

На правах рукописи

Вагнер Виктория Игоревна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА И
КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПАРАШЮТНЫХ СТРОП**

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" Министерства образования и науки Российской Федерации, заведующий кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты: **Слуцкер Александр Ильич** доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник

Романова Алла Александровна кандидат технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный экономический университет" Министерства образования и науки Российской Федерации, доцент кафедры дисциплин.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" Министерства образования и науки Российской Федерации.

Защита диссертации состоится 14 июня 2016 г. в 10:00 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 "___" мая 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.01
доктор технических наук, профессор

Полякова Екатерина Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В основе разрабатываемых методов качественного анализа и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных строп лежит математическое моделирование и системный анализ вязкоупругих процессов полимеров. Основополагающими вязкоупругими процессами полимерных материалов являются, прежде всего, процессы релаксации напряжения и ползучесть.

Решение задачи качественного анализа деформационных свойств парашютных строп позволит улучшить эксплуатационные характеристики отечественных парашютных систем, повысить их безопасность и функциональность. Парашюты применяются не только для спуска людей и техники, но и для торможения самолетов при посадке, космических приземляемых аппаратов и др. Поэтому задача исследования их эксплуатационных характеристик и повышения надежности парашютных систем является актуальной.

Парашютные стропы представляют собой текстильные изделия в виде плетеных шнуров и тканых лент, изготовленных из полимерных нитей, различного компонентного состава, различной плотности и различной структуры. Все эти факторы, несомненно, влияют на деформационные свойства готовых изделий. Поэтому для оценки качественных характеристик эксплуатационных свойств парашютных строп необходим их всесторонний системный анализ, который может быть проведен на основе применения инновационных компьютерных технологий - начиная со стадии проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных и заканчивая анализом компьютерных расчетов и подведения итогов исследования.

Изучаемые деформационные свойства парашютных строп могут существенным образом зависеть от таких факторов, как влияние изменения температуры, влажности, других погодных условий, а также чередования величин и длительностей механических нагрузок. Влияние этих факторов зачастую осуществляется на протяжении кратковременных процессов, т.к. спускаемый на парашюте объект за достаточно малый промежуток времени проходит разные температурные и атмосферные слои. Кроме того, парашютные стропы в процессе эксплуатации подвергаются значительным нагрузкам в течение малых времен. При этом, в целях обеспечения безопасности, целесообразно ограничить максимальную эксплуатационную нагрузку значением в 30% от разрывного усилия.

Большое разнообразие современных полимерных материалов для изготовления парашютных строп, также как и разработка новых типов парашютных систем, дает импульс к поиску новых и совершенствованию известных методов математического моделирования их деформационных свойств, так как все это способствует повышению достоверности прогнозирования деформационных процессов, что, в свою очередь способствует повышению надежности парашютов и улучшению их качественных эксплуатационных характеристик.

Работа выполнялась в рамках Базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ на 2014 - 2016 гг. № 2014/186, Проект № 156: «Оптимизация структуры и свойств функциональных полимерных наноматериалов на основе математического моделирования, системного анализа и компьютерного прогнозирования их деформационных, релаксационных и восстановительных характеристик», а также в рамках гранта РФФИ на 2015 - 2017 гг. № 15-08-06325 «Разработка научных основ моделирования и прогнозирования структуры и физико-механических свойств функциональных полимерных текстильных наноматериалов с

применением системного анализа, численных методов и интегральных критериев оптимизации».

Цель работы состоит в разработке методов качественного анализа и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных строп на основе их математического моделирования и компьютерного прогнозирования.

Основными **задачами** исследования являются:

- разработка методов математического моделирования деформационных свойств полимерных парашютных строп;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационных свойств полимерных парашютных строп;
- качественная оценка деформационных свойств полимерных парашютных строп;
- сравнительный анализ и технологический отбор полимерных парашютных строп, обладающих наилучшими эксплуатационными и функциональными характеристиками.

Методы исследования. Основой исследования явились современные представления, положения и разработки, применяемые в математическом моделировании, системном анализе, текстильном материаловедении. Широко используются различные методы вычислительной математики, вязкоупругости полимеров, вычислительные и компьютерные технологии.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке математических моделей релаксационных и деформационных свойств применительно к полимерным парашютным стропам;
- разработке компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационных свойств полимерных парашютных строп;
- разработке методики качественной оценки деформационных свойств полимерных парашютных строп;
- компьютерной реализации методики качественной оценки деформационных свойств полимерных парашютных строп.

Практическая значимость работы.

Разработанные математические модели релаксационных и деформационных свойств полимерных парашютных строп целесообразно использовать на стадии их проектирования с целью повышения надежности и расширения функциональной применимости парашютов.

Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационных свойств полимерных парашютных строп служат основой для практического внедрения компьютерных технологий в процесс их проектирования.

Разработанная методика качественной оценки деформационных свойств полимерных материалов позволяет выявить наиболее перспективные материалы для изготовления парашютных строп и провести их сравнительный анализ.

Материалы диссертации используются в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации, а также в научных исследованиях лаборатории информационных технологий Санкт-петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

Апробация результатов работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались соискателем на международных, всероссийских и региональных

научных конференциях и семинарах: "Международный научно-практический семинар "Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки", "Всероссийская научная конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки"", "Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов".

Автор диссертационного исследования является неоднократным победителем конкурсов грантов для аспирантов, проводимых Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, грантов Санкт-петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, а также получателем аспирантских стипендий Президента РФ.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликована 51 научная работа (в том числе 5 без соавторов), из которых 25 - в ведущих рецензируемых научных изданиях из "Перечня ВАК" (в том числе 3 без соавторов), 23 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (184 наименования) и трех приложений. Основное содержание диссертации изложено на 147 страницах машинописного текста, иллюстрировано 23 рисунками и содержит 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности научного направления по проведению качественного анализа и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных строп на основе их математического моделирования и компьютерного прогнозирования, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** дается обзор литературы по тематике диссертации, описываются задачи, связанные разработкой методов качественного анализа и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных, а также известные варианты их решения.

Для решения задач по проведению качественного анализа и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных строп необходим системный подход. Он связан, как со сложностью математического моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных материалов, к классу которых относятся парашютные стропы, так и с многообразием внешних воздействий на них в виде температурных изменений, влияния переменной влажности, переменных нагрузок т.д.

Несмотря на определенные сложности проведения такого исследования, оно является необходимым для повышения, как надежности самих парашютов, так и для придания им необходимых функциональных свойств. Качественные оценки деформационных свойств полимерных парашютных строп служат основой создания современных парашютов, отвечающих различным назначениям.

Вторая глава посвящена вопросам математического моделирования деформационных свойств полимерных текстильных парашютных строп.

В работе исследовались парашютные стропы, произведенные из полимерных нитей, технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Технические характеристики парашютных строп приведены в табл. 2.

Таблица 1 - Технические характеристики полимерных нитей, применяемых для изготовления парашютных строп

Материал	Линейная плотность, текс	Удлинение при разрыве, %	Разрывное напряжение, ГПа
Капрон	187	28	0,57
Дайнема	125	3,5	1,36
Микролайн	98	12,3	0,93
Кевлар	119	15,1	0,96

Таблица 2 - Технические характеристики парашютных строп

Название	Компонентный состав	Разрывная деформация, %	Разрывная нагрузка, кН	Изготовитель
ШКП-60	Капрон	29	0,6	ООО НПТП «Текстор» (Россия, Казань)
ШКП-150	Капрон	31	1,5	ООО НПТП «Текстор» (Россия, Казань)
SK 78	Дайнема	4,0	7,8	DSM (Нидерланды)
SK 75	Дайнема	3,9	7,5	DSM (Нидерланды)
SK 65	Дайнема	3,7	6,5	DSM (Нидерланды)
SK 60	Дайнема	3,7	6,0	DSM (Нидерланды)
SK 25	Дайнема	3,6	2,5	DSM (Нидерланды)
Спектра-550	Микролайн	16,4	2,5	Honeywell (США)
Спектра-725	Микролайн	16,9	3,3	Honeywell (США)
Спектра-825	Микролайн	17,1	3,7	Honeywell (США)
Спектра-1000	Микролайн	17,2	4,5	Honeywell (США)
Opale-600	Кевлар	13,2	6,0	Opale Paramodes (Франция)

На стадии предварительного изучения деформационных свойств изучаемых парашютных строп и образующих их полимерных нитей проводилось математическое моделирование релаксации напряжения и ползучести указанных материалов на основе математических моделей релаксации

$$E_t = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_t \quad (1)$$

и ползучести

$$D_t = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \varphi_t \quad (2)$$

с нормированной дробно-степенной функцией φ_t , которая может быть представлена в виде гиперболического тангенса (ГТ):

$$\varphi_t = \left(1 + \left(\frac{t}{\tau} \right)^{-A} \right)^{-1} = \left(1 + \exp \left(-A \cdot \ln \frac{t}{\tau} \right) \right)^{-1} = \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A}{2} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right) \quad (3)$$

Параметрами модели (1) при описании модуля релаксации

$$E_t = \sigma_t / \varepsilon, \quad (4)$$

являются два его асимптотических значения

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_t, \quad E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_t, \quad (5)$$

функция времен релаксации $\tau = \tau_\varepsilon$ и характеристика интенсивности релаксации $A = A_\varepsilon$.

Аналогично, параметрами модели (2) при описании податливости

$$D_t = \varepsilon_t / \sigma, \quad (6)$$

являются два ее асимптотических значения

$$D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_t, \quad D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} D_t, \quad (7)$$

функция времен запаздывания $\tau = \tau_\sigma$ и характеристика интенсивности ползучести $A = A_\sigma$.

Здесь: ε - деформация, σ - напряжение, t - время.

Для удобства практического использования, математические модели (1) и (2) были упрощены за счет перехода от функций времен релаксации и времен запаздывания к их средним значениям в виде соответствующих констант, определяющих среднее релаксационное время

$$\bar{\tau}_\varepsilon = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{-1} \cdot \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon \cdot d\varepsilon, \quad (8)$$

и среднее время запаздывания

$$\bar{\tau}_\sigma = \sigma_0 / (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \int_{\sigma_1/\sigma_0}^{\sigma_2/\sigma_0} \tau_\sigma \cdot d\frac{\sigma}{\sigma_0}. \quad (9)$$

здесь ε_1 и σ_1 - наименьшие значения деформации и напряжения из соответствующих интервалов исследуемых деформаций и напряжений, ε_2 и σ_2 - наибольшие значения из соответствующих интервалов исследуемых деформаций и напряжений, σ_0 - нормирующая константа.

Такое упрощение математических моделей релаксации и ползучести является оправданным, т.к. нас интересуют, прежде всего, качественные характеристики эксплуатационных свойств парашютных строп и образующих их полимерных нитей. Вместе с тем, указанная модификация математических моделей (1) и (2) существенно упрощает их практическое применение.

Выбор в качестве основы математических моделей релаксации и ползучести парашютных строп и образующих их полимерных нитей функции ГТ не случаен, так как вероятностное распределение, задаваемое этой функцией является достаточно близким по своим свойствам к нормальному распределению, но, вместе с тем, функция ГТ - элементарная функция, что нельзя сказать об интегральной функции нормального распределения. Все это заметно упрощает аналитические преобразования с математическими моделями (1) и (2).

Таблица 3 - Расчетные параметры-характеристики релаксации полимерных нитей, применяемых для изготовления текстильных парашютных строп

Материал	$E_0, ГПа$	$E_\infty, ГПа$	A_ε	$\bar{\tau}_\varepsilon \cdot 10^3, с$
Капрон	8,6	3,8	8,1	1,1
Дайнема	11,4	4,7	6,8	1,9
Микролайн	9,1	4,1	4,9	1,6
Кевлар	7,8	3,2	5,6	1,7

Таблица 4 - Расчетные параметры-характеристики релаксации текстильных полимерных парашютных строп

Название	$E_0 \cdot S, kH$	$E_\infty \cdot S, kH$	A_ε	$\bar{\tau}_\varepsilon \cdot 10^3, c$
ШКП-60	26	7,8	8,9	1,3
ШКП-150	28	8,1	9,6	1,4
SK 78	39	9,8	7,9	2,7
SK 75	38	9,6	7,8	2,5
SK 65	36	9,5	7,6	2,4
SK 60	35	9,3	7,4	2,3
SK 25	32	9,2	7,1	2,1
Спектра-550	18	6,3	4,7	1,6
Спектра-725	21	7,6	4,9	1,7
Спектра-825	23	8,2	5,2	1,8
Спектра-1000	25	8,9	5,6	2,0
Орале-600	29	11,4	6,3	1,9

