

На правах рукописи

Васильева Елизавета Константиновна

**СИСТЕМНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-  
РЕЛАКСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИАМИДНЫХ ТКАНЕЙ  
ДЛЯ ПАРАШЮТОСТРОЕНИЯ**

Специальность:  
05.19.01 - материаловедение производств текстильной и легкой  
промышленности

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2016

Работа выполнена на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна"

Научный руководитель:

**Макаров Авинир Геннадьевич,**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", заведующий кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты:

**Коновалов Александр Сергеевич,**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности

**Горшков Александр Сергеевич,**

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», директор учебно-научного центра «Мониторинг и реабилитация природных систем»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения РАН.

Защита диссертации состоится 27 сентября 2016 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд.241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, <http://sutd.ru>.

Автореферат разослан 25 августа 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.01  
доктор технических наук, профессор

Полякова Екатерина Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** 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. 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, должны обеспечивать решение соответствующих задач, поставленных перед ними. Этим определяются различные требования к деформационно-релаксационным параметрам куполов парашютов, относящиеся к их вязкоупруго-пластическим свойствам. Системное изучение и комплексное прогнозирование деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов, должно проводиться с помощью математического моделирования и сравнительного анализа деформационно-релаксационных процессов указанных материалов.

Кроме аппарата математического моделирования и системного анализа для оценки деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, применяемых в парашютных куполах, предполагается использование специально разработанных компьютерных программ. В работе было учтено, что при проведении математического моделирования деформационно-релаксационных свойств исследуемых полиамидных тканей, возникали определенные сложности, связанные с тем, что их макроструктура значительно отличается от достаточно изученных структур полимерных нитей и волокон, которые можно рассматривать, как одноосно-ориентированные материалы. Эти сложности проведения исследований вызваны тем, что деформационно-релаксационные свойства полиамидных тканей зависит 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. 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 комплексную оценку указанных свойств. 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.

Работа проводилась в рамках гранта РФФИ № 16-31-00171 "Компьютерное моделирование и системный анализ сложных релаксационных и деформационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов".

**Цель работы** состоит в разработке комплекса методов системного исследования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютостроения.

**Основные задачи** исследования:

- разработка математических моделей деформационных и релаксационных свойств полиамидных тканей для парашютостроения;
- разработка методов прогнозирования процессов деформирования и релаксации полиамидных тканей для парашютостроения;
- разработка алгоритмов и компьютерных программ по прогнозированию деформационно-релаксационных процессов полиамидных тканей для парашютостроения;
- определение вязкоупруго-пластических свойств полиамидных тканей для парашютостроения с целью проведения системного исследования их деформационно-релаксационных свойств;
- проведение сравнительного анализа деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов.

**Методы исследования** деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов состоят в применении механики ориентированных полимеров к изучаемым материалам. В работе также использовались различные математические методы, методы системного анализа и информатики.

**Научная новизна.**

1. Для проведения системного исследования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, используемых в куполах парашютов, была осуществлена модернизация математических моделей указанных свойств с учетом специфики исследуемых материалов.

2. Для определения вязкоупруго-пластических характеристик полиамидных тканей, применяемых в куполах парашютов, разработаны методы численного прогнозирования процессов релаксации и ползучести на основе проведения модификации математических моделей указанных

процессов.

3. Для проведения системного исследования деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, используемых в куполах парашютов, были разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ на основе предложенных математических моделей релаксации и ползучести указанных материалов.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что проведенное системное исследование деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей, используемых в куполах парашютов, на основе предложенных математических моделей релаксации и ползучести указанных материалов, а также, разработанных компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ, позволяет осуществлять наилучший отбор указанных материалов по критериям их функционального назначения.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертации докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах: Международный научно-практический семинар "Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки" (Минск, 2015), II международная научно-практическая конференция "Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии образование-наука-производство" (Казань, 2016), Всероссийская научная конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки" (Санкт-Петербург, 2015 и 2016), XX и XVII Санкт-Петербургские ассамблеи молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, 2013 и 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 38 печатных работ, среди которых 13 статей в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК РФ...", 15 свидетельств об официальной регистрации программ в Роспатенте.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (275 наименований) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 127 страницах машинописного текста, иллюстрировано 29 рисунками и содержит 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность диссертационной работы, цель и задачи исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость.

