

На правах рукописи

Егоров Иван Михайлович

**КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЯЗКОУПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТИЛЬНЫХ КАНАТОВ ПРИ ИХ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2020

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

Научный руководитель: **Макаров Авинир Геннадьевич**  
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", зав. кафедрой 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 24 ноября 2020 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, круглый зал заседаний.

Текст автореферата размещен на сайте СПбГУПТД: <http://sutd.ru/>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://sutd.ru/>

Автореферат разослан 22 октября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07  
кандидат технических наук

Переборова Нина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Предлагаемое диссертационное исследование направлено на решение научной задачи национальной экономики по разработке методов математического моделирования, компьютерного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов, необходимых для последующего проектирования новых изделий для гражданского и военного флота России с улучшенными эксплуатационными и функциональными характеристиками. Решение поставленной задачи является важным, так как современному российскому флоту требуются текстильные канаты, обладающие рядом специальных эксплуатационных и функциональных свойств.

В рамках проведенного диссертационного исследования разрабатывались методы математического моделирования, компьютерного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных текстильных канатов, на основе которых могут быть существенным образом улучшены их функционально-эксплуатационные характеристики.

На основе результатов выполненного диссертационного исследования открываются возможности по проектированию новых текстильных канатов с улучшенными функционально-эксплуатационными свойствами, что особенно важно в период действия продолжающихся международных санкций. Немаловажным фактом является также разработка новых инновационных методов исследования функционально-эксплуатационных свойств текстильных канатов, основанных на системном анализе их вязкоупруго-пластических характеристик.

Текстильные канаты имеют достаточно широкое применение. Помимо традиционного своего применения - для швартовки и буксировки морских и речных судов - они также применяются для долгосрочного выставления измерительных приборов и буев на определенные глубины, для выставления и крепления морских и речных заграждений, для предотвращения разлива нефтепродуктов и т.д.

Высокая научная значимость полученных в диссертации результатов обусловлена сложностью проведения исследований деформационных, релаксационных и восстановительных свойств текстильных канатов на эндохронном уровне ввиду большой неоднородности микроструктуры исследуемых объектов. Лишь учет конформационно-энергетических эндохронных переходов наночастиц полимерных материалов в разрабатываемых математических моделях позволило выйти на достижимость заявленных результатов.

В ходе проведенного диссертационного исследования были получены рекомендации по проектированию текстильных канатов, обладающих наилучшими, с точки зрения их функциональности и применимости, свойствами.

Уровень полученных теоретических результатов не уступает уровню, достигнутому зарубежной наукой, так как в диссертации применялись оригинальные методы моделирования и прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов, впервые разработанные и успешно апробированные в научной школе, возглавляемой проф. Макаровым А.Г.

Проводимое диссертационное исследование было выполнено в соответствии с выигранным грантом Российского Фонда Фундаментальных исследований для аспирантов № 19-38-90068 на тему: "Разработка методов математического моделирования, компьютерного прогнозирования и системного анализа вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов с целью проектирования новых изделий для ВМФ России с улучшенными эксплуатационными и функциональными характеристиками" (2019 - 2020 гг.)

Результаты диссертационного исследования направлены на создание новых текстильных канатов, превосходящих зарубежные аналоги по деформационно-эксплуатационным характеристикам, что приобретает особое значение при разработке отечественной конкурентоспособной продукции в период продолжающихся международных санкций.

**Степень разработанности темы исследования.** Методы моделирования и численного прогнозирования, а также качественной оценки вязкоупруго-пластических характеристик текстильных канатов требуется разрабатывать при организации их производства, так как это позволит улучшить функционально-эксплуатационные характеристики указанных материалов. Моделирование, прогнозирование и качественная оценка вязкоупругости - это одно из развиваемых направлений исследования, которым занимаются в научной школе, возглавляемой научным руководителем аспиранта - проф. Макаровым А.Г.

Большое многообразие полимерных текстильных материалов, в том числе, текстильных канатов, обосновывает необходимость разрабатывать, как новые математические модели их свойств, так и новые методы прогнозирования этих свойств. Математические модели достаточно хорошо моделирующие свойства некоторых полимерных материалов, могут плохо подходить для моделирования свойств других полимерных материалов, в силу возможных значительных отличий в реологической структуре указанных материалов.

**Цель работы** заключается в создании новых методов математического моделирования, численного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов, применяемых на стадии организации их производства для проектирования новых изделий с улучшенными эксплуатационными и функциональными характеристиками.

При реализации поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- разработаны новые математические модели и методы компьютерного прогнозирования повышенной точности вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов на основе учета их реологических и структурных особенностей;
- разработаны новые методы численного расчета вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов;
- разработаны методы повышения точности компьютерного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов;
- разработаны методы системного анализа вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов для проведения сравнительного анализа их функционально-эксплуатационных свойств и разработки рекомендаций по проектированию новых изделий повышенной конкурентоспособности;
- разработаны рекомендации по проектированию текстильных канатов на основе обработки результатов численного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов указанных материалов при помощи ЭВМ.