Таблица 5 - Расчетные параметры-характеристики ползучести полимерных нитей, применяемых для изготовления текстильных парашютных строп

Материал	$D_0, ГПа^{-1}$	$D_\infty, ГПа^{-1}$	A_σ	$\bar{\tau}_\sigma \cdot 10^3, c$
Капрон	0,12	0,26	5,4	0,9
Дайнема	0,09	0,21	4,6	1,7
Микролайн	0,11	0,24	3,2	1,4
Кевлар	0,13	0,31	3,8	1,5

Таблица 6 - Расчетные параметры характеристики ползучести текстильных полимерных парашютных строп

Название	$D_0 \cdot S^{-1}, kH^{-1}$	$D_\infty \cdot S^{-1}, kH^{-1}$	A_F	$\bar{\tau}_F \cdot 10^3, c$
ШКП-60	0,038	0,13	5,9	1,1
ШКП-150	0,036	0,12	6,4	1,2
SK 78	0,026	0,10	5,3	2,3
SK 75	0,026	0,10	5,2	2,2
SK 65	0,028	0,11	5,1	2,1
SK 60	0,029	0,11	4,9	2,0
SK 25	0,031	0,11	4,7	1,8
Спектра-550	0,056	0,16	3,1	1,3
Спектра-725	0,048	0,13	3,2	1,4
Спектра-825	0,043	0,12	3,4	1,5
Спектра-1000	0,040	0,11	3,7	1,7
Орале-600	0,034	0,09	4,2	1,6

Расчетные параметры математической модели релаксации (1), (3) полимерных нитей, применяемых для изготовления текстильных парашютных строп приведены в табл. 3, а расчетные параметры полимерных парашютных строп - в табл. 4.

Расчетные параметры математической модели ползучести (2), (3) полимерных нитей, применяемых для изготовления текстильных парашютных строп, приведены в табл. 5, а расчетные параметры полимерных парашютных строп - в табл. 6.

Предложенные во второй главе для математического моделирования релаксации и ползучести полимерных строп и образующих их нитей модифицированные модели (1), (2), (3) являются инструментом, как для прогнозирования деформационных процессов указанных материалов, так и для построения методик качественной оценки их эксплуатационных характеристик.

В третьей главе изучаются расчетные методы прогнозирования релаксационных процессов и процессов ползучести полимерных парашютных строп на основе определяющих интегральных уравнений Больцмана-Вольтера

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta, \quad (10)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma; t-\theta} d\theta, \quad (11)$$

где ядро релаксации $\varphi'_{\varepsilon t}$ и ядро ползучести $\varphi'_{\sigma t}$ выбираются на основе модифицированных во второй главе математических моделей релаксации и ползучести

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) \cdot \frac{1}{t} = A_\varepsilon \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}) \cdot \frac{1}{t}, \quad (12)$$

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_\sigma}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\sigma t})) \cdot \frac{1}{t} = A_\sigma \cdot \varphi_{\sigma t} \cdot (1 - \varphi_{\sigma t}) \cdot \frac{1}{t}, \quad (13)$$

где аргументы-функционалы $W_{\varepsilon t}$ и $W_{\sigma t}$ имеют вид

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{A_\varepsilon}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right), \quad (14)$$

$$W_{\sigma t} = \frac{A_\sigma}{2} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{A_\sigma}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right), \quad (15)$$

Еще одним преимуществом использования функции (3) для математического моделирования релаксации и ползучести состоит в том, что производные от нее рекуррентным образом выражаются через саму эту функцию, что существенно упрощает аналитические преобразования.

Расчетное прогнозирование релаксационных и деформационных процессов изучаемых материалов позволяет в динамике оценить функциональные и эксплуатационные свойства полимерных парашютных строп.

В четвертой главе изучаются вопросы разработки компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ на основе разработанных математических моделей релаксации и ползучести полимерных парашютных строп, а также методик прогнозирования релаксационных и деформационных процессов указанных материалов.

Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методик позволяет осуществить на практике информационный мониторинг функциональных и эксплуатационных характеристик полимерных парашютных строп. Все это способствует разработке новых и совершенствованию имеющихся парашютных систем, повышению их надежности и качества.

Для проведения качественного анализа и компьютерного прогнозирования

деформационных свойств парашютных строп на основании математических моделей релаксации и ползучести, предложенных во второй главе и методик прогнозирования деформационных процессов, разработанных в третьей главе, было созданы программы для ЭВМ [29-51]. Пример компьютерного алгоритма по прогнозированию деформационных процессов полимерных указанных материалов приведен на рис. 1. В данном алгоритме описаны все стадии компьютерного прогнозирования деформационного процесса - от ввода экспериментальных данных по процессам релаксации и ползучести полимерных строп до получения расчетного прогноза.

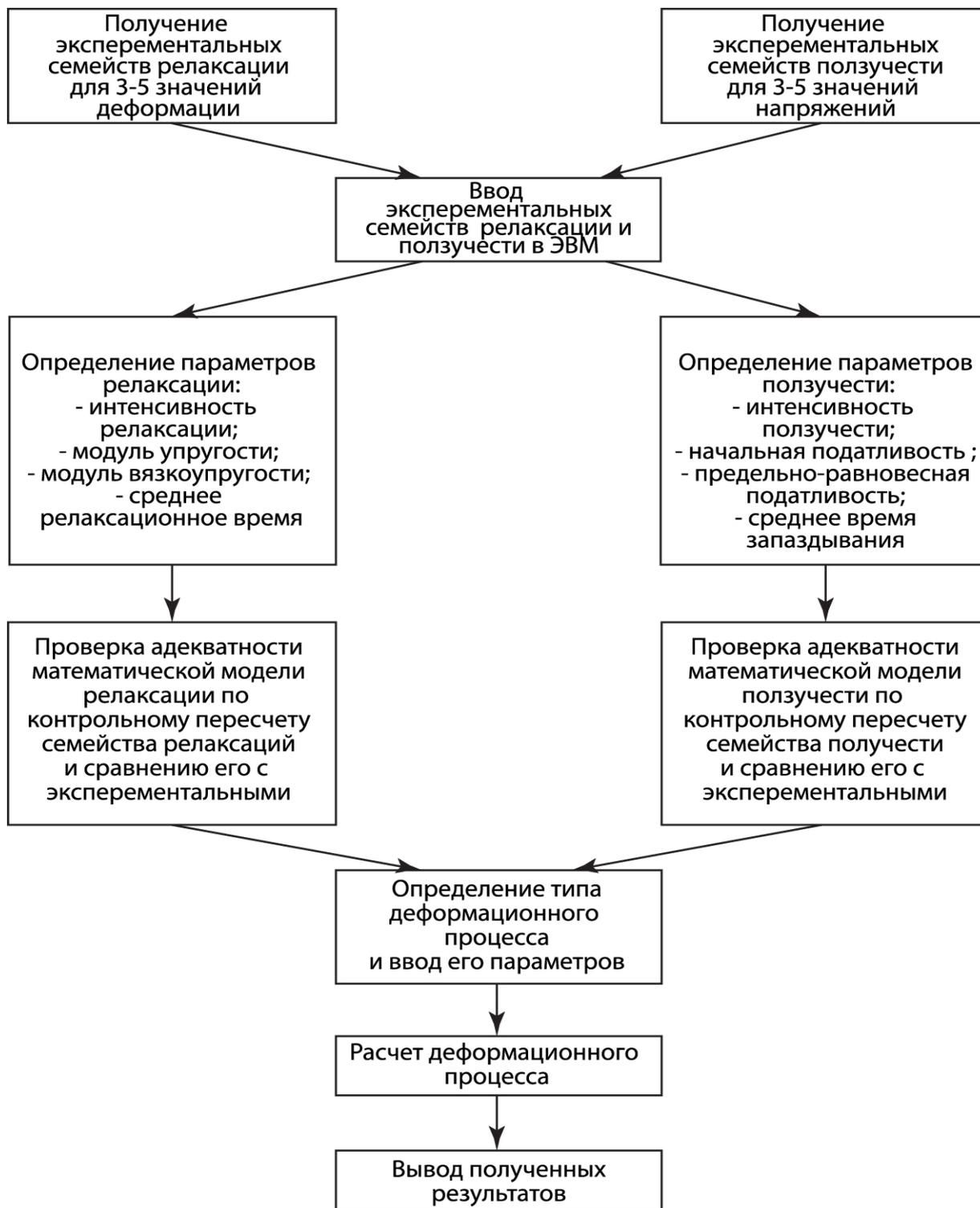


Рисунок 1 - Пример компьютерного алгоритма прогнозирования деформационных процессов полимерных парашютных строп

Пятая глава посвящена практическому применению математических моделей релаксации и ползучести полимерных парашютных строп, разработанных во второй главе, а также методик прогнозирования релаксационных и деформационных свойств указанных материалов, приведенных в третьей главе. Для качественной оценки деформационных и эксплуатационных свойств изучаемых полимерных парашютных строп широко применяются соответствующие компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ, разработанные в четвертой главе.

На основе анализа релаксационных и деформационных параметров-характеристик полимерных парашютных строп (табл. 4, табл. 6) было выявлено влияние компонентного состава и линейной плотности, образующих их нитей на релаксационные и деформационные свойства парашютов, что является важным фактором для прогнозирования их эксплуатационных свойств.

В частности, выявлено, что наиболее интенсивно релаксационные и деформационные процессы протекают в парашютных стропах, изготовленных из материала капрон. Это стропы ШКП-60 и ШКП-150, при этом, в последних из них релаксационные и деформационные процессы протекают более интенсивно. С практической точки зрения это значит, что стропы ШКП-150 наилучшим образом "пружинят" при эксплуатации, что обеспечивает достаточный комфорт парашютистам, так как смягчают силовой удар при раскрытии парашюта, однако, они и быстро изнашиваются.

В текстильных стропах серии SK из полимерной нити дайнема релаксационные и деформационные процессы проходят менее интенсивно, зато они выдерживают повышенные нагрузки по сравнению с другими рассматриваемыми стропами. Это означает, что парашютные стропы серии SK целесообразно использовать в парашютах для тяжелой техники. В таких парашютах первостепенное значение при эксплуатации имеет наличие повышенных силовых нагрузок, а не комфортность полета и приземления.

На парашютные стропы серии "Спектра", изготовленные из полимерной нити микролайн, к сожалению, вредное воздействие оказывает повышенная температура, а на парашютные стропы серии ШКП - влажность. Поэтому, парашюты, имеющие стропы из микролайна нецелесообразно применять в условиях с жарким климатом, например, в пустынях. А парашюты, имеющие капроновые стропы, нецелесообразно применять в климатических условиях, отличающихся повышенной влажностью. Влияние повышенной температуры и влажности на указанные материалы существенно уменьшает срок их надежной службы.

Исследуя релаксационные и деформационные свойства полимерных парашютных строп, изготовленных из одинаковых полимерных нитей, но имеющих разные геометрические размеры, можно увидеть, что толщина полимерных строп существенно сказывается на маневренности соответствующих парашютов. А именно, у парашютов с более тонкими стропами релаксационные и деформационные процессы проходят более интенсивно, чем у парашютов с более толстыми стропами. Это означает, что парашюты, от которых требуется большая маневренность лучше оснащать более тонкими стропами, хотя это и повышает их износ.

ВЫВОДЫ

1. Параметры-характеристики разработанных математических моделей релаксации и ползучести полимерных парашютных строп позволяют качественно оценивать физико-механические свойства указанных материалов.

2. Разработанные методики расчетного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных парашютных строп учитывают специфику эксплуатации парашютов в виде кратковременности действия нагрузки.

3. Математические модели релаксации и ползучести полимерных парашютных строп, а также разработанные на их основе методики численного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов указанных материалов, лежат в основе качественной оценки эксплуатационно-потребительских свойств парашютов.

4. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по моделированию и прогнозированию релаксационных и деформационных свойств парашютных строп являются практическим инструментом для осуществления целенаправленного отбора наилучших образцов из указанных материалов по критериям применимости.

5. Разработанные методики качественной оценки релаксационных и деформационных свойств полимерных материалов позволяют выявить наиболее перспективные материалы для изготовления парашютных строп и провести их сравнительный анализ.

6. Разработанные математические модели релаксации и ползучести полимерных материалов, методики прогнозирования релаксационных и деформационных процессов указанных материалов, а также, созданное на их основе, программное обеспечение были опробованы на широкой группе полимерных парашютных строп и образующих их нитей.

7. Выявлено, что наиболее интенсивно релаксационные и деформационные процессы протекают в капроновых парашютных стропах ШКП-60 и ШКП-150, которые обеспечивают максимальный комфорт парашютистам, так как смягчают силовые воздействия.

8. Парашютные стропы, изготовленные из дайнемы, наилучшим образом выдерживают повышенные нагрузки, по сравнению с другими исследованными материалами, их целесообразно использовать в парашютах для тяжелой техники.

9. Толщина полимерных строп существенно сказывается на маневренности парашютов, для повышения маневренности парашютов необходимо оснащать их более тонкими стропами.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

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

1. Вагнер, В.И. Системный анализ деформационных свойств полимерных парашютных строп / В.И. Вагнер // *Материалы. Дизайн. Технология.* – 2016. – № 2 (42). – С. 81-90.

2. Вагнер, В.И. Методы качественного анализа деформационных свойств полимерных парашютных строп / В.И. Вагнер // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2016. – т. 31. – № 1 – С. 5-15.

3. Вагнер, В.И. Математическое моделирование деформационных свойств полимерных парашютных строп / В.И. Вагнер // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки.* – 2016. – № 1. – С. 21-31.

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

5. Makarov, A.G. Mathematical modeling of relaxation and creep for medical-grade polymer yarns / A.G. Makarov, N.V. Pereborova, V.I. Vagner, E.K. Vasil'eva // *Fibre Chemistry* – 2015 – v. 46 (6) – P. 368-372.
6. Макаров, А.Г. Системный анализ термовязкоупругости полимерных нитей / Макаров А.Г., Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2015. – т. 27 – № 1. – С. 96-100.
7. Макаров А.Г. Кинетика релаксации напряжения и ползучести в ориентированных волокнах полипропилена / А.Г. Макаров, Г.Я.Слуцкер, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности* – 2015. – т. 27. – № 1. – С. 101-105.
8. Макаров, А.Г. Детализация механизма релаксации напряжения в ориентированных волокнах полипропилена / А.Г. Макаров, Г.Я. Слуцкер, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2015. – т. 30. – № 4 – С. 83-92.
9. Макаров, А.Г. Компьютерное моделирование и прогнозирование деформационных свойств морских полимерных канатов / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Химические волокна.* – 2015. – № 1. – С. 52 - 57.
10. Makarov ,A.G. Spectral analysis of relaxation properties of polymer yarns with an amorphous/crystalline structure / A.G. Makarov, A.V. Demidov , N.V. Pereborova, V.I. Vagner // *Fibre Chemistry.* – 2014. – v. 45 (5). – P. 304-307.
11. Makarov ,A.G. Spectral analysis of the deformation properties of polymeric filaments with an amorphous-cristalline structure / A.G. Makarov, A.V. Demidov , N.V. Pereborova, V.I. Vagner // *Fibre Chemistry.* – 2014. – vol. 46. – № 1. – P. 59 - 62.
12. Макаров, А.Г. Вариант моделирования деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* – 2014. – № 3 (351). – С. 110 - 115.
13. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Вагнер В.И. Моделирование и прогнозирование вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного строения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* – 2014. – № 6 (354). – С. 120 - 124.
14. Переборова, Н.В. Моделирование сложных деформационно-восстановительных процессов полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2014. – т. 23. – № 1. – С. 30 - 32.
15. Макаров, А.Г. Основы спектрально-временного анализа релаксационных и деформационных свойств полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2014. – т. 23. – № 1. – С. 19 - 23.
16. Макаров, А.Г. Компьютерное моделирование деформационных процессов текстильных материалов сложного строения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2014. – № 2. – т. 24. – С. 47 - 52.
17. Переборова, Н.В. Процессы обратной релаксации полимерных текстильных материалов / Н.В. Переборова, В.И. Вагнер, Е.К. Васильева [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности.* – 2014. – № 2. – т. 24. – С.