Изучение деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей необходимо, как для повышения качества изготавливаемых парашютов, так и для увеличения их надежности. Он способствует также повышению функциональности парашютных систем, так как расширяет деформационные и временные интервалы полноценного их использования. Основой для осуществления отбора полиамидных тканей для куполов парашютов, обладающих наилучшими эксплуатационно-функциональными свойствами, являются как деформационные и релаксационные характеристики самих тканей, так и сами функциональные задачи, поставленные перед парашютными

системами.

Определение, исследование и прогнозирование деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов становится проще благодаря использованию математического моделирования и проведения системного анализа указанных свойств. В тоже время, точность расчета и прогнозирования деформационно-релаксационных характеристик изучаемых материалов зависит от адекватности математического моделирования.

Построенные в диссертации математические модели деформационно-релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов, обладают не только достаточной степенью адекватности, но и содержат малое число физически оправданных параметров, что, повышает, как достоверность, так точность прогноза деформационно-релаксационных свойств указанных материалов.

В **первой главе** приводится обзор научной литературы по теме диссертации. Формулируются известные подходы к изучению и прогнозированию деформационно-релаксационных свойств полимеров (Работнов Ю.Н., Колтунов М.А., Ржаницин А.Р.). Приводятся варианты математических моделей деформационно-релаксационных свойств и их прогнозирования (Николаев С.Д., Щербаков В.П., Сталевич А.М., Макаров А.Г., Демидов А.В., Кукин Г.Н., Соловьев А.Н).

Во **второй главе** приведены технические характеристики исследуемых полиамидных тканей для куполов парашютов (табл. 1), изготовленные на "Передовой текстильнице" (г. Королёв, Московская обл.).

*Таблица 1 - Технические характеристики полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов*

Название ткани	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Линейная плотность нитей, текс	Разрывная нагрузка, Н		Удлинение при разрыве, %	
			по основе	по утку	по основе	по утку
ПА-34	34	3,3	284	275	22	22
ПА-35	35	4,0	353	353	16	18
ПА-36	36	3,3	245	216	20	20
ПА-38	38	4,0	343	343	15	17
ПА-50	50	5,0	413	413	23	23
ПА-51	51	5,0	413	413	22	22
ПА-58	58	5,0	480	461	23	23
ПА-118	118	15,6	1105	961	26	26
ПА-120	120	15,6	961	961	26	26
ПА-184	184	29,0	1922	1827	22	22
ПА-186	186	29,0	1922	1923	25	25

В главе описываются также приборы для проведения экспериментальных испытаний исследуемых образцов полиамидных тканей в различных режимах на релаксацию и ползучесть.

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):

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

Здесь:  $D_0$  - начальная податливость,  $D_\infty$  - предельная равновесная податливость,  $t$  - время,  $\varphi_{n\sigma}$  - нормированная функция ползучести, имеющая вид:

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

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 - Расчетные характеристики ползучести полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов*

Название ткани	$D_0 \cdot F^{-1}, \text{кН}^{-1}$	$D_\infty \cdot F^{-1}, \text{кН}^{-1}$	$b_{n\sigma}$	$\bar{\tau}_\sigma \cdot 10^2, \text{с}$
ПА-34	0,32	0,70	1,6	7,8
ПА-35	0,30	0,56	1,9	6,4
ПА-36	0,26	0,52	1,5	6,7
ПА-38	0,21	0,46	1,6	7,3
ПА-50	0,28	0,52	2,6	6,2
ПА-51	0,27	0,55	2,5	7,1
ПА-58	0,19	0,52	1,8	9,1
ПА-118	0,20	0,46	3,1	8,6
ПА-120	0,18	0,47	3,0	8,8
ПА-184	0,17	0,56	3,2	9,4
ПА-186	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  $\varepsilon$ :

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

Здесь:  $E_0$  - модуль упругости,  $E_\infty$  - модуль вязкоупругости,  $\varphi_{n\varepsilon}$  -

нормированная функция релаксации, имеющая вид:

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

где  $b_{n\varepsilon}$  - 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 - Расчетные характеристики релаксации полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов*

Название ткани	$E_0 F, \text{кН}$	$E_\infty F, \text{кН}$	$b_{n\varepsilon}$	$\bar{\tau}_\varepsilon \cdot 10^2, \text{с}$
ПА-34	3,1	1,4	2,4	6,5
ПА-35	3,3	1,8	2,6	5,6
ПА-36	3,8	1,9	2,1	5,3
ПА-38	4,8	2,2	2,3	6,1
ПА-50	3,6	1,9	3,7	5,1
ПА-51	3,7	1,8	3,6	5,9
ПА-58	5,2	1,9	2,5	7,6
ПА-118	5,0	2,2	4,7	7,1
ПА-120	5,5	2,1	4,6	7,3
ПА-184	5,8	1,8	4,8	7,8
ПА-186	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.