**Методы исследования.**

В основе разрабатываемых методов математического моделирования, компьютерного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов лежит несколько подходов:

- математическое моделирование релаксации и ползучести полимерных материалов (основополагающих вязкоупруго-пластических процессов указанных материалов), построенное с учетом влияния конформационно-энергетических структурных межмолекулярных переходов наночастиц на динамику и активацию их деформационных и релаксационных процессов;

- подтверждение результатов, как математического моделирования, так и численного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов полимерных материалов результатами выборочного эксперимента;

- учет вероятностных распределений времен релаксации и времен запаздывания в интегральных ядрах релаксации и ползучести соответствующих определяющих уравнений релаксационного и деформационного процессов.

**Соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа выполнена в рамках Паспорта научной специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям) ВАК Министерства науки и высшего образования 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** диссертационной работы заключается, прежде всего, в

- разработке инновационных математических моделей для описания вязкоупруго-пластических процессов различной сложности текстильных канатов;

- разработке методов численного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов, основанных на применении новой математической модели указанных процессов этих материалов;

- разработке методов повышения точности и достоверности прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов, направленных на создание новой продукции, обладающей требуемыми функциональными и эксплуатационными свойствами;

- разработке методов системного анализа вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов для проведения сравнительного анализа их функционально-эксплуатационных свойств и разработки рекомендаций по проектированию новых изделий повышенной конкурентоспособности;

- разработке рекомендаций по проектированию текстильных канатов с учетом результатов полученного численного прогнозирования на ЭВМ их вязкоупруго-пластических характеристик.

**Теоретическая и практическая значимость** работы состоит в том, что:

- разработаны инновационные методы, позволяющие повышать конкурентоспособность текстильных канатов, как на этапе их проектирования, так и организации производства;

- был разработан комплекс программного обеспечения, позволяющий, как численно прогнозировать вязкоупруго-пластические процессы текстильных канатов, так и проводить их сравнительный анализ;

- были даны практические рекомендации по предпочтительному использованию текстильных канатов, в зависимости от их технических характеристик на основе проведенного качественного анализа их вязкоупруго-пластических процессов;

- результаты диссертационного исследования применяются в учебных целях, а также в научно-исследовательской деятельности в СПбГУПТД.

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

–математические модели вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов;

– методы расчетного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов, применяемых для любых режимов эксплуатации;

- инновационные методы повышения точности прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов, учитывающие условия их эксплуатации;

- разработанное программное обеспечение для математического моделирования, численного прогнозирования и проведения системного анализа вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов.

**Степень достоверности результатов.** Методики математического моделирования, численного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов были внедрены в ЗАО "ТЕКСТИЛЬ-ИНВЕСТ", где подтвердили свою правомочность и работоспособность. Результатом применения этих методик явились практические рекомендации для проектирования текстильных материалов, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами.

**Апробация результатов диссертационной работы** проводилась на научных конференциях различных уровней, в частности, на: Международной научной конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах - 2020", IV международной конференции "Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов", (2018), Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов (2018-2019); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Инновации молодежной науки" (2015 - 2020), .

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликовано 15 научных статей в изданиях из "Перечня ВАК", среди которых 10 статей - в изданиях, входящих в Web of Science или Scopus. Также по теме диссертационного исследования получили государственную регистрацию 8 программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, пять глав, выводы, список использованной литературы и два приложения. Основное содержание работы изложено на 144 страницах.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В Введении** описана актуальность диссертационного исследования, указана степень разработанности темы диссертации, приведены решаемые в диссертации цели и задачи, применяемые методы исследования, а также соответствие паспорту специальности 05.02.22, сделаны заключения по научной новизне, теоретической и практической значимости работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту и степень достоверности полученных в диссертации результатов исследования.

Решаемые в диссертации задачи особо актуальны во время действия международных санкций. Путем повышения конкурентоспособности текстильных канатов решаются вопросы по их импортозамещению.

Высокая научная значимость результатов обусловлена сложностью проведения исследований деформационных, релаксационных и восстановительных свойств текстильных канатов на эндохронном уровне ввиду большой неоднородности микроструктуры исследуемых объектов. Лишь учет конформационно-энергетических эндохронных переходов наночастиц текстильных канатов в разрабатываемых математических моделях их вязкоупруго-пластических свойств позволяет выйти на достижимость заявленных результатов.

Для решения задачи повышения конкурентоспособности текстильных канатов должно быть учтено их функциональное назначение, а также эксплуатационные характеристики.

**Первая глава** посвящена литературному обзору по теме диссертационного исследования. В ней приводятся описания современных и классических представлений о математических моделях вязкоупруго-пластических свойств полимерных материалов, к классу которых относятся изучаемые текстильные канаты. Приведены также известные методы прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов этих материалов и методы оценки их эксплуатационных свойств.

В главе приведены известные варианты интегральных определяющих уравнений, применяемых при прогнозировании вязкоупруго-пластических процессов полимерных материалов.

Традиционные подходы к моделированию вязкоупруго-пластических свойств полимерных материалов принадлежат Работнову Ю.Н., