

На правах рукописи

Егорова Марина Авинировна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И
ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ
ТЕКСТИЛЬНЫХ КАНАТОВ НА СТАДИИ ОРГАНИЗАЦИИ ИХ
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ**

Специальность:
05.02.22 - организация производства
(текстильная и легкая промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2018

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

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

Официальные оппоненты: **Максимов Василий Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, Акционерное общество "Концерн "ОКЕАНПРИБОР", главный ученый секретарь

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 25 декабря 2018 г. в 10 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.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 "___" _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07
кандидат технических наук

Переборова Нина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы обоснована, прежде всего, решением первостепенной задачи, стоящей перед текстильной и легкой промышленностью, и состоящей в повышении конкурентоспособности производимой отраслевыми предприятиями продукции. Актуальность решения поставленной задачи значительно усиливается в связи с действиями продолжающихся международных санкций. Повышение конкурентоспособности продукции предприятий текстильной и легкой промышленности позволит ускорить решение проблемы по импортозамещению указанной продукции и по внедрению передовых инновационных технологий в производство на всех его стадиях, включая стадию проектирования продукции и организации ее производства.

Решая задачу по повышению конкурентоспособности продукции предприятий текстильной и легкой промышленности, следует учитывать ее функциональное назначение и ее эксплуатационные свойства. Необходимо основной упор в организации производств текстильной и легкой промышленности сделать именно на разработку и создание продукции, обладающей требуемыми эксплуатационными свойствами.

Автором диссертации найден путь решения сформулированной выше задачи на примере организации производства полимерных текстильных канатов, для чего предлагается разработка методов моделирования, прогнозирования и оценки эксплуатационных свойств указанных изделий. Разрабатываемые в диссертации методы моделирования, прогнозирования и оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов осуществляются на основе теории вязкоупругости полимерных материалов, к классу которых относятся изучаемые изделия. Предлагаемые исследования проводятся на основе математического моделирования эксплуатационных процессов, к основополагающим типам которых следует отнести деформационные процессы релаксации и процессы ползучести.

Немаловажным фактором в решении поставленной в диссертации задачи является разработка численных методов определения эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов и, разработанные на их основе, компьютерные методики и программное обеспечение.

Следует заметить, что на изучаемые эксплуатационные свойства полимерных текстильных канатов оказывают влияние различные внешние факторы, такие, как: температура, влажность, соленость воды и т.д.. Полимерные текстильные канаты имеют существенные отличия от стальных канатов, заключающиеся, прежде всего, в устойчивости к действиям агрессивных сред, например, к вредоносному воздействию морской воды. Кроме этого, некоторые канаты, изготовленные из полимерных нитей с малой линейной плотностью, не тонут в воде, что также бывает зачастую важно.

Качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов проводится на основе системного анализа одноименных процессов, согласно методикам которого предполагается как математическое моделирование, так и компьютерное прогнозирование этих свойств.

Работа выполнялась четыре года в рамках аспирантских исследований и выигранного гранта Российского фонда фундаментальных исследований для молодых ученых "Мой первый грант", Проект № 16-38-00122 (2016 - 2017 гг.) по теме: "Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов", где автор диссертации являлась руководителем.

Автор диссертации - неоднократный лауреат конкурса грантов для аспирантов, проводимых Комитетом по науке и высшей школы Правительства Санкт-Петербурга. В частности, автором работы в 2016 году был выигран грант на тему: "Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационно-восстановительных свойств морских полимерных канатов".

Во время обучения в аспирантуре в 2016 г., автор диссертации был награжден Дипломом Приоритетного национального проекта "Образование", проводимого Министерством образования и науки РФ для поддержки талантливой молодежи в соответствии с Указом Президента РФ от 06.04.2006 г. № 325.

Цель работы состоит в разработке методов моделирования, прогнозирования и оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов на стадии организации их производства для повышения конкурентоспособности.

Основными **задачами** исследования являются:

- разработка математических моделей релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработка численных методов прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработка методов оценки влияния компонент деформации и компонент механической работы деформирования на эксплуатационные свойства полимерных текстильных канатов;
- разработка компьютерных методик и алгоритмов системного анализа релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов для проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств указанных материалов;
- разработка программного обеспечения, позволяющего производить качественную оценку функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств полимерных текстильных канатов;
- проведение сравнительного качественного анализа функционального и эксплуатационно-потребительского назначения полимерных текстильных канатов на стадии проектирования и организации их производства для повышения конкурентоспособности.

Методы исследования. В основе методологии и теории работы лежат положения, используемые при организации производств текстильных материалов, а также при осуществлении системного анализа, математического моделирования свойств и управления качеством текстильной продукции. В диссертации широко используются численные методы, методы оптимизации и информатики, информационные технологии.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертационная работа выполнена в рамках Паспорта научной специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям) ВАК Минобрнауки РФ и соответствует следующим его 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 работы состоит в:

- разработке математической модели релаксационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработке математической модели деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработке численных методов прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработке численных методов прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- разработке методов оценки влияния компонент полной деформации на функциональные и эксплуатационно-потребительские свойства полимерных текстильных канатов;
- разработке методов оценки влияния компонент полной механической работы деформирования на функциональные и эксплуатационно-потребительские свойства полимерных текстильных канатов;
- разработке компьютерных методик и алгоритмов системного анализа релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов для проведения качественной оценки функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств указанных материалов;
- разработке программного обеспечения, позволяющего производить качественную оценку функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств полимерных текстильных канатов;
- проведении сравнительного анализа функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств полимерных текстильных канатов на стадии организации их производства для получения рекомендаций по повышению конкурентоспособности указанных материалов.

Практическая значимость работы состоит в разработке методик и соответствующего программного обеспечения, позволяющего проводить:

- прогнозирование релаксационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- прогнозирование деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов;
- оценку влияния компонент полной деформации на функциональные и эксплуатационно-потребительские свойства полимерных текстильных канатов;
- оценку влияния компонент полной механической работы деформирования на функциональные и эксплуатационно-потребительские свойства полимерных текстильных канатов;
- системный анализ релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов для качественной оценки функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств указанных материалов;
- сравнительный анализ функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств полимерных текстильных канатов на стадии организации их производства для получения рекомендаций по повышению конкурентоспособности указанных материалов.

Материалы диссертации рекомендованы к применению в учебных и научных целях в СПбГУПТД.

Апробация результатов работы была осуществлена на научных конференциях и семинарах различных уровней: 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); Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, 2014-2016); Всероссийская научная конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки" (Санкт-Петербург, 2014-2018).

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 25 печатных работах, среди них 8 статей в изданиях из "Перечня ВАК...", а также 8 свидетельств на программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список использованной литературы и два приложения. Основное содержание работы изложено на 143 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено обоснование актуальности работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость.

Решение поставленной в диссертации проблемы имеет особую актуальность в период продолжающихся международных санкций. Повышая конкурентоспособность изделий текстильной и легкой промышленности на стадии организации их производства мы, тем самым, решаем как задачу по импортозамещению указанных изделий, так и задачу по внедрению передовых инновационных технологий в производство.

Для решения задачи по повышению конкурентоспособности продукции предприятий текстильной и легкой промышленности следует учитывать, прежде всего, функциональное назначение и эксплуатационные свойства этой продукции. Необходимо также основной упор сделать на разработку и создание продукции, обладающей требуемыми эксплуатационными свойствами. Провести полноценное исследование полимерных текстильных материалов на соответствие их требуемым эксплуатационным и функциональным свойствам можно на основе разработки методов моделирования и прогнозирования указанных свойств.

Разрабатываемые в диссертации методы моделирования, прогнозирования и оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных канатов основаны на теории вязкоупругости полимерных материалов, к классу которых относятся изучаемые изделия. Основной упор исследования сделан на исследование основополагающим типов эксплуатационных процессов полимерных материалов - деформационных и релаксационных процессов.

В работе предлагается также разработка численных методов определения эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов и соответствующее программное обеспечение для их реализации.

В **первой главе** приводится литературный обзор по теме диссертационного исследования. Описываются современные и классические представления о методах математического моделирования функциональных и эксплуатационных свойств полимерных материалов, приводятся известные варианты прогнозирования физико-механических процессов указанных материалов и качественной оценки их свойств.

В главе описываются также используемые типы определяющих интегральных уравнений для прогнозирования деформационных и релаксационных процессов изучаемых материалов.

Описываются традиционные подходы к моделированию и расчету деформационных и релаксационных процессов ориентированных полимеров (Ржаницин А.Р., Работнов Ю.Н., Колтунов М.А. и др.). Описываются известные математические модели и уравнения для прогнозирования физико-механических свойств указанных изделий (Николаев С.Д., Кукин Г.Н., Щербаков В.П., Соловьев А.Н., Макаров А.Г., Сталевич А.М.). Приводятся варианты применения методов математического моделирования и прогнозирования свойств полимеров (Вейерштрасс К., Больцман С., Вольтерра В., Максвелл Дж., Лаплас П.).

Во **второй** главе приведены образцы наиболее часто встречающихся исследуемых объектов - полимерных текстильных канатов и их технические характеристики (табл.1). Указанные объекты отличаются друг от друга компонентным составом (капроновые, полипропиленовые, полистиловые), геометрическими характеристиками и также типом переплетения нитей.

В главе описываются также разработанные математические модели релаксационно-эксплуатационных процессов и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов.

В основе математического моделирования релаксационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов лежит аппроксимация обобщенной кривой модуля релаксации $E_{\varepsilon t}$ нормированной функцией $\varphi_{\varepsilon t}$ на основе гиперболического тангенса

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{\varepsilon t}, \quad (1)$$

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right), \quad (2)$$

здесь: E_0 - модуль упругости; E_∞ - асимптотический модуль вязкоупругости; A_ε - структурно-релаксационный параметр интенсивности; τ_ε - релаксационное время, определяющее половину релаксационного процесса при деформации ε).

Аналогично, в основе математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов лежит аппроксимация обобщенной кривой податливости $D_{\sigma t}$ нормированной функцией $\varphi_{\sigma t}$ на основе гиперболического тангенса

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \varphi_{\sigma t}, \quad (3)$$

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_\sigma}{2} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \right), \quad (4)$$

здесь: D_0 - начальная упругая податливость; D_∞ - асимптотическая равновесная податливость; A_σ - структурно-деформационный параметр интенсивности; τ_σ - деформационное время, определяющее половину деформационного процесса при напряжении σ).

Выбор в качестве основы для математического моделирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов нормированной функции гиперболический тангенс не случаен, т.к. эта функция, во-первых, является элементарной, что упрощает аналитические преобразования с ней, а во-вторых, ее график достаточно близок к графику интегральной плотности нормального распределения.

Таблица 1 - Характеристики изучаемых полимерных текстильных канатов

Материал	Тип плетения	Диаметр, мм	Линейная плотность, Мтекс	Разрывная нагрузка, кН
1	2	3	4	5
капрон	трехрядный	8	0,045	9,9
		16	0,17	35,3
		24	0,41	77,0
		32	0,68	137
		40	1,07	204
		48	1,53	290
		56	2,08	395
		64	2,62	498
		72	3,33	630
капрон	восьмирядный	48	1,84	405
		56	2,49	567
		64	3,14	746
		72	3,98	933
		80	4,91	1155
полипропилен–50%, капрон – 50%	четырёхрядный	48	2,73	378
		64	3,28	674
		80	4,50	1020
полипропилен	трехрядный	8	0,039	8,7
		16	0,096	25,2
		24	0,23	58
		32	0,37	81
		40	0,59	113
		48	0,84	149
		56	1,17	181
		64	1,44	235
		72	1,89	307
полипропилен	восьмирядный	24	0,27	73
		32	0,45	97
		40	0,71	157
		48	1,01	225
		56	1,40	301
		64	1,73	385
		72	2,28	486
		80	2,71	604
полистил (полипропилен– 75%, полиэтилен – 25%)	трехрядный	24	0,27	73
		32	0,43	97
		40	0,68	157
		48	0,99	225
		56	1,37	301
		64	1,69	385
		72	2,23	486
		80	2,67	604
полистил (полипропилен – 75%, полиэтилен – 25%)	восьмирядный	32	0,52	175
		40	0,82	284
		48	1,19	339
		56	1,64	464
		64	2,03	605
		72	2,68	828
		80	3,21	989

Во второй главе диссертации особое внимание уделено проверке адекватности разработанных математических моделей релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов путем контрольной проверки расчетных значений модуля релаксации и податливости с данными краткосрочного эксперимента. Проведенные исследования показали, что относительные отклонения расчетных значений модуля релаксации и податливости от экспериментальных значений не превысили величины 8 %, что является хорошим показателем для технических расчетов при решении задач такого уровня.

Еще одним достоинством разработанных математических моделей релаксационно-эксплуатационных (1), (2) и деформационно-эксплуатационных (3), (4) процессов является содержание наименьшего числа параметров с физическим смыслом:

- E_0, E_∞ - асимптотические модули релаксации:

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

- D_0, D_∞ - асимптотические податливости:

$$D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_{\sigma t}, \quad D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\sigma t}; \quad (6)$$

- структурно-релаксационный параметр A_ε задает интенсивность релаксации (половина релаксационного процесса проходит за время $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_\varepsilon) = -A_\varepsilon$, $\ln(t''/\tau_\varepsilon) = A_\varepsilon$);

- структурно-деформационный параметр A_σ задает интенсивность деформирования (половина деформационного процесса проходит за время $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_\sigma) = -A_\sigma$, $\ln(t''/\tau_\sigma) = A_\sigma$);

- деформационная функция временных сдвигов $f_{\sigma_1\sigma} = \ln(t_1/\tau_\sigma)$ (характеризующая сдвиги деформационных кривых до слияния с обобщенной деформационной кривой), содержащаяся в деформационном аргументе-функционале

$$W_{\sigma t} = \frac{A_\sigma}{2} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{A_\sigma}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right). \quad (7)$$

- релаксационная функция временных сдвигов $f_{\varepsilon_1\varepsilon} = \ln(t_1/\tau_\varepsilon)$ (характеризующая сдвиги релаксационных кривых до слияния с обобщенной релаксационной кривой), содержащаяся в релаксационном аргументе-функционале

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{A_\varepsilon}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right); \quad (8)$$

Таким образом, во второй главе диссертации показано, что применение нормированной функции гиперболический тангенс в качестве основы для математической модели релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов, позволяет с достаточной точности моделировать эксплуатационные свойства указанных материалов. Аналитический вид функции гиперболический тангенс и принадлежность к классу элементарных функций существенно упрощает аналитические преобразования и облегчает нахождение релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик.

Третья глава посвящена решению задачи по прогнозированию релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов любой степени сложности, когда (в отличие от главы 2) в релаксационно-эксплуатационных процессах деформация ε может являться переменной величиной, а в деформационно-эксплуатационных процессах переменной величиной может являться напряжение σ .

Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных процессов различной степени сложности полимерных текстильных канатов осуществляется посредством определяющих уравнений Больцмана-Вольтерра

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta, \quad (9)$$

где в качестве интегрального ядра выбирается производная нормированной релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ (2)

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) \cdot \frac{1}{t} = A_\varepsilon \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}) \cdot \frac{1}{t}. \quad (10)$$

Аналогично, прогнозирование деформационно-эксплуатационных процессов различной степени сложности полимерных текстильных канатов осуществляется посредством определяющих уравнений Больцмана-Вольтерра

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

где в качестве интегрального ядра выбирается производная нормированной деформационной функции $\varphi_{\sigma t}$ (4)

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

В главе 3 подробно описаны методики численного прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов любой степени сложности. Кроме того, разработаны методики повышения точности такого прогноза, основанные на оптимизации методов вычисления расчета определяющих интегралов (9), (11), использующих неравномерное разбиение шкалы интегрирования, зависящее от специфичности рассматриваемых процессов.

Полученные в главе 3 методы численного расчета интегралов (9), (11) и соответствующие программы для ЭВМ опробованы на различных эксплуатационных процессах.

Отмечено, что при этом расчетные значения деформации и напряжения имеют достаточно малые отклонения от соответствующих экспериментальных значений во всех рассмотренных случаях.

В **четвертой главе** рассмотрено влияние компонент полной деформации и компонент полной механической работы деформирования на основные функциональные и эксплуатационные свойства полимерных текстильных канатов.

Полная деформация полимерных текстильных канатов может быть разложена на компоненты различными способами. Наиболее удачным способом такого разложения можно считать вариант, когда полная деформация ε раскладывается на следующие три основные компоненты:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_v + \varepsilon_p, \quad (13)$$

здесь: ε_y - компонента упругой деформации, ε_v - компонента вязкоупругой деформации и ε_p - компонента пластической деформации.

Указанное разделение полной деформации полимерных текстильных канатов на компоненты имеет определенное значение, так как оно позволяет определить некоторые функциональные и эксплуатационные свойства указанных материалов, в частности их упругие, вязкоупругие и пластические свойства. Если образец полимерного текстильного каната изготавливается из полимеров с преобладанием упругой деформации, то, соответственно, у него появляется способность к быстрому восстановлению имеющейся формы после снятия нагрузки. Полимерные текстильные канаты с преобладанием упругой компоненты деформации целесообразно использовать, например, при установке буев и приборов на определенные глубины.

Если же требуется спроектировать полимерный текстильный канат с преобладанием вязкоупруго-пластических свойств, то для его изготовления лучше использовать нити, имеющие наибольшие компоненты вязкоупругой и пластической деформации. Такие канаты будут обладать лучшей способностью к погашению вредных механических воздействий и обладать большей долговечностью, чем другие канаты.

В главе 4 аналогичным образом описано разделение полимерных текстильных канатов по группам, соответствующим разделению полной работы механического деформирования на поглощаемую и упругую компоненты. Часть механической энергии, соответствующая упругой компоненте, является обратимой. Вторая же часть указанной энергии, соответствующая поглощаемой компоненте, является необратимой.

Разработанные методики выделения упругой составляющей из полной механической работы деформирования основаны на вычислении начального модуля упругости, по значению которого, интегрированием можно рассчитать упругую компоненту полной механической работы деформирования.

При этом, упругая компонента a_{t0}/a_t полной механической работы деформирования

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon \quad (14)$$

может быть определена по формуле

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{\sigma_t^2}{2E_0 \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon}, \quad (15)$$

или

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{E_0^2 \varepsilon_t^2 + \left(\int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds \right)^2 + 2\varepsilon_t E_0 \int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds}{E_0^2 \varepsilon_t^2 + 2\varepsilon_t E_0 \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds dt}, \quad (16)$$

а поглощаемая компонента a_{tt}/a_t полной механической работы деформирования находится как разность

$$\frac{a_{tt}}{a_t} = 1 - \frac{a_{t0}}{a_t}. \quad (17)$$

Таким образом, предложенные в четвертой главе методики разложения деформации и полной работы механического деформирования на соответствующие компоненты дают возможность осознать природу деформирования и релаксации, дать оценку функциональных и эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов в части упругости, вязкоупругости и пластичности.

В пятой главе рассмотрено применение методов моделирования, прогнозирования и оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов на стадии организации их производства для повышения конкурентоспособности.

Оценка эксплуатационных свойств полимерных текстильных канатов осуществляется на основе разработанных методик системного и сравнительного анализа.

Указанные методики получили практическую реализацию в виде программного продукта (рис.1) и рекомендуются к использованию на стадиях проектирования новых полимерных текстильных канатов и на стадии организации их производства с целью производства новых изделий, обладающих определенными функциональными и эксплуатационными характеристиками, а также повышенной конкурентоспособностью.

Проведенный системный анализ функциональных свойств полимерных текстильных канатов (табл. 1) помог определить влияние компонентного состава, геометрии канатов, плотности и типа переплетения нитей на изучаемые свойства.

Например, при сравнении образцов полимерных текстильных канатов одного типа переплетения и одного диаметра, но различного компонентного состава, выявлено различие в структурных коэффициентах A_ε и A_σ . Здесь рост плотности ведет к снижению интенсивностей эксплуатационных процессов.

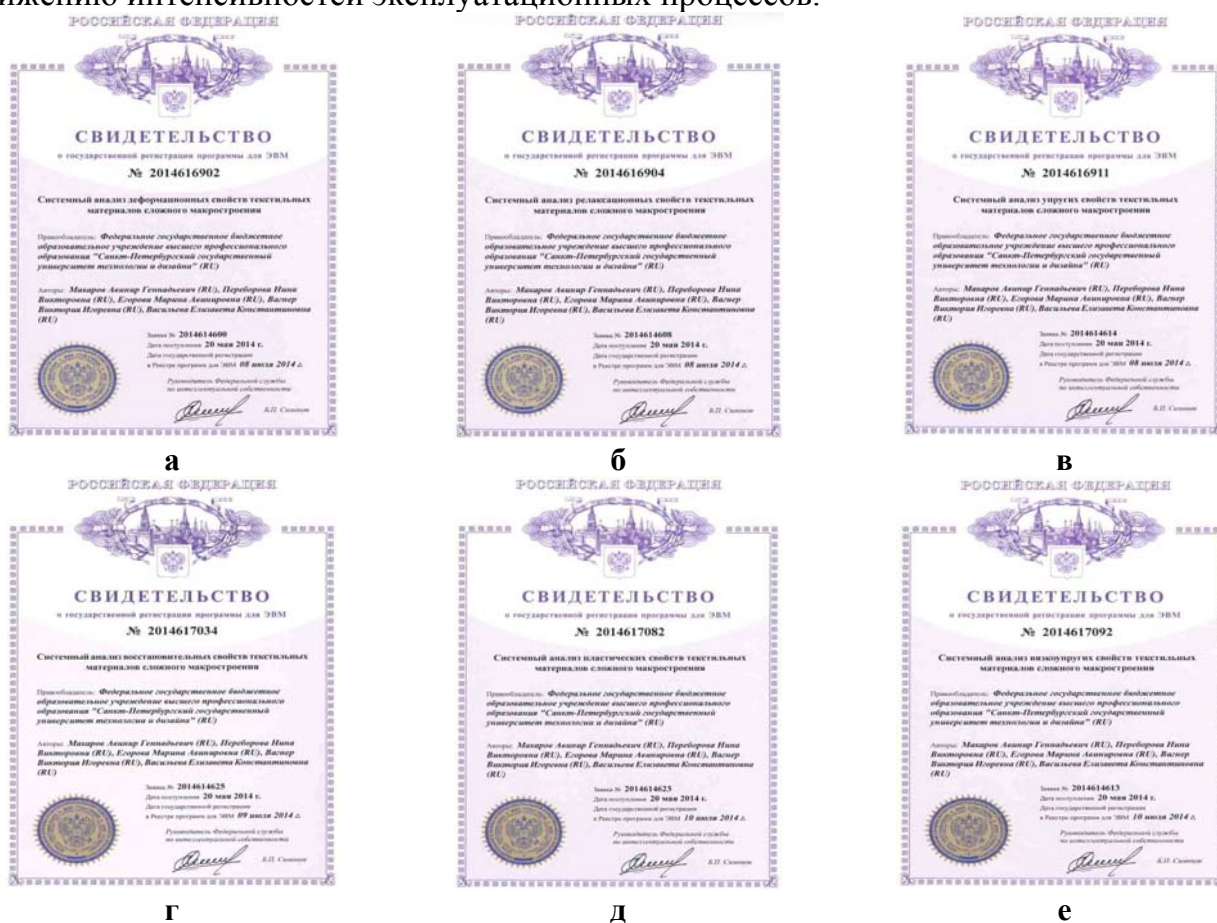


Рисунок 1 - Программы для ЭВМ по проведению системного анализа деформационных (а), релаксационных (б), упругих (в), восстановительных (г), пластических (д), вязкоупругоупругих (е) свойств полимерных текстильных канатов

Таблица 2 - Расчетные характеристики эксплуатационных процессов полимерных канатов