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.

В **третьей** главе изучено математическое моделирование деформационных процессов:

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

с применением модифицированной математической модели ползучести (1), (2) и релаксационных процессов:

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



на основе модифицированной математической модели релаксации (3), (4) с использованием интегральных выражений Больцмана-Вольтерра, где аргументы-функционалы  $W_{\sigma t}$  и  $W_{\varepsilon t}$  определяются следующими формулами:

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

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\bar{\tau}_\varepsilon} \right) \right), \quad (8)$$

На основе формулы (5) осуществляется прогнозирование деформационных процессов изучаемых полиамидных тканей для куполов парашютов.

Аналогично, на основе формулы (6) осуществляется прогнозирование релаксационных процессов указанных тканей.

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.

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  $\varphi_{n\sigma}$  или релаксации  $\varphi_{n\varepsilon}$  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.

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, т.к. от раскрытия парашюта в начальные моменты исследуемых деформационных и релаксационных процессов целиком зависит, как жизнь парашютиста, так и сохранность спускаемой техники.

На рис. 1 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.

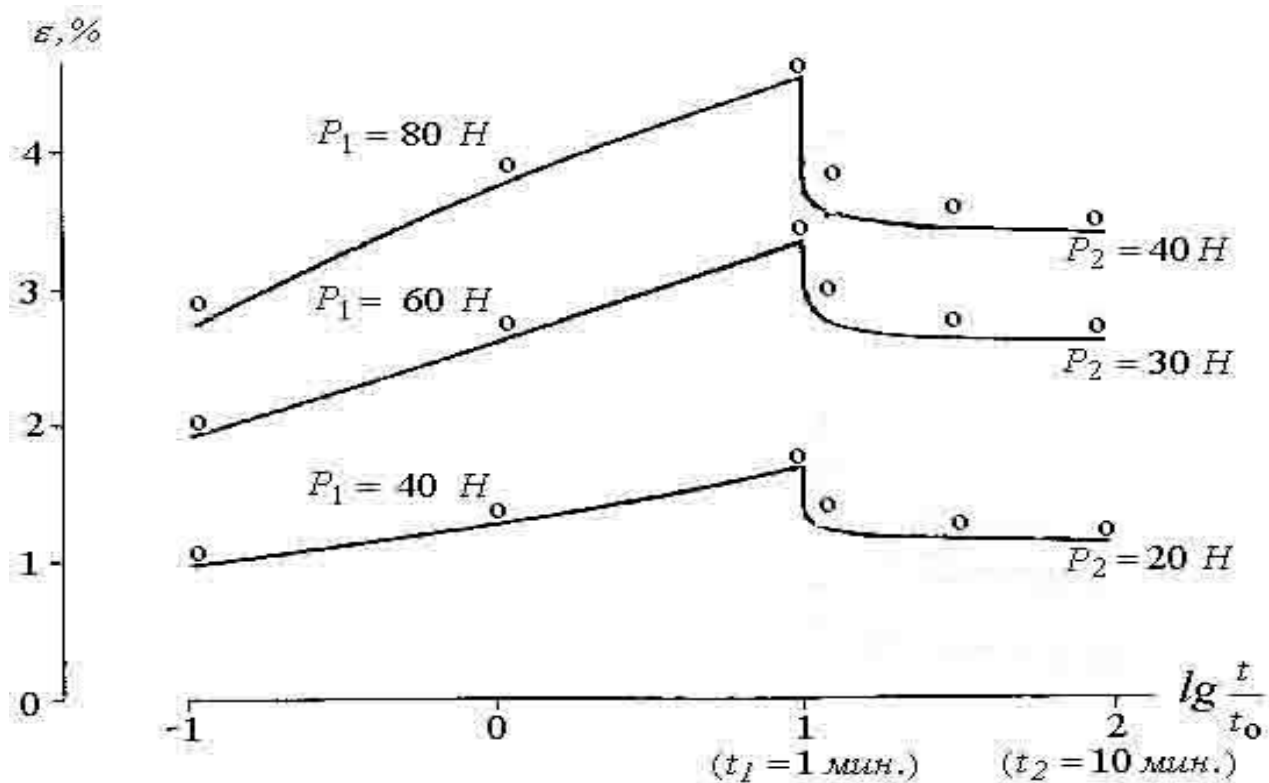


Рисунок 1 - Деформационный процесс со ступенчатой нагрузкой полиамидной ткани ПА-35: первая минута процесса - нагрузка  $P_1$ , последующие минуты процесса - нагрузка  $P_2$  (сплошные линии - эксперимент, о - расчетное прогнозирование по формуле (5))

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.

**Четвертая глава** посвящена разработке компьютерных алгоритмов и программного обеспечения по определению характеристик ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов, а также по прогнозированию их деформационных и релаксационных процессов на основе предлагаемых выше модифицированных математических моделей ползучести и релаксации.

Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ позволяют, как определять характеристики ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов, так и прогнозировать деформационные и релаксационные процессы указанных материалов.

Необходимость в разработке указанных компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ возникает в связи с проведением сравнительного анализа образцов исследуемых тканей, где целью отбора являются наилучшие из них по критериям функционально-эксплуатационного назначения.

**В пятой главе** проводится сравнительный анализ исследуемых полиамидных тканей для куполов парашюта с целью отбора наилучших из них

по критериям функционально-эксплуатационного назначения. Указанный сравнительный анализ проводится на основе разработанного в четвертой главе программного обеспечения, позволяющего, как определять характеристики ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов, так и прогнозировать деформационные и релаксационные процессы указанных материалов.

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  $b_{n\sigma}$  и интенсивности релаксации  $b_{n\varepsilon}$  показывают степень интенсивности указанных процессов, которая обратно пропорциональна значениям этих коэффициентов. Наиболее интенсивно ползучесть и релаксация идет у ткани ПА-36, у которой коэффициенты интенсивности ползучести и релаксации имеют наименьшие значения. Наименее интенсивно ползучесть и релаксация проходит у ткани ПА-184, 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 выявил 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 ПА-36 ( $b_{n\sigma} = 1,5; b_{n\varepsilon} = 2,1$ ), а менее интенсивно - у ткани ПА-184 ( $b_{n\sigma} = 3,2, b_{n\varepsilon} = 4,8$ ).

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, т.к. смягчают момент раскрытия парашюта и более пружинят.

Было также определено, что линейная плотность нитей влияет на интенсивность деформационных и релаксационных процессов в тканях, а следовательно, и на маневренность парашютов. Высокоскоростные и маневренные парашюты рекомендовано оснащать куполами из более тонких тканей, хотя это 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:

$$k_{rel} = \frac{E_o F - E_{\infty} F}{E_o F} \cdot 100\%, \quad k_{pol} = \frac{D_{\infty} F^{-1} - D_o F^{-1}}{D_{\infty} F^{-1}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

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. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по определению характеристик ползучести и релаксации полиамидных тканей для парашютных куполов, а также для прогнозирования их деформационных, релаксационных и восстановительных процессов позволяют проводить комплексные исследования деформационных, релаксационных и восстановительных свойств указанных материалов с целью отбора наилучших из них по критериям функционально-эксплуатационного назначения.

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

5. 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.

6. 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.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

#### **Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ":**

1. Макаров, А.Г. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов из них / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.В. Васильева [и др.] // Химические волокна. – 2016. – № 1. – С. 37-42.

2. Makarov, A.G. Computer modeling and prediction of the deformation properties of polymeric marine cables / A.G. Makarov, N.V. Pereborova, E.K. Vasil'eva [and others] // Fibre Chemistry. – 2015. – v. 47 (1). – P. 51-57.

3. Makarov, A.G. Mathematical modeling of relaxation and creep for medical-grade polymer yarns / A.G. Makarov, N.V. Pereborova, E.K. Vasil'eva [and others] // Fibre Chemistry. – 2015. – v. 46 (6). – P. 368-372.

4. Макаров, А.Г. Компьютерное моделирование и прогнозирование деформационных свойств морских полимерных канатов / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.] // Химические волокна. – 2015. – № 1. – С. 52-57.

5. Макаров, А.Г. Разработка методики проведения сравнительного анализа деформационных и релаксационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 5 (359). – С. 48-58.

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

7. Васильева, Е.К. Расчетное прогнозирование деформационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов / Е.К. Васильева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2016. – № 2 (42). – С. 86-90.

8. Васильева, Е.К. Компьютерное моделирование деформационных и релаксационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов / Е.К. Васильева // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2016. – т. 31. – № 1. – С. 17-28.

9. Васильева, Е.К. Системный анализ релаксационных и

деформационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов / Е.К. Васильева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2016. – № 1. – С. 21-27.

10. Макаров, А.Г. Системный анализ термовязкоупругости полимерных нитей / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2015. – т. 27. – № 1. – С. 96-100.

