

На правах рукописи

Чалова Екатерина Игорьевна

**ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТКАНЕЙ ДЛЯ  
ПАРАШЮТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПАРАШЮТНЫХ  
СИСТЕМ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность:

05.02.22 - организация производства  
(текстильная и легкая промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна"

Научный руководитель: **Переборова Нина Викторовна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", профессор кафедры интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты: **Рымкевич Павел Павлович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского" Министерства обороны РФ, профессор кафедры физики

**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

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромской государственный университет"

Защита диссертации состоится 21 июня 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.07 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. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", <http://sutd.ru/>.

Автореферат разослан      мая 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07  
доктор экономических наук, профессор

Титова Марина Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Большое многообразие полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, предопределило развитие методов оценки их вязкоупругих свойств с целью получения инструмента технологического отбора образцов тканей, наилучшим образом удовлетворяющих задачам парашютостроения. При эксплуатации парашютов их купола подвергаются силовым нагрузкам, действующим непродолжительное время. Надежность парашютов определяется величиной предельной эксплуатационной нагрузки, которая не превосходит разрывного усилия. Парашюты, применяемые для различных целей, должны выполнять соответствующие функциональные задачи, откуда и следуют требования к их деформационным характеристикам. Исследование и прогнозирование вязкоупругих процессов изучаемых в работе полиамидных тканей проводится на основе их математического моделирования и системного анализа.

Оценка вязкоупругих свойств полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, помимо математического моделирования вязкоупругости и системного анализа, проводимого на основе данных краткосрочного эксперимента в режимах релаксации напряжений и ползучести, являющихся основополагающими процессами в теории вязкоупругости полимерных материалов, предполагает применение специально разработанных компьютерных программ. При математическом моделировании и системном анализе вязкоупругости полиамидных тканей возникают определенные сложности, так как макроструктура тканей может существенно отличаться от структуры других хорошо изученных полимерных текстильных материалов. Сложность исследования вызвана также и тем, что механическое поведение тканей зависит не только от деформационных свойств образующих их нитей, но и от структуры переплетения нитей в тканях и других геометрических факторов. Известные и широко применяемые методы прогнозирования вязкоупругих процессов полимерных волокон и нитей не всегда применимы для исследования аналогичных свойств материалов более сложной макроструктуры - технических тканей.

Внедрение методов математического моделирования и системного анализа вязкоупругости полиамидных тканей на практике становится возможным благодаря цифровизации методов расчета их деформационных и релаксационных процессов.

Важно при математическом моделировании и прогнозировании вязкоупругих процессов полиамидных тканей для парашютных куполов обращать внимание на учет влияния различных внешних факторов, среди которых: температурные воздействия, влажность, погодные условия, уровни и длительности механических воздействий. Изучение вязкоупругих свойств парашютных куполов, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, по которым нельзя получить полноценную оценку свойств материала. Особую ценность имеет решение задачи прогнозирования деформационных и релаксационных процессов для парашютных куполов, когда помимо прогнозирования вышеназванных процессов, приходится учитывать и условия эксплуатации.

Математическое моделирование и системный анализ вязкоупругих процессов полиамидных тканей для куполов парашютов является основой для улучшения качества изготавливаемых из них куполов парашютов и способствует, как увеличению надежности парашютов, так и повышению их функциональности.

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 20-38-90015 на тему: "Разработка методов математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полимерных тканей для куполов парашютов с целью

проектирования новых парашютных систем, обладающих улучшенными функциональными свойствами".

**Степень разработанности темы исследования.** Методы математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей для куполов парашютов требуется разрабатывать при организации их производства, так как это позволяет улучшить функционально-эксплуатационные характеристики указанных материалов. Моделирование, прогнозирование и качественная оценка вязкоупругости - это одно из развиваемых направлений исследования, которым посвящены исследования в научной школе, возглавляемой научным руководителем аспиранта - проф. Переборовой Н.В.

Большое многообразие полиамидных тканей для куполов парашютов, обосновывает необходимость разрабатывать, как новые математические модели их свойств, так и новые методы прогнозирования этих свойств.

**Цель работы** состоит в разработке комплекса методов математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых в куполах парашютов, на стадии организации их производства для повышения функциональности.

Основными **задачами** исследования являются:

- определение вязкоупругих характеристик полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, на основе математического моделирования и цифрового прогнозирования их релаксации и ползучести;
- прогнозирование упругих, вязкоупругих и пластических характеристик полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов;
- разработка цифровых методов прогнозирования вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов;
- разработка методов системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов;
- выявление влияния геометрических характеристик, линейной и поверхностной плотности, вида переплетения нитей в тканях, компонентного состава и других факторов на вязкоупругие свойства полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов;
- разработка цифровых методов, позволяющего проводить комплексное исследование эксплуатационных свойств и прогнозирование вязкоупругости полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов.

**Методология и методы исследования** вязкоупругих процессов полиамидных тканей, используемых для изготовления куполов парашютов, основаны на применении научных положений механики ориентированных полимеров, к классу которых относятся указанные ткани. Широко используются математические методы, численные методы и методы прикладной математики.

**Соответствие Паспорту специальности.** Работа выполнялась в рамках Паспорта специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям) и соответствует его следующим пунктам:

2. Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов в организацию производственных процессов.
3. Разработка методов и средств информатизации и компьютеризации производственных процессов на всех стадиях.
4. Моделирование и оптимизация производственных процессов. Экспертные системы в организации производственных процессов.
5. Повышение качества и конкурентоспособности продукции, системы контроля качества и сертификации продукции.