Материал	Тип плетения	Линейная плотность, Мтекс	Диаметр, мм	Модуль упругости, ГПа	Модуль вязкоупругости, ГПа	Интенсивность релаксации	Начальная подагливость, ГПа ⁻¹	Предельно- равновесная подагливость, ГПа ⁻¹	Интенсивность получести
капрон	трехрядный	0,045	8	6,4	0,62	5,74	0,16	1,6	3,78
		0,17	16	6,1	0,76	5,17	0,16	1,3	3,41
		0,68	32	5,9	0,83	4,53	0,17	1,2	3,17
		1,53	48	5,7	0,91	4,21	0,17	1,1	2,79
		2,62	64	5,6	0,98	3,98	0,18	1,0	2,62
	восьмирядный	0,31	16	5,1	0,48	3,84	0,20	2,1	2,53
		0,94	32	4,7	0,56	3,38	0,21	1,8	2,29
		1,84	48	4,4	0,61	2,81	0,23	1,6	1,82
		3,14	64	4,1	0,66	2,34	0,24	1,5	1,55
		4,91	80	3,9	0,70	1,98	0,26	1,4	1,31
полипропилен-50%, капрон – 50%	четырёхрядный	0,17	8	9,3	1,2	6,94	0,11	0,83	4,58
		0,48	16	8,8	1,4	6,68	0,11	0,71	4,39
		1,47	32	8,4	1,6	6,27	0,12	0,63	4,12
		2,73	48	8,1	1,8	5,89	0,12	0,56	3,92
		3,28	64	7,8	1,9	5,51	0,13	0,53	3,78
полипропилен	трехрядный	0,039	8	11,4	0,38	10,3	0,09	2,6	6,92
		0,11	16	10,7	0,39	9,89	0,09	2,5	6,67
		0,37	32	10,2	0,41	9,52	0,10	2,4	6,48
		0,84	48	9,8	0,48	9,31	0,10	2,1	6,13
		1,44	64	9,4	0,56	9,07	0,11	1,8	6,02
	восьмирядный	0,27	16	8,9	0,48	6,92	0,11	2,1	4,61
		0,45	32	8,4	0,54	6,42	0,12	1,9	4,37
		1,01	48	7,9	0,61	5,98	0,13	1,6	3,97
		1,73	64	7,5	0,68	5,51	0,13	1,5	3,67
		2,71	80	7,1	0,74	5,12	0,14	1,4	3,43
полистил (полипропилен-75%, полиэтилен – 25%)	трехрядный	0,082	8	10,9	0,37	9,43	0,092	2,7	6,34
		0,25	16	10,3	0,43	8,97	0,097	2,3	6,04
		0,43	32	9,7	0,48	8,28	0,10	2,1	5,92
		0,99	48	9,1	0,54	7,96	0,11	1,9	5,51
		1,69	64	8,4	0,61	7,53	0,12	1,6	5,14
	восьмирядный	0,31	16	4,4	0,51	3,13	0,23	2,0	2,15
		0,52	32	4,1	0,56	2,76	0,24	1,8	1,86
		1,19	48	3,8	0,62	2,52	0,26	1,6	1,64
		2,03	64	3,5	0,69	2,31	0,29	1,4	1,48
		3,21	80	3,3	0,76	2,14	0,30	1,3	1,40

Сравнивая образцы полимерных канатов, одного диаметра и способа переплетения нитей, но разного компонентного состава, замечено, что у капроновых канатов происходит замедление релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов по сравнению с полипропиленовыми и полистиловыми.

Замечено, что с уменьшением диаметров канатов, при прочих равных условиях, наблюдается уменьшение параметров A_ε и A_σ , а это означает увеличение интенсивности релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов.

Таким образом, методы моделирования, прогнозирования и оценки релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов являются инструментом повышения конкурентоспособности указанных материалов и рекомендуются к применению на стадии проектирования и организации производства этих материалов.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные математические модели деформационно-эксплуатационных и релаксационно-эксплуатационных процессов различной степени сложности полимерных текстильных канатов позволяют достаточно точно моделировать эти процессы.

2. Разработанные численные методы прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов являются основой для проведения системного анализа эксплуатационных свойств указанных материалов.

3. Разработанные методы оценки влияния компонент полной деформации и полной механической работы деформирования на функциональные и эксплуатационно-потребительские свойства полимерных текстильных канатов позволяют производить качественные оценки указанных свойств этих материалов.

4. Разработанные компьютерные методики и алгоритмы системного анализа релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных канатов служат основой для качественного анализа функционального и эксплуатационно-потребительского назначения этих материалов.

5. Разработанные в диссертации программы для ЭВМ позволяют осуществлять качественную оценку функциональной и эксплуатационной применимости изучаемых полимерных текстильных канатов, сформулировать рекомендации к проектированию и организации производства указанных изделий для повышения их конкурентоспособности.

6. Изложенные в работе новые методы математического моделирования, расчетного прогнозирования, оценки эксплуатационно-потребительских свойств полимерных текстильных канатов и программы для ЭВМ апробировались на большой репрезентативной группе канатов, откуда вытекает их универсальность и возможность рекомендаций по соответствующим внедрениям.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК..."

1. Егорова, М.А. Разработка методов математического моделирования процессов релаксации и ползучести полимерных нитей на основе их спектральной интерпретации / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Химические волокна. - 2017. - № 1. - С. 69-73. (Web of Science, Scopus).

