформационно-релаксационных процессов указанных материалов [3].

Кроме аппарата математического моделирования и системного анализа для оценки деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, применяемых в парашютных куполах, предполагается использование специально разработанных компьютерных программ [4]. При проведении математического моделирования деформационно-релаксационных свойств исследуемых полиамидных тканей возникают определен-

ные сложности, связанные с тем, что их макроструктура значительно отличается от достаточно изученных структур полимерных нитей и волокон, которые можно рассматривать как одноосно-ориентированные материалы [5]. Эти сложности проведения исследований вызваны тем, что деформационно-релаксационные свойства полиамидных тканей зависят не всегда только от деформационно-релаксационных свойств образующих нитей. Так, на указанные свойства изучаемых материалов существенное влияние оказывают некоторые геометрические факторы, среди которых: вид переплетения нитей, формы куполов и др. Используемые до настоящего времени методы моделирования и прогнозирования деформационно-релаксационных свойств полимерных волокон и нитей часто бывают не применимы для исследования таких же свойств полиамидных тканей, представляющих собой текстильные объекты более сложной макроструктуры [6]. Использование методов математического моделирования и расчетного прогнозирования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов становится возможной благодаря разработанным программам для ЭВМ.

При изучении и прогнозировании деформационно-релаксационных свойств изучаемых материалов определенное значение имеет также фактор учета влияния внешней среды, в том числе: температуры, влажности, погоды, уровней и длительностей деформационных воздействий и т.д. Исследование деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов при эксплуатации намного сложнее, например, измерения разрывных характеристик, которые не дают комплексной оценки указанных свойств [7]. В ходе проведения исследования необходимо осуществлять прогнозирование деформационно-релаксационных свойств изучаемых материалов с учетом условий их эксплуатации.

Моделирование и компьютерное прогнозирование деформационно-релаксационных свойств изучаемых полиамидных тканей – есть основа для повышения надежности и качества парашютных систем.

Основная цель исследования состоит в разработке комплекса методов системного исследования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютостроения. Она включает в себя решение задач по разработке математических моделей деформационных и релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютостроения; по разработке методов прогнозирования процессов деформирования и релаксации полиамидных тканей для парашютостроения; по разработке алгоритмов и

компьютерных программ по прогнозированию деформационно-релаксационных процессов полиамидных тканей для парашютостроения; по определению вязкоупруго-пластических свойств полиамидных тканей для парашютостроения с целью проведения системного исследования их деформационно-релаксационных свойств; по проведению сравнительного анализа деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов [8].

В работе рассматриваются полиамидные ткани для изготовления куполов парашютов, выработанные на "Передовой текстильнице" (г. Королёв, Московская обл.), технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Арти- кул ткани	Поверх- ностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Линейная плотность нитей, текс	Разрывная нагрузка, Н		Удлинение при разрыве, %		Ткацкое переплетение нитей в ткани	Число нитей на 1 см	
			основа	уток	основа	уток		основа	уток
56011	34	3,3	284	275	22	22	саржа 1/2	68	64
56014	36	3,3	245	216	20	20	полотняное	60	56
56307	35	4,0	353	353	16	18	саржа 1/2	62	59
56309	38	4,0	343	343	15	17	полотняное	56	52
56002	50	5,0	413	413	23	23	саржа 1/2	47	44
56005	51	5,0	413	413	22	22	саржа 1/3	56	52
56009	58	5,0	480	461	23	23	полотняное	46	42
56321	118	15,6	1105	961	26	26	саржа 1/2	31	32
56323	120	15,6	961	961	26	26	саржа 1/3	31	32
56028	184	29,0	1922	1827	22	22	саржа 1/3	24	24
56026	186	29,0	1922	1923	25	25	саржа 1/2	24	24

Математическая модель деформационных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов предполагает моделирование процесса их ползучести, который описывает временное изменение деформации  $\varepsilon$  полиамидной ткани в зависимости от значений приложенного усилия  $P$  или напряжения  $\sigma = P/F$  (где  $F$  – площадь поперечного сечения ткани):

$$\varepsilon_t = (D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{n\sigma})\sigma. \quad (1)$$

Здесь  $D_0$  – начальная податливость;  $D_\infty$  – предельная равновесная податли-

вость;  $t$  – время;  $\varphi_{n\sigma}$  – нормированная функция ползучести, имеющая вид:

$$\varphi_{n\sigma} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где  $b_{n\sigma}$  – характеристика интенсивности ползучести;  $\bar{\tau}_\sigma$  – усредненное время запаздывания;  $t_1$  – нормирующее значение времени.

В табл. 2 приведены рассчитанные параметры математической модели (1), (2) для изучаемых полиамидных тканей.

Таблица 2

Артикул ткани	$D_0 F^{-1}, \text{кН}^{-1}$	$D_\infty F^{-1}, \text{кН}^{-1}$	$b_{\text{не}}$	$\bar{\tau}_\sigma \cdot 10^2, \text{с}$
56011	0,32	0,70	1,6	7,8
56014	0,26	0,52	1,5	6,7
56307	0,30	0,56	1,9	6,4
56309	0,21	0,46	1,6	7,3
56002	0,28	0,52	2,6	6,2
56005	0,27	0,55	2,5	7,1
56009	0,19	0,52	1,8	9,1
56321	0,20	0,46	3,1	8,6
56323	0,18	0,47	3,0	8,8
56028	0,17	0,56	3,2	9,4
56026	0,17	0,50	2,9	8,9

Математическая модель релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов предполагает моделирование процесса их релаксации, который описывает временное изменение усилия  $P$  или напряжения  $\sigma = P/F$  полиамидной ткани в зависимости от значений деформации  $\varepsilon$ :

$$\sigma_t = (E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_{\text{не}})\varepsilon. \quad (3)$$

Здесь  $E_0$  – модуль упругости;  $E_\infty$  – модуль вязкоупругости;  $\varphi_{\text{не}}$  – нормированная

функция релаксации, имеющая вид:

$$\varphi_{\text{не}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left( \frac{1}{b_{\text{не}}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \right), \quad (4)$$

где  $b_{\text{не}}$  – характеристика интенсивности релаксации;  $\bar{\tau}_\varepsilon$  – усредненное время релаксации.

В табл. 3 приведены рассчитанные параметры математической модели (3), (4) для изучаемых полиамидных тканей.

Таблица 3

Артикул ткани	$E_0 F, \text{кН}$	$E_\infty F, \text{кН}$	$b_{\text{не}}$	$\bar{\tau}_\varepsilon \cdot 10^2, \text{с}$
56011	3,1	1,4	2,4	6,5
56014	3,8	1,9	2,1	5,3
56307	3,3	1,8	2,6	5,6
56309	4,8	2,2	2,3	6,1
56002	3,6	1,9	3,7	5,1
56005	3,7	1,8	3,6	5,9
56009	5,2	1,9	2,5	7,6
56321	5,0	2,2	4,7	7,1
56323	5,5	2,1	4,6	7,3
56028	5,8	1,8	4,8	7,8
56026	5,9	2,0	4,6	7,4

Модификация математической модели ползучести (1), (2) и математической модели релаксации (3), (4) состоит в переходе от функций времен запаздывания  $\tau_\sigma$  и времен релаксации  $\tau_\varepsilon$  к фиксированным значениям усредненного времени запаздывания  $\bar{\tau}_\sigma$  и усредненного времени релаксации  $\bar{\tau}_\varepsilon$ , соответственно [9].

Такая модификация, как показало дальнейшее расчетное прогнозирование деформационных и релаксационных процессов, мало влияет на уменьшение точности прогнозирования, но существенно уменьшает временные трудозатраты и потому является оправданным [10].