10. Разработка методов и средств мониторинга производственных и сопутствующих процессов.

11. Разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

#### **Научная новизна.**

1. Для математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых в куполах парашютов, впервые применено вероятностное распределение Коши, характеризующее свойством аддитивности, что позволяет описывать вероятностные распределения параметров сложных составных аддитивных систем, к которым относятся полиамидные ткани и парашютные купола.

2. Для прогнозирования упругих, вязкоупругих и пластических характеристик полиамидных тканей, используемых в куполах парашютов, впервые применены методы исследования, основанные на цифровизации вычислений процесса их растяжения, полученного с учетом вероятностного распределения Коши.

3. Новизна компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, состоит в том, что они разработаны на основе математической модели вязкоупругости с учетом вероятностного распределения Коши.

**Теоретическая и практическая значимость** состоит в том, что на основе математического моделирования, системного анализа вязкоупругих процессов, а также на основе методов прогнозирования упругих, вязкоупругих и пластических свойств полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, даются рекомендации по целенаправленному отбору этих тканей соответствующего функционального назначения.

Разработанные в диссертации методы используются в учебном процессе СПбГУПТД - при курсовом и дипломном проектировании, а также при проведении научных исследований.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанные методы математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, на основе вероятностного распределения Коши.

2. Разработанные методы цифрового прогнозирования упругих, вязкоупругих и пластических характеристик полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, на основе системного анализа их вязкоупругих процессов.

3. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по цифровому прогнозированию вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов.

**Степень достоверности результатов** Методы математического моделирования и системного анализа вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов прошли практическую апробацию в ЗАО "ТЕКСТИЛЬ-ИНВЕСТ", где подтвердили свою работоспособность.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались на Всероссийской конференции молодых ученых "Инновации молодежной науки" и на II Международной научной конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах".

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, среди которых 5 статей в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК", 3 свидетельства о государственной регистрации программ в РОСПАТЕНТе.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (176 наименований) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 140 страницах машинописного текста, иллюстрировано 19 рисунками и содержит 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Изготовление надежных, качественных и высоко функциональных парашютных систем предполагает решение задачи по отбору полиамидных тканей для их изготовления. Основанием для реализации такого отбора являются, в первую очередь, функциональные задачи парашюта, а также упругие, вязкоупругие и пластические свойства тканей, которые и позволяют регулировать качество и функциональность парашютной системы.

При помощи математического моделирования вязкоупругих процессов полиамидных тканей можно определить их деформационные, пластические, упругие и вязкоупругие характеристики. Точность этих определений зависит от степени адекватности построенной математической модели, в основе которой лежат данные краткосрочного эксперимента в режимах простой релаксации и простой ползучести.

Математическая модель вязкоупругости, построенная в данной работе при своей адекватности обладает еще одним основополагающим свойством - она содержит минимальное число физически обоснованных параметров, что, несомненно, положительно сказывается как на достоверности, так и на точности прогноза деформационных свойств.

В **первой главе** в обзоре научной литературы по тематике диссертации описаны подходы к исследованию деформационных свойств полимерных материалов (Колтунов М.А., Работнов Ю.Н., Ржаницин А.Р.), приведены известные варианты моделирования вязкоупругих свойств и прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов в зоне действия неразрушающих механических воздействий (Кукин Г.Н., Николаев С.Д., Романов В.Е., Соловьев А.Н., Щербаков В.П.), указаны варианты применения для этих целей математических методов (Больцман С., Вейерштрасс К., Вольтерра В., Лаплас П., Максвелл Дж.).

Во **второй главе** приведено описание объектов исследования - полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, изготовленных на ЗАО Королёвская фабрика "Передовая текстильщица" (Московская обл., г. Королёв). Технические характеристики указанных тканей приведены в табл.1. Полиамидные ткани отличаются друг от друга поверхностной плотностью, линейной плотностью нитей и типом переплетения нитей в тканях. Следствием этого является различие разрывных характеристик - значений разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

Анализ процесса растяжения полиамидных тканей позволит получить начальные сведения об их деформационном поведении. Диаграммы растяжения изучаемых тканей по основе приведены на рис.1.

Используя диаграммы растяжения, становится возможным геометрическое определение модуля упругости – он выражен значением тангенса угла наклона касательной к диаграмме растяжения в начальной точке. Чем больше значение модуля упругости - тем больше деформационная жесткость ткани.

Наибольшей деформационной жесткостью обладают ткани образцов №№ 10 и 11, образованные нитями линейной плотности 29,0 Текс. Наименьшей деформационной жесткостью обладают ткани образцов №№ 1 и 2, образованные нитями линейной плотности 3,3 текс.