2. Егорова, М.А. Разработка критериев достоверности прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных материалов / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Химические волокна. - 2017. - № 2. - С. 59-63. (Web of Science, Scopus).

3. Егорова, М.А. Варианты математического моделирования и системного анализа механической релаксации и ползучести полимерных материалов / М.А. Егорова, А.В. Демидов, Н.В. Переборова и др. // Химические волокна. - 2018. - № 4. - С. 46-51. (Web of Science, Scopus).

4. Егорова, М.А. Математическое моделирование деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов в условиях переменной температуры / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2017. - № 4 (370). - С. 287- 292. (Scopus).

5. Егорова, М.А. Методология математического моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, А.М. Шванкин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. - 2017. - № 1. - С. 20-28.

6. Егорова, М.А. Методы системного анализа вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, Ю.В. Кобякова и др. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. - 2017. - № 3. - С. 110-119.

7. Егорова, М.А. Вариант моделирования деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2014. - № 3 (351). - С. 110 - 115. (Scopus).

8. Егорова, М.А. Моделирование и прогнозирование вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного строения / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2014. - № 6 (354). - С. 120 - 124. (Scopus).

Прочие публикации

9. Егорова, М.А. Методология проведения системного анализа вязкоупругих свойств текстильных материалов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, А.Г. Макаров и др. // Дизайн. Материалы. Технология. - 2017. - № 3 (47). - С. 105-112.

10. Егорова, М.А. Методология компьютерного моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, И.М. Егоров и др. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2017. - № 1. - С. 5-15.

11. Егорова, М.А. Методология спектрального моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2015. - №4. - С. 7-16.

12. Егорова, М.А. Моделирование сложных деформационно-восстановительных процессов полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, В.И. Вагнер и др. // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2014. - № 1. - С. 30 - 32.

13. Егорова, М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов / М.А. Егорова // II международная научно-практическая конференция "Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии образование-наука-производство". - Казань. - 2016. - С. 47-59.

14. Егорова, М.А. Экспериментальные исследования и анализ процессов растяжения арамидных нитей специального назначения / М.А. Егорова, П.П. Рымкевич // Международный научно-практический семинар "Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки". - Минск. - 2015 - С. 66-68.

15. Егорова, М.А. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационно-восстановительных свойств морских полимерных канатов / М.А. Егорова // Двадцать первая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. - СПб. - 2016. - С. 191.

16. Егорова, М.А. Математическое моделирование физико-механических свойств полимерных текстильных материалов / М.А. Егорова, А.А. Козлов, П.П. Рымкевич и др. // Инновации молодежной науки. Всероссийская научная конференция молодых ученых. - СПб. - 2018. - С.19-20.

17. Егорова, М.А. Компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов / М.А. Егорова, А.А. Козлов А.А., П.П. Рымкевич и др. // Инновации молодежной науки. Всероссийская научная конференция молодых ученых. - СПб. - 2018. - С.20-21.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

18. Егорова, М.А. Проведение сравнительного анализа деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, А.А. Козлов и др. // Свидетельство № 2018612705 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 22.02.2018.

19. Егорова, М.А. Прогнозирование деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, А.А. Козлов и др. // Свидетельство № 2018612702 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 22.02.2018.

21. Егорова, М.А. Моделирование деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Свидетельство № 2017619740 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 01.09.2017.

22. Егорова, М.А. Определение деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / М.А. Егорова, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова и др. // Свидетельство № 2017660115 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 14.09.2017.

23. Егорова, М.А. Прогнозирование деформационно-пластического процесса морских полимерных канатов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, П.П. Рымкевич и др. // Свидетельство № 2017612689 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 02.03.2017.

24. Егорова, М.А. Прогнозирование вязкоупруго-релаксационного процесса морских полимерных канатов / М.А. Егорова, Н.В. Переборова, П.П. Рымкевич и др. // Свидетельство № 2017612943 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 06.03.2017.

25. Егорова, М.А. Прогнозирование вязкоупруго-пластических процессов морских полимерных канатов / М.А. Егорова, А.В. Демидов, А.Г. Макаров и др. // Свидетельство № 2016661296 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 05.10.2016.