Математическое моделирование деформационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов осуществляется

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{\text{н}\sigma}} \int_0^t \sigma_\theta \frac{1}{1 + W_{\sigma,t-\theta}^2} \frac{1}{t-\theta} d\theta \quad (5)$$

с применением модифицированной математической модели ползучести (1), (2).

Аналогично моделирование релаксации

$$\varepsilon_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{\text{н}\varepsilon}} \int_0^t \varepsilon_\theta \frac{1}{1 + W_{\varepsilon,t-\theta}^2} \frac{1}{t-\theta} d\theta \quad (6)$$

на основе модифицированной математической модели релаксации (3), (4) с использованием интегральных выражений Больцмана-Вольтерра.

Аргументы-функционалы  $W_{\sigma t}$  и  $W_{\varepsilon t}$ , входящие в выражения (5) и (6), определяются следующими формулами:

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

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{\text{н}\varepsilon}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right). \quad (8)$$

Формулы (5) и (6) являются основными для прогнозирования деформационных и релаксационных процессов изучаемых полиамидных тканей для куполов парашютов [12].

Адекватность использования модифицированных математических моделей ползучести (1), (2) и релаксации (3), (4) для прогнозирования деформационных и релаксационных процессов подтверждена сравнением прогнозируемых значений деформации и напряжений со значениями, определенными из эксперимента [13].

Немаловажной особенностью модернизированных математических моделей ползучести (1), (2) и релаксации (3), (4) является то, что они, в отличие от других однопольных математических моделей (например, основанных на применении в качестве нормированных функций ползучести  $\varphi_{\text{н}\sigma}$

еся на основе интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [11]:

онных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов осуществляется по формуле:

или релаксации  $\varphi_{\text{н}\varepsilon}$  интеграла вероятности или гиперболического тангенса), наилучшим образом подходят для прогнозирования быстропротекающих процессов, к которым можно отнести деформационные и релаксационные процессы эксплуатации парашютных систем. Этот факт обусловлен замедленной сходимостью нормированных функций ползучести (2) и релаксации (4) к своим нулевым асимптотическим значениям при  $t \rightarrow 0$ , что соответствует наиболее адекватному учету деформационных и релаксационных откликов материала в начальные интервалы времени деформирования или релаксации соответственно [14].

Прогнозирование деформационных и релаксационных процессов полиамидных тканей, используемых в парашютных куполах, при небольших значениях времен имеет особое значение для анализа эксплуатационно-функциональных возможностей парашютных систем, так как от раскрытия парашюта в начальные моменты исследуемых деформационных и релаксационных процессов целиком зависит как жизнь парашютиста, так и сохранность спускаемой техники [15].

На рис. 1 (деформационный процесс со ступенчатой нагрузкой полиамидной ткани ПА-35: первая минута процесса – нагрузка  $P_1$ , последующие минуты процесса – нагрузка  $P_2$  (сплошные линии – эксперимент, о – расчетное прогнозирование по формуле (5))) приведен пример сложного деформационного процесса со ступенчатой

нагрузкой. Указанный процесс соответствует двухступенчатому раскрытию парашютной системы: сначала раскрывается один купол парашюта, а с минутной задержкой – второй, обеспечивающий более мягкое приземление спускаемой техники или парашютиста.

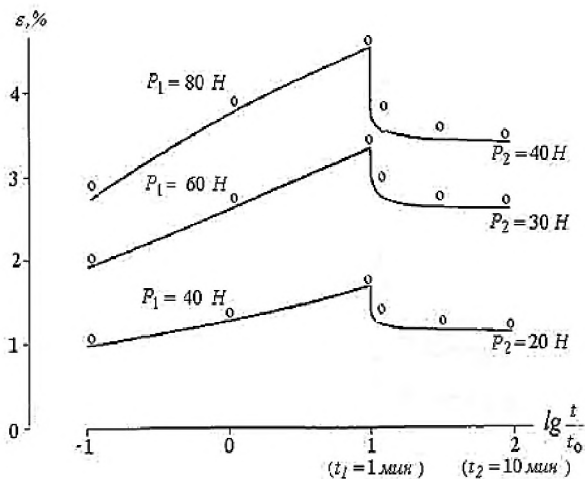


Рис. 1

Близость прогнозируемых значений деформации  $\varepsilon$  к значениям эксперимента на рис. 1 можно наблюдать для всего временного интервала сложного деформационного процесса. Это подтверждает адекватность предлагаемого математического моделирования деформационно-релаксационных процессов исследуемых тканей.

На основе проведенного математического моделирования деформационных и релаксационных процессов проводится сравнительный анализ исследуемых полиамидных тканей для куполов парашюта с целью отбора наилучших из них по критериям функционально-эксплуатационного назначения [16].

Проведенное исследование характеристик ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов (табл. 2, табл. 3) позволило определить полиамидную ткань с наибольшей интенсивностью ползучести и интенсивностью релаксации. Коэффициенты интенсивности ползучести  $b_{пс}$  и интенсивности релаксации  $b_{пэ}$  показывают степень интенсивности указанных процессов, которая обратно

пропорциональна значениям этих коэффициентов [17]. Наиболее интенсивно ползучесть и релаксация идет у ткани артикула 56014, у которой коэффициенты интенсивности ползучести и релаксации имеют наименьшие значения. Наименее интенсивно ползучесть и релаксация проходит у ткани артикула 56028, у которой коэффициенты интенсивности ползучести и релаксации имеют наибольшие значения. Параметры интенсивности ползучести и релаксации, по сути, определяют степень соответствия ткани приложенным деформационным усилиям и релаксационным изменениям. Чем меньше коэффициенты ползучести и релаксации у ткани – тем она более пластична, хотя и имеет меньший срок службы. И наоборот: ткань с большими коэффициентами ползучести и релаксации менее пластична, но служит дольше.

Проведение сравнительного анализа деформационных и релаксационных характеристик исследуемых тканей выявило влияние поверхностной плотности, а также линейной плотности образующих нитей и других факторов на их деформационно-релаксационные свойства. Сравнивая характеристики ползучести и релаксации (табл.2, табл.3) изучаемых тканей из нитей различной линейной плотности, определяем, что более интенсивно деформационные и релаксационные процессы идут у ткани артикула 56014 ( $b_{пс} = 1,5$ ,  $b_{пэ} = 1,5$ ), а менее интенсивно – у ткани артикула 56028 ( $b_{пс} = 3,2$ ,  $b_{пэ} = 4,8$ ).

Таким образом, чем менее интенсивно проходят процессы ползучести и релаксации, тем менее изнашиваются ткани, а следовательно, такие парашюты прослужат дольше. Если процессы ползучести и релаксации проходят более интенсивно, то парашюты быстрее изнашиваются, но создают более комфортные условия для парашютистов и спускаемой техники, так как смягчают момент раскрытия парашюта и более пружинят.

Было также определено, что линейная плотность нитей влияет на интенсивность деформационных и релаксационных про-

цессов в тканях, а следовательно, и на маневренность парашютов. Высокоскоростные и маневренные парашюты рекомендовано оснащать куполами из более тонких тканей, хотя это и ускоряет их износ.

Для проведения сравнительного анализа релаксационно-деформационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов введены в рассмотрение такие параметры, как степень релаксации  $k_{rel}$  и степень ползучести  $k_{pol}$ . Физически эти параметры соответствуют тому, насколько полно проходят процессы релаксации и процессы ползучести у изучаемых материалов [18]:

$$k_{rel} = \frac{E_0 F - E_\infty F}{E_0 F} \cdot 100\%,$$
$$k_{pol} = \frac{D_\infty F^{-1} - D_0 F^{-1}}{D_\infty F^{-1}} \cdot 100\%.$$

(9)

При проектировании куполов парашютов необходимо учитывать также влияние ультрафиолетового излучения на релаксационно-деформационные свойства полиамидных тканей, эксплуатируемых при активном солнечном свете. Для уменьшения влияния вредоносного воздействия ультрафиолетового излучения в виде солнечного света на полиамидные ткани предлагается окрашивать эти ткани в светоотражающие цвета.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенные модифицированные математические модели ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов позволяют с достаточной степенью точности определять характеристики ползучести и релаксации указанных материалов.

2. Предлагаемые математические модели деформационных, релаксационных и восстановительных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов являются

адекватными и лежат в основе методик прогнозирования деформационных, релаксационных и восстановительных процессов указанных материалов.

3. Проведенный сравнительный анализ релаксационно-деформационных процессов полиамидных тканей для парашютных куполов выявил закономерности, позволяющие повысить качество и надежность проектируемых парашютных систем.

4. В ходе проведенного качественного анализа деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов выявлено, что:

- легкие и маневренные парашюты должны иметь купола, изготовленные из тканей с нитями наименьшей линейной плотности;

- купола парашютов, изготовленные из тканей с нитями наибольшей линейной плотности, отличаются меньшей комфортностью для парашютистов, но большей долговечностью;

- купола парашютов, изготовленных из тканей с нитями малой линейной плотности, являются более комфортными, но менее долговечными;

- при проектировании куполов парашютов, эксплуатируемых при активном солнечном свете, необходимо учитывать вредное влияние на деформационно-релаксационные свойства полиамидных тканей ультрафиолетового излучения, для защиты от которого целесообразно окрашивать применяемые ткани в светоотражающие цвета.

5. Предлагаемые методы исследования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов на основе применения модифицированных математических моделей ползучести и релаксации, а также математических моделей прогнозирования их деформационных, релаксационных и восстановительных процессов являются достаточно универсальными и могут применяться для других классов полимерных текстильных материалов, обладающих вязкоупругими свойствами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Г. Контроль параметров нелинейно-наследственных ядер релаксации и запаздывания синтетических нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №2.
2. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Определение вязкоупругих характеристик на примере полиакрилонитрильной нити // Химические волокна. – 2001, №6. С.68...70.
3. 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.
4. Макаров А.Г., Овсянников Д.А. Компьютерное определение спектральных и энергетических характеристик синтетических тканей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2005, №11. С.5...9.
5. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Оптимизация выбора модели вязкоупругости синтетических нитей // Химические волокна. – 2006, №6. С.47...51.
6. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Компьютерное прогнозирование деформационных процессов текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, №2. С.14...18.
7. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. Т. 48, №5. С.147...157.
8. Горшков А.С., Макаров А.Г., Рымкевич О.В., Рымкевич П.П. Математическое моделирование процессов нестационарной теплопроводности через многослойные изделия текстильной и швейной промышленности // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010, №4 (15). С.88...92.
9. Зурахов В.С., Макаров А.Г., Макарова М.А. Прогнозирование деформационных свойств полиамидных тканей для парашютных куполов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2011, №4 (19). С.81...86.
10. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Териушкина О.Б., Дроботун Н.В. Физический анализ кинетики ползучести мононитей из полипропилена и поливинилиденфторида // Дизайн. Материалы. Технология. – 2012, №3 (23). С.41...44.
11. 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.
12. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы математического моделирования релаксации и ползучести полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2013, №3 (21). С. 27...31.
13. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы спектрально-

временного анализа релаксационных и деформационных свойств полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2014, №1 (23). С.19...23.

14. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Переборова Н.В., Васильева В.В., Вагнер В.И. Кинетика релаксации напряжения и ползучести в ориентированных волокнах полипропилена // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, №1 (27). С.101...105.

15. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Математическое моделирование релаксации и ползучести полимерных нитей медицинского назначения // Химические волокна. – 2014, №6. С.37...41.

16. 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.

17. Переборова Н.В. Разработка инновационных методов контроля эксплуатационных свойств и повышения качества материалов текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, №3 (29). С.11...19.

18. 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.

## REFERENCES

1. Makarov A.G. Kontrol' parametrov nelinejno-nasledstvennykh jader relaksacii i zapazdyvanija sinteticheskikh nitej // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2000, №2.
2. Stalevich A.M., Makarov A.G. Opredelenie vjaskouprugih harakteristik na primere poliakrilonitril'noj niti // Himicheskie volokna. – 2001, №6. S.68...70.
3. Makarov A.G. Opredelenie analiticheskoi vzaimosvjazi normirovannykh jader relaksacii i polzuchesti v linejnoi teorii vjaskouprugosti tekstil'nykh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2002, №2. S.13...17.
4. Makarov A.G., Ovsjannikov D.A. Komp'juternoe opredelenie spektral'nykh i jenergeticheskikh harakteristik sinteticheskikh tkanej // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tehnologii i dizajna. – 2005, №11. S.5...9.
5. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Optimizacija vybora modeli vjaskouprugosti sinteticheskikh nitej // Himicheskie volokna. – 2006, №6. S.47...51.
6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Komp'juternoe prognozirovanie deformacionnykh processov tekstil'nykh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2007, №2. S.14...18.



7. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant prognozirovaniya nelinejno-nasledstvennoj vjazkoprugosti polimerov // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. – 2007. T. 48, №5. S.147...157.
8. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Rymkevich O.V., Rymkevich P.P. Matematicheskoe modelirovanie processov nestacionarnoj teploprovodnosti cherez mnog-oslojnye izdelija tekstil'noj i shvejnoj promyshlennosti // Dizajn. Materialy. Tehnologija. – 2010, №4 (15). S.88...92.
9. Zurahov V.S., Makarov A.G., Makarova M.A. Prognozirovanie deformacionnyh svojstv poliamidnyh tkaney dlja parashjutnyh kupolov // Dizajn. Materialy. Tehnologija. – 2011, №4 (19). S.81...86.
10. Makarov A.G., Slucker G.Ja., Terushkina O.B., Drobotun N.V. Fizicheskij analiz kinetiki polzuchesti mononitej iz polipropilena i polivinilidenflorida // Dizajn. Materialy. Tehnologija. – 2012, №3 (23). S.41...44.
11. Makarov A.G., Pereborova N.V., Demidov A.V., Vagner V.I. Spektral'nyj analiz relaksacionnyh svojstv polimernyh nitej amorfno-kristallicheskogo stroenija // Himicheskie volokna. – 2013, №5. S.44...47.
12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Osnovy matematicheskogo modelirovanija relaksacii i polzuchesti polimernyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2013, №3 (21). S. 27...31.
13. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Osnovy spektral'no-vremennogo analiza relaksacionnyh i deformacionnyh svojstv polimernyh materialov tekstil'noj i legkoj promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2014, №1 (23). S.19...23.
14. Makarov A.G., Slucker G.Ja., Pereborova N.V., Vasil'eva V.V., Vagner V.I. Kinetika relaksacii napravazhenija i polzuchesti v orientirovannyh voloknah polipropilena // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2015, №1 (27). S.101...105.
15. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Matematicheskoe modelirovanie relaksacii i polzuchesti polimernyh nitej medicinskogo naznachenija // Himicheskie volokna. – 2014, №6. S.37...41.
16. Makarov A.G., Demidov A.V., Pereborova N.V., Egorova M.A. Modelirovanie i raschetnoe prognozirovanie relaksacionnyh i deformacionnyh svojstv polimernyh parashjutnyh strop // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, №6. S.194...205.
17. Pereborova N.V. Razrabotka innovacionnyh metodov kontrolja jekspluacionnyh svojstv i povyshenija kachestva materialov tekstil'noj i legkoj promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2015, №3 (29). S.11...19.
18. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Vasil'eva E.K. Sravnitel'nyj analiz deformacionnyh svojstv aramidnyh nitej i tekstil'nyh materialov iz nih // Himicheskie volokna. – 2016, №1. S.37...42.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД. Поступила 01.10.16.