Таблица 1 - Технические характеристики полиамидных тканей

№ образца ткани	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Линейная плотность нитей, Текс	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Ткацкое переплетение нитей в ткани	Число нитей на 1 см	
			основа	уток	основа	уток		основа	уток
1	34	3,3	0,28	0,28	22	22	Саржа 1/2	68	64
2	36	3,3	0,25	0,22	20	20	Полотняное	60	56
3	35	4,0	0,35	0,35	16	18	Саржа 1/2	62	59
4	38	4,0	0,34	0,34	15	17	Полотняное	56	52
5	50	5,0	0,41	0,41	23	23	Саржа 1/2	47	44
6	51	5,0	0,41	0,41	22	22	Саржа 1/3	56	52
7	58	5,0	0,48	0,46	23	23	Полотняное	46	42
8	118	15,6	0,97	0,97	26	26	Саржа 1/2	31	32
9	120	15,6	0,96	0,96	26	26	Саржа 1/3	31	32
10	184	29,0	1,4	1,4	22	22	Саржа 1/3	24	24
11	186	29,0	1,4	1,4	25	25	Саржа 1/2	24	24

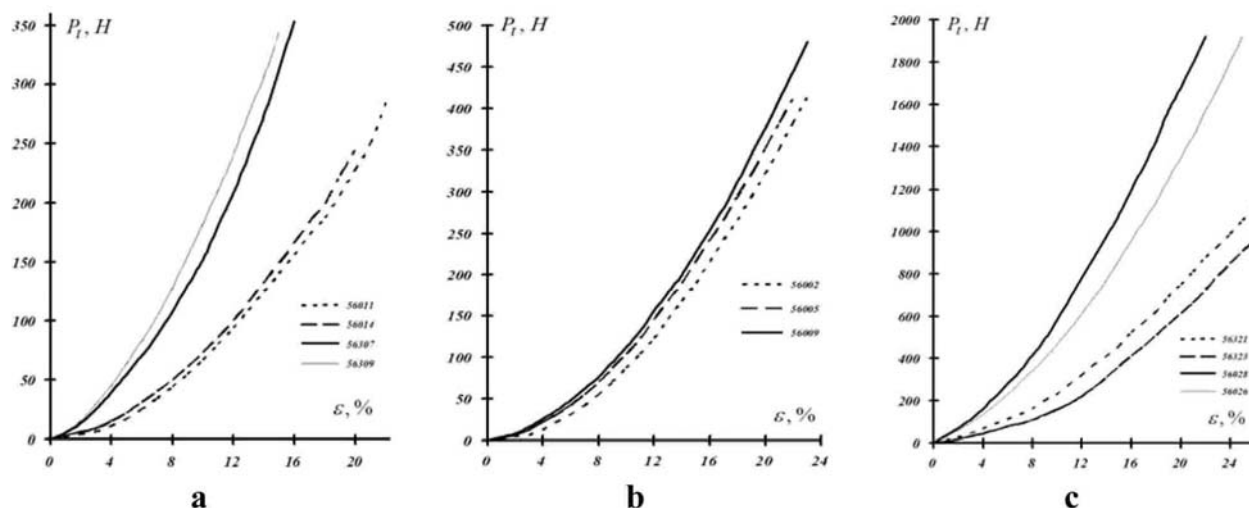


Рисунок 1 - Диаграммы растяжения полиамидных тканей по основе:  
**а** - с линейной плотностью нитей 3,3 Текс и 4,0 Текс;  
**б** - с линейной плотностью нитей 5,0 Текс;  
**с** - с линейной плотностью нитей 15,6 Текс и 29,0 Текс .

Построение математической модели вязкоупругости полиамидных тканей, наиболее адекватно отражающей деформационные процессы в этих тканях, основано на аппроксимации экспериментальных "семейств" значений модуля релаксации и податливости обобщенными кривыми подобными графику функции НАЛ (нормированный арктангенс логарифма приведенного времени) в логарифмическо-временной системе координат (рис.2).

Преимущество функции НАЛ перед другими нормированными функциями, применяемыми в математических моделях вязкоупругости полимерных материалов состоит в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее свойством аддитивности, т.е. сумма случайных величин, подчиненных закону Коши, также подчиняется этому закону.