18. Егорова, М.А. Моделирование деформационно-эластических свойств полиэфирных нитей различной степени крутки / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2014. – т. 26. – № 4. – С. 97-103.

19. Макаров, А.Г. Спектральный анализ деформационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения / А.Г. Макаров, А.В. Демидов, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер // Химические волокна. – 2014. – № 1. – С. 60 - 63.

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

21. Макаров, А.Г. Спектральный анализ релаксационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения / А.Г. Макаров, А.В. Демидов, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер // Химические волокна. – 2013. – № 5. – С. 44 - 47.

22. Макаров, А.Г. Основы доверительного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2013. – т. 22. – № 4. – С. 32-34.

23. Макаров, А.Г. Основы математического моделирования релаксации и ползучести полимерных материалов / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2013. – т. 21. – № 3. – С. 27-31.

24. Макаров, А.Г. Вариант спектра наследственно-вязкоупругой релаксации трикотажных эластомеров и образующих их полимерных нитей / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.] // Дизайн. Материалы. Технология. – 2013. – № 2 (27). – С. 79 - 83.

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

Прочие публикации

26. Вагнер, В.И. Моделирование и прогнозирование релаксации и ползучести полимерных медицинских нитей / В.И. Вагнер // Девятнадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов. СПб. – 2014. – С. 194.

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

28. Вагнер, В.И. Исследование и компьютерное моделирование процессов ползучести полимерных текстильных материалов / В.И. Вагнер // Двадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Сборник тезисов. СПб. – 2015. – С. 190.

Свидетельства о государственной регистрации Программ для ЭВМ

29. Свидетельство № 2015614649. Расчетное прогнозирование вязкоупругой деформации одноосно ориентированных полимеров. А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.
30. Свидетельство № 2015614650. Расчетное прогнозирование упругой деформации одноосно ориентированных полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.
31. Свидетельство № 2015614660. Расчетное прогнозирование пластической деформации одноосно ориентированных полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 22.04.2015.
32. Свидетельство № 2014615586. Численный расчет восстановительных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 29.05.2014.
33. Свидетельство № 2014615842. Численный расчет деформационных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 04.06.2014.
34. Свидетельство № 2014615845. Расчет характеристик ползучести текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 04.06.2014.
35. Свидетельство № 2014615846. Расчет характеристик релаксации текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 04.06.2014.
36. Свидетельство № 2014616311. Численный расчет релаксационных процессов текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 19.06.2014.
37. Свидетельство № 2014616902. Системный анализ деформационных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
38. Свидетельство № 2014616903. Численный расчет упругой компоненты деформации текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
39. Свидетельство № 2014616904. Системный анализ релаксационных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
40. Свидетельство № 2014616911. Системный анализ упругих свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 08.07.2014.
41. Свидетельство № 2014617034. Системный анализ восстановительных свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 09.07.2014.
42. Свидетельство № 2014617082. Системный анализ пластических свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 10.07.2014.
43. Свидетельство № 2014617092. Системный анализ вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного макростроения / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 10.07.2014.
44. Свидетельство № 2013616661. Расчет релаксации полимерных материалов / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр.

15.07.2013.

45. Свидетельство № 2013616662. Расчет ползучести полимерных материалов / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. [и др.]. – зарегистр. 15.07.2013.

46. Свидетельство № 2013616663. Оптимальный расчет характеристик релаксации полимерных материалов / А.В. Демидов, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 15.07.2013.

47. Свидетельство № 2013616664. Системный анализ релаксации и ползучести текстильных материалов / Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 15.07.2013.

48. Свидетельство № 2013619836. Прогнозирование релаксации полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 17.10.2013.

49. Свидетельство № 2013619837. Прогнозирование восстановления полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 17.10.2013.

50. Свидетельство № 2013619838. Прогнозирование ползучести полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 17.10.2013.

51. Свидетельство № 2013619839. Прогнозирование упругости полимеров / А.Г. Макаров, Н.В. Переборова, М.А. Егорова, В.И. Вагнер [и др.]. – зарегистр. 17.10.2013.