11. Переборова, Н.В. Моделирование сложных деформационно-восстановительных процессов полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2014. – т. 23. – № 1. – С. 30-32.

12. Переборова, Н.В. Процессы обратной релаксации полимерных текстильных материалов / Н.В. Переборова, В.И. Вагнер, Е.К. Васильева // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2014. – № 2. – т. 24. – С. 53-55.

13. Переборова, Н.В. Компьютерное моделирование деформационных свойств текстильных материалов сложного строения / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2013. – т. 22. – № 4. – С. 35-37.

### **Прочие публикации**

14. Переборова, Н.В. Прогнозирование механических характеристик полимерной пряжи при переменной температуре / Н.В. Переборова, В.И. Вагнер, Е.К. Васильева [и др.] // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2015. – № 1. – С. 49-59.

15. Переборова, Н.В. Расчетное прогнозирование процесса ползучести плащевой ткани / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2015. – № 3. – С. 58-61.

16. Переборова, Н.В. Сложные деформационные процессы в швейных материалах и их прогнозирование / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.] // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2014. – № 4. – С. 29-36.

17. Васильева, Е.К. Расчетное прогнозирование деформационных процессов полиамидных тканей для парашютостроения / Е.К. Васильева, И.М. Егоров // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб., СПГУТД. – 2016. – С. 11-12.

18. Васильева, Е.К. Компьютерное моделирование и системный анализ сложных релаксационных и деформационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов / Е.К. Васильева // II международная научно-практическая конференция "Модели инновационного развития текстильной и

легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии образование-наука-производство". Сборник статей. Казань, 23-25 марта 2016. – С. 16-25.

19. Переборова, Н.В. Системный анализ упруго-деформационных свойств синтетических тканей / Н.В. Переборова, Е.К. Васильева, Ю.Д. Дружкина // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб, СПГУТД. – 2015. – С. 78-79.

20. Васильева, Е.К. Математическое моделирование деформационных свойств текстильных полимерных армирующих решеток / Е.К. Васильева // Двадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов. СПб, декабрь 2015. – 191 с.

21. Вагнер, В.И. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных материалов специального назначения / В.И. Вагнер, Е.К. Васильева, Ю.Д. Дружкина // Международный научно-практический семинар "Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки". Минск, 14 июля 2015 г. Сборник докладов. – С. 72-74.

22. Васильева, Е.К. Уточнение деформационных характеристик полимерных текстильных нитей / Е.К. Васильева, М.А. Егорова // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб., СПГУТД. – 2014. – С. 254-255.

23. Васильева, Е.К. Прогнозирование и компьютерный расчет деформационно-восстановительных процессов технических тканей / Е.К. Васильева // Сборник тезисов Восемнадцатой Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов. СПб., 2013. – 132 с.

### **Свидетельства о государственной регистрации Программ для ЭВМ**

24. Свидетельство № 2016615064. Расчетное прогнозирование процессов ползучести функциональных наноматериалов с учетом интегрального критерия достоверности / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 18.03.2016.

25. Свидетельство № 2015614649. Расчетное прогнозирование вязкоупругой деформации одноосно ориентированных полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.

26. Свидетельство № 2015614650. Расчетное прогнозирование упругой деформации одноосно ориентированных полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.

27. Свидетельство № 2015614660. Расчетное прогнозирование пластической деформации одноосно ориентированных полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.

28. Свидетельство № 2014615586. Численный расчет восстановительных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 29.05.2014.

29. Свидетельство № 2014615842. Численный расчет деформационных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 04.06.2014.

30. Свидетельство № 2014616311. Численный расчет релаксационных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 19.06.2014.
31. Свидетельство № 2014616902. Системный анализ деформационных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
32. Свидетельство № 2014616903. Численный расчет упругой компоненты деформации текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
33. Свидетельство № 2014616904. Системный анализ релаксационных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
34. Свидетельство № 2014616911. Системный анализ упругих свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
35. Свидетельство № 2014617034. Системный анализ восстановительных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 09.07.2014.
36. Свидетельство № 2014617082. Системный анализ пластических свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 10.07.2014.
37. Свидетельство № 2014617092. Системный анализ вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 10.07.2014.
38. Свидетельство № 2012661272. Расчет деформационного процесса полимерных композитов / О.В. Блинов, Н.Г. Ростовцева, Е.К. Васильева [и др.]. – зарегистр. 11.12.2012.

Подписано в печать 08.08.2016. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,0. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № 157  
Отпечатано в типографии СПбГУПТД  
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, д.26