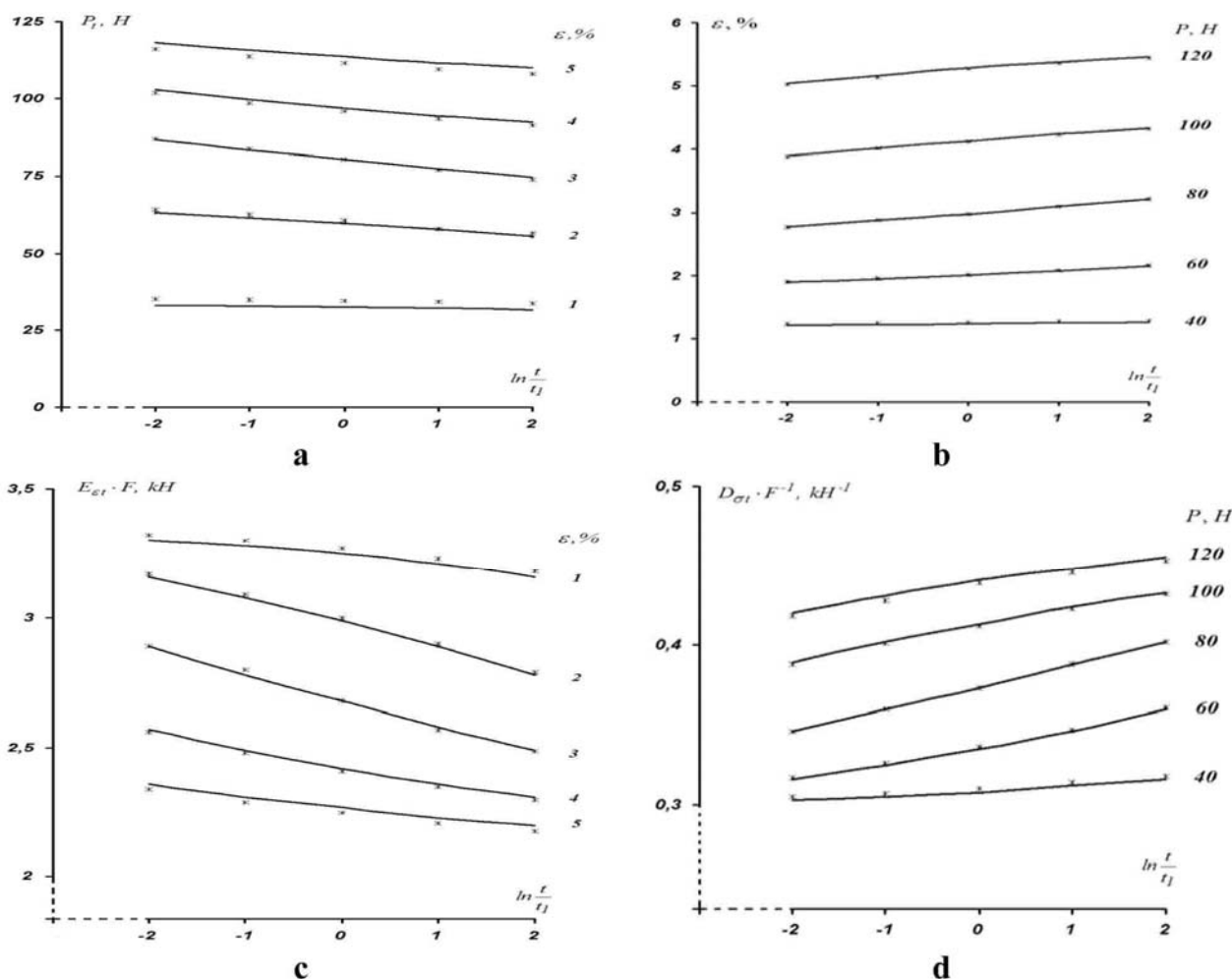


Рисунок 2 - Экспериментальные "семейства" кривых релаксации (а), ползучести (b), модуля релаксации (с), податливости (d) полиамидной ткани образца № 11 по основе,  $T = 20^{\circ}C$  (линии - эксперимент, \*- расчетные точки, вычисленные по математической модели (1)-(2))

Это означает, что если релаксационные и деформационные характеристики (в частности, времена релаксации и запаздывания) полимерных волокон и нитей, из которых образованы ткани, распределены по вероятностному закону Коши, то по этому же закону будут распределены релаксационные и деформационные характеристики самих тканей. То есть математическая модель вязкоупругости, построенная на основе функции НАЛ и адекватно отражающая релаксационные и деформационные свойства полиамидных нитей и волокон будет также адекватно отражать релаксационные и деформационные свойства полиамидных тканей.

Математическая модель вязкоупругости полиамидных тканей на основе функции НАЛ имеет вид:

$$\begin{cases} E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \cdot \varphi_{n\varepsilon}, \\ D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot \varphi_{n\sigma} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$  - модуль релаксации,  $E_0$  - модуль упругости,  $E_{\infty}$  - модуль вязкоупругости,  $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$  - податливость,  $D_0$  - начальная податливость,  $D_{\infty}$  - предельная равновесная податливость,  $\varepsilon$  - деформация,  $\sigma = P/F$  - напряжение,  $P$  - усилие при растяжении,  $F$  - площадь поперечного сечения образца,  $t$  - время,  $\varphi_{n\varepsilon}$  и  $\varphi_{n\sigma}$  - нормированные функции релаксации и ползучести соответственно, имеющие вид:



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

где  $1/b_{n\varepsilon}$  - параметр интенсивности процесса релаксации,  $1/b_{n\sigma}$  - параметр интенсивности процесса ползучести,  $\tau_\varepsilon$  - время релаксации (время за которое проходит половина процесса релаксации при величине деформации  $\varepsilon$ ),  $\tau_\sigma$  - время запаздывания (время за которое проходит половина процесса ползучести при величине напряжения  $\sigma$ ),  $t_l$  - базовое лабораторное время.

Близость расчетных точек усилия  $P$ , деформации  $\varepsilon$ , модуля релаксации  $E_o F$  и податливости  $D_o \cdot F^{-1}$  к экспериментальным значениям (рис.1) подтверждает правильность выбора математической модели вязкоупругости в виде (1) - (2).

Таблица 2 - Расчетные характеристики релаксации и ползучести полиамидных тканей

№ образца ткани	$E_o F$ , кН	$E_\infty F$ , кН	$1/b_{n\varepsilon}$	$D_o \cdot F^{-1}$ , кН <sup>-1</sup>	$D_\infty F^{-1}$ , кН <sup>-1</sup>	$1/b_{n\sigma}$	$k_{rel}$ , %
1	3,1	1,4	0,42	0,32	0,70	0,62	55
2	3,8	1,9	0,49	0,26	0,52	0,66	50
3	3,3	1,8	0,38	0,30	0,56	0,58	46
4	4,8	2,2	0,48	0,21	0,46	0,64	55
5	3,6	1,9	0,27	0,28	0,52	0,39	46
6	3,7	1,8	0,28	0,27	0,55	0,40	50
7	5,2	1,9	0,40	0,19	0,52	0,55	63
8	5,0	2,2	0,22	0,20	0,46	0,33	57
9	5,5	2,1	0,23	0,18	0,47	0,34	61
10	5,8	1,8	0,21	0,17	0,56	0,31	69
11	5,9	2,0	0,22	0,17	0,50	0,34	66

В табл.2 приведены характеристики релаксации и ползучести полиамидных тканей для парашютных куполов, рассчитанные на основе математической модели (1), (2). Благодаря данным характеристикам можно определить, ткань с наибольшей релаксационной интенсивностью и интенсивностью ползучести. Соответственно, ткань с большими коэффициентами релаксации и ползучести, можно назвать пластичной, но менее износостойкой чем ткань с меньшими коэффициентами.

По данным табл.2 определяются и коэффициенты степени релаксации (степени полноты прохождения процесса релаксации)  $k_{rel}$  и степени ползучести (степени полноты прохождения процесса ползучести)  $k_{pol}$ :

$$\begin{cases} k_{rel} = \frac{E_o F - E_\infty F}{E_o F} \cdot 100\%, \\ k_{pol} = \frac{D_\infty F^{-1} - D_o F^{-1}}{D_o F^{-1}} \cdot 100\% \end{cases}, \quad (3)$$

показывающие насколько полно проходят процессы релаксации и ползучести. Чем больше значение коэффициента степени релаксации, тем большими релаксационными способностями обладает ткань. Аналогично можно сказать и про

процесс ползучести. При значении коэффициента степени релаксации  $k_{rel} = 100\%$  ткань релаксирует полностью. Для такой ткани значение модуля вязкоупругости  $E_\infty$  равно нулю. Случай же равенства  $k_{pol} = 100\%$  соответствует бесконечному значению предельно-равновесной податливости  $D_\infty$ , что означает отсутствие верхней асимптоты у графика обобщенной кривой податливости. Значения коэффициентов степени релаксации полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов также приведено в табл.2, откуда видно, что наиболее полно релаксирует ткань образца № 10, а наименее полно - ткань образца № 2.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию релаксационных и деформационных процессов на основе математической модели (1), (2) с использованием классических интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра.

Обозначая аргументы-функционалы математической модели (1), (2) через  $W_{\varepsilon t}$  и  $W_{\sigma t}$ :

$$\begin{cases} W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_l} \right) + \ln \left( \frac{t_l}{\tau_\varepsilon} \right) \right), \\ W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_l} \right) + \ln \left( \frac{t_l}{\tau_\sigma} \right) \right) \end{cases}, \quad (4)$$

получаем форму записи интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра, применительно к случаю математической модели (1), (2):

$$\begin{cases} \sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon, t-\theta}^2} \cdot \frac{1}{t-\theta} d\theta, \\ \varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma, t-\theta}^2} \cdot \frac{1}{t-\theta} d\theta \end{cases}. \quad (5)$$

Интегральные соотношения (5), построенные на основе математической модели вязкоупругости (1), (2), позволяют проводить прогноз релаксационных и деформационных процессов полиамидных материалов, применяемых для изготовления куполов парашютов.

Функция НАЛ обладает свойством замедленной сходимости к своим асимптотическим значениям "0" и "1". Это является основанием к значительному расширению временной области доверительного прогнозирования указанных процессов, позволяя получать более точные результаты прогноза при прогнозировании, как квазимгновенных релаксационных и деформационных процессов - при малых временах, так и длительных процессов - при больших временах.

Прогнозирование релаксационного и деформационного поведения полиамидных тканей на "малые" времена особенно важно для анализа эксплуатационных возможностей парашютных куполов, так как от момента раскрытия парашюта (начала деформационного процесса) во многом зависит безопасность и жизнь парашютиста. Прогнозирование релаксационных и деформационных процессов на "большие" времена также актуальна, так как позволяет определить степень надежности парашюта при затяжных прыжках.

Пример прогнозирования деформационно-восстановительного процесса полиамидной ткани образца № 11, применяемой для изготовления куполов парашютов, приведен на рис.3.

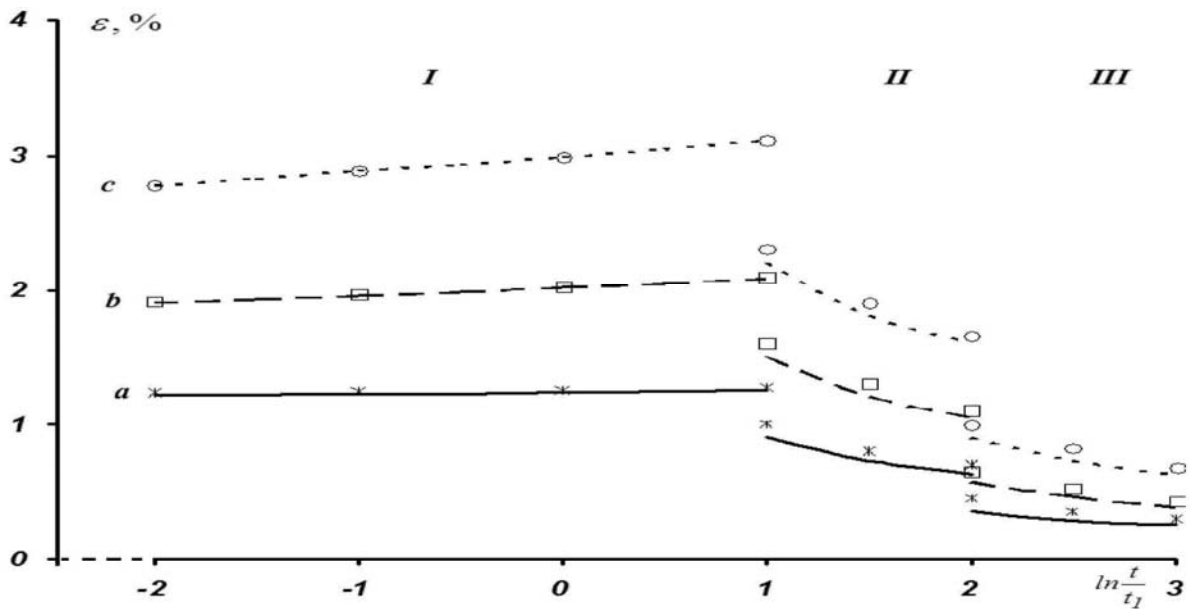


Рисунок 3 - Деформационно-восстановительный процесс с половинной и полной разгрузкой полиамидной ткани образца № 11,  $T = 20^{\circ}C$ : I зона - нагружение: а -  $P = 40$  Н; б -  $P = 60$  Н; с -  $P = 80$  Н; II зона - половинная разгрузка: а -  $P = 20$  Н; б -  $P = 30$  Н; с -  $P = 40$  Н; III зона - полная разгрузка: а -  $P = 0$  Н; б -  $P = 0$  Н; с -  $P = 0$  Н (линии - эксперимент, \* - расчетные точки а; □ - расчетные точки б; ○ - расчетные точки с;)

В четвертой главе изучаются возможные варианты определения упругих, вязкоупругих и пластических свойств полиамидных тканей для изготовления куполов парашютов.

Одним из возможных вариантов определения указанных свойств является разложение полной деформации  $\varepsilon_t$  на составные части: упругую  $\varepsilon_y$ , вязкоупругую  $\varepsilon_v$  и пластическую  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_y + \varepsilon_v + \varepsilon_p \quad (6)$$

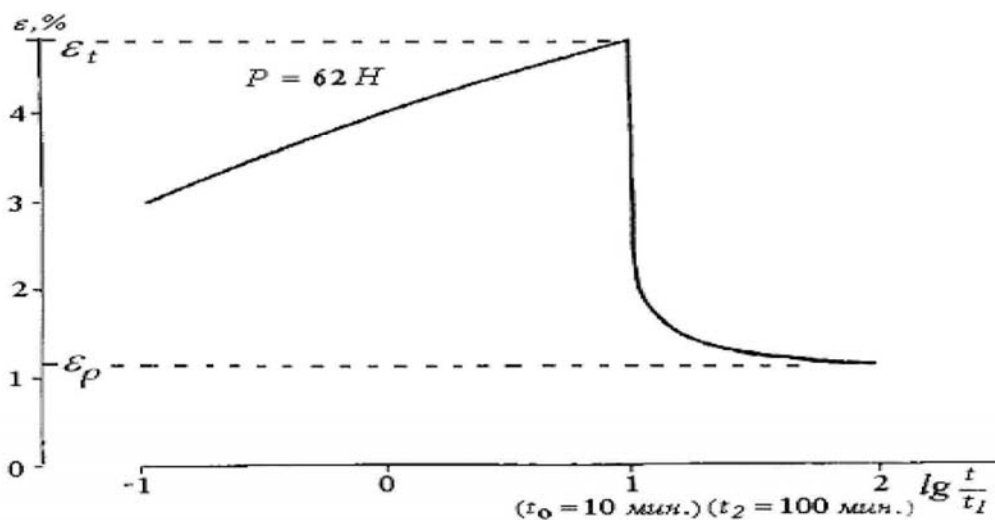


Рисунок 4 - Определение пластической компоненты деформации полиамидной ткани образца № 3 по деформационно-восстановительному процессу,  $T = 20^{\circ}C$ .

Пластическую составляющую  $\varepsilon_p$  полной деформации  $\varepsilon_t$  можно определить из деформационно-восстановительного процесса. Пример определения пластической компоненты деформации приведен на рис.4.

Их рис.4 видно, что при значении полной деформации  $\varepsilon_t = 5,0\%$  значение пластической составляющей деформации  $\varepsilon_p = 1,2\%$ .

Для определения упругой  $\varepsilon_y$  и вязкоупругой  $\varepsilon_v$  составляющей полной деформации  $\varepsilon_t$  необходимо воспользоваться интегральными соотношениями Больцмана-Вольтерра (5), которые преобразуются в следующие уравнения:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = \varepsilon_t - \left(1 - E_\infty E_o^{-1}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t} ds, \\ \varepsilon_v + \varepsilon_p = \left(1 - E_\infty E_o^{-1}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t} ds \end{cases} \quad (7)$$

Разделение полной деформации  $\varepsilon_t$  на составляющие позволяет проанализировать упругие, вязкоупругие и пластические свойства что особо актуально при отборе полиамидных тканей для изготовления куполов парашютов. С одной стороны, парашютные купола должны обладать упругими свойствами, позволяющими сохранить целостность купола и обеспечить достаточную упругость парашюту. Однако, с другой стороны, наличие вязкоупругой и пластической составляющих деформации у тканей, из которых они изготовлены, позволяет гасить вредные механические воздействия на организм парашютиста, уменьшая силовые перегрузки и повышая комфортность прыжка, что также немаловажно.

На рис.5 приведены данные по разделению полной деформации  $\varepsilon_t$  на упругую и вязкоупруго-пластические составляющие на основе интегральных соотношений (7). Из графиков видно, что с ростом полной деформации доля упругой деформации сокращается, а доля вязкоупруго-пластической деформации возрастает. Наибольшая потеря упругих свойств с ростом деформации наблюдается у ткани образца № 1, а наименьшая - у ткани образца № 10.

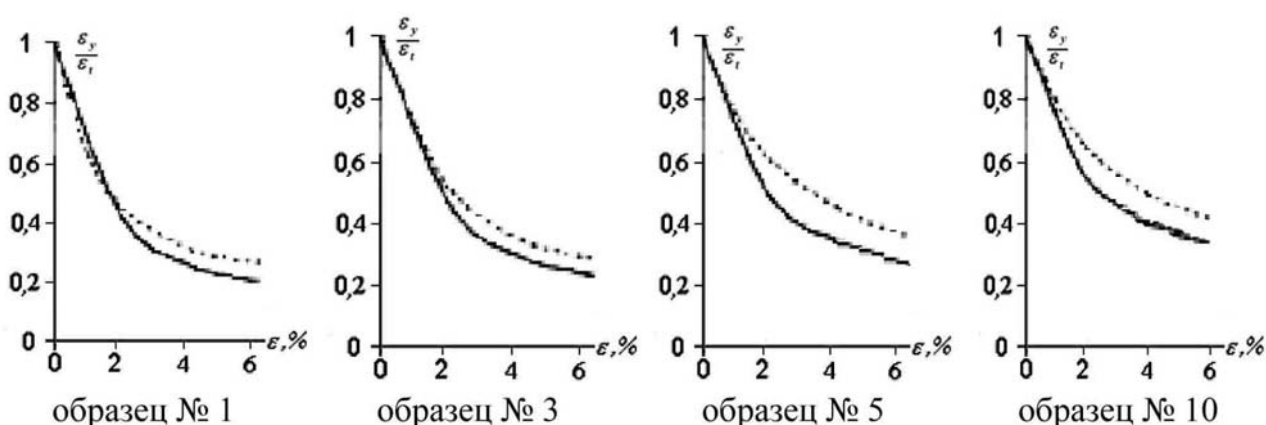


Рисунок 5 - Относительная доля упругой деформации  $\varepsilon_y/\varepsilon_t$  (ось ординат) при деформировании полиамидных тканей для куполов парашютов в зависимости от полной деформации  $\varepsilon_t$ , % (ось абсцисс), рассчитанная по процессу равномерного растяжения со скоростью деформирования  $\dot{\varepsilon} = 0,083 \text{ c}^{-1}$  при температуре  $T = 20^\circ \text{C}$  (пунктир - исходная ткань; сплошная линия - ткань после обработки ультрафиолетом в течение 240 часов).

В пятой главе обобщаются результаты диссертации, касающиеся целенаправленного отбора полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов. Систематизируются методы, разработанные в работе, на основе которых осуществляется отбор тканей, обладающих заданными релаксационными, деформационными, упругими, вязкоупругими и пластическими свойствами.

Сравнивая характеристики релаксации и ползучести (табл.2) образцов полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, образованных из нитей разной линейной плотности, при прочих однотипных условиях, получаем, что наиболее интенсивно деформационные процессы протекают у ткани образца № 2, а наименее интенсивно - у ткани артикула образца № 10.

Отличительной чертой парашютных куполов, изготовленных из ткани образца № 10 (рис.5) является преобладание упругой составляющей деформации над вязкоупруго-пластической. На практике это означает, что такие купола медленнее изнашиваются, "пружинят" на раскрытии.

Для тканей же образца № 1 и образца № 3 (рис.5) мы видим обратное - вязкоупруго-пластическая деформация преобладает над упругой (уже при деформировании более чем на 2 %). Это означает, что парашюты быстрее изнашиваются, но они заметно смягчают момент раскрытия, что более комфортно для парашютистов.

В работе проанализирована также зависимость деформационных свойств полиамидных тканей, применяемых для изготовления парашютных куполов, от вида переплетения нитей. Например, сравнивая ткани (табл.2) одного компонентного состава, но разного вида переплетения нитей, видим, что для тканей с полотняным переплетением деформационные процессы идут более интенсивно, чем у тканей с саржевым переплетением нитей. Из табл.2 также видно, что, чем меньше линейная плотность нитей - тем более интенсивно проходят деформационные процессы, что сказывается на маневренности парашютов. Поэтому рекомендуется маневренные и высокоскоростные парашюты оснащать более тонкими куполами, несмотря на их более быстрый износ.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная математическая модель вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, адекватно отражает релаксационные и деформационные свойства указанных тканей и позволяет достаточно достоверно определять их релаксационные и деформационные характеристики.

2. Предложенное математическое моделирование вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, позволяет прогнозировать упругие, вязкоупругие и пластические свойства указанных тканей.

3. Разработанные методы определения вязкоупругих характеристик полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, применяются при проведении отбора образцов тканей по критериям интенсивности и степени полноты прохождения релаксационных и деформационных процессов.

4. Разработанные методы цифрового прогнозирования вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, применяются для определения упругих, вязкоупругих и пластических свойств указанных тканей, а также, в последующем - для проведения отбора тканей по критериям упругости, вязкоупругости и пластичности.

5. Проведенный системный анализ вязкоупругих процессов полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, позволил дать рекомендации в части применения указанных тканей для изготовления парашютных систем заданной функциональности.

6. Разработанное и объединенное общим интерфейсом программное обеспечение, является основой всестороннего исследования вязкоупругих свойств и прогнозирования вязкоупругости полиамидных тканей, применяемых для изготовления куполов парашютов, а также средством проведения их отбора по деформационным и эксплуатационным характеристикам.

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

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

1. Вагнер В.И., Козлов А.А., Литвинов А.М., Овсянников Д.А., Чалова Е.И. Системный анализ вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов// Химические волокна, 2021, № 3, с. 69-72.

на англ. яз.: V. I. Wagner, A. A. Kozlov, A.M. Litvinov, E. I. Chalova. Systematic Analysis of Viscoelastic-Plastic Properties of Marine Polymer Ropes//Fibre Chemistry, 2021, vol. 53, No. 3, pp. 218 - 221.

2. Чалова Е.И., Переборова Н.В., Макарова А.А., Киселев С.В. Учет влияния переменной температуры при математическом моделировании релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов//Химические волокна, 2020, № 4, с. 54 - 56.

англ.вар.: E.I. Chalova, N.V. Pereborova, A.A. Makarova, S.V. Kiselev. Influence of Variable Temperature on Mathematical Modeling of Relaxation-Recovery Processes of Polymer Textiles// Fibre Chemistry, 2020, vol. 52, № 4, pp. 287-290.

3. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Чалова Е.И., Разумеев К.Э. Методы моделирования и прогнозирования деформационных режимов эксплуатации геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна, 2022, № 2.

англ.вар.: Pereborova N.V., Makarov A.G., Busygin K.N., Chalova E.I., Razumeev K.E. Methods for modeling and predicting deformation modes of operation of geotextile nonwoven materials// Fibre Chemistry, 2022, Vol. 54, No. 2.

4. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Овсянников Д.А. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. - 2022. - № 1, с. 5-10.

5. Чалова Е.И., Переборова Н.В. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных парашютных строп// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. - 2022. - № 1, с. 19-26.

#### **Другие публикации**

6. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Чалова Е.И., Бусыгин К.Н. Спектральный анализ деформационных и восстановительных свойств нетканых материалов// Дизайн. Материалы. Технология, 2021, № 4, с. 127-133.

7. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Бусыгин К.Н., Чалова Е.И. Системный анализ деформационных процессов арамидных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2021, № 4, с. 21-27.

8. Чалова Е.И., Попова В.А., Федоренко Е.О., Боталов М.А., Дятченко А.А. Компьютерное моделирование деформационных и релаксационных процессов тканей для парашютных куполов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. - 2021. - № 1, с. 44-51.
9. Чалова Е.И., Попова В.А., Федоренко Е.О., Боталов М.А., Дятченко А.А. Компьютерное прогнозирование деформационных и релаксационных процессов полимерных тканей для парашютных куполов // Всероссийская конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки", 2021, с. 16-17.
10. Переборова Н.В., Чалова Е.И. Проведение качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов // Всероссийская конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки", 2021, с. 21-22.
11. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Бусыгин К.Н. Моделирование и прогнозирование деформационных свойств полимерных текстильных материалов // II Международная научная конференция "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах", СПб., 2021, с. 113-116.
12. Переборова Н.В., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Математическое моделирование релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их функциональных свойств//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки, 2020, № 1, с. 69-79.
13. Переборова Н.В., Киселев С.В., Макарова А.А., Чалова Е.И. Математическое моделирование и прогнозирование функционально-эксплуатационных свойств полимерных тканей для куполов парашютов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки, 2020, № 3, с. 76-85.
14. Переборова Н.В., Киселев С.В., Макарова А.А., Чалова Е.И. Математическое моделирование, прогнозирование и системный анализ функциональных свойств полимерных материалов для парашютостроения// Дизайн. Материалы. Технология, 2020, № 4, с. 119-124.
15. Переборова Н.В., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Методология расчетного прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности, 2020, № 1, с. 5-19.
16. Переборова Н.В., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Разработка методов спектрального анализа и прогнозирования вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности, 2020, № 2, с. 51-63.
17. Переборова Н.В., Чалова Е.И. Применение системного анализа для исследования деформационных свойств полиамидных тканей для парашютов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии, 2020, № 2, с. 60-70.
18. Переборова Н.В., Чалова Е.И. Проведение качественного анализа релаксационных и деформационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов при организации их производства//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии, 2020, № 2, с. 24-34.

19. Козлов А.А., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Разработка методов определения и оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов//Иновации молодежной науки, 2020, с. 16-17.

20. Козлов А.А., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Компьютерное прогнозирование релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов//Иновации молодежной науки, 2020, с. 17-18.

21. Чалова Е.И., Мусиенко К.Н., Бусыгин К.Н., Терушкина О.Б., Воронина О.С., Переборова Н.В. Исследование функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов на основе моделирования их вязкоупругости // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019, № 2, с. 89-100.

22. Вагнер В.И., Чалова Е.И., Егоров И.М., Егорова М.А., Переборова Н.В., Овсянников Д.А. Варианты моделирования и компьютерного прогнозирования вязкоупругости полимерных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019, № 2, с. 101-111.

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

23. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Макарова А.А., Козлов А.А. Системный анализ вязкоупругих процессов полимерных тканей для парашютов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665369 от 26.11.2020.

24. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Макарова А.А., Козлов А.А. Моделирование вязкоупругих процессов полимерных тканей для парашютов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665370 от 26.11.2020.

25. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Макарова А.А., Козлов А.А. Оценка функциональных свойств полимерных тканей для парашютов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665368 от 26.11.2020.

Оригинал подготовлен автором

Подписано в печать 19.04.2022. Печать трафаретная

Усл. печ. л. 0,9. Формат 60 x 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ 198.

Отпечатано в типографии СПбГУПТД

121028, г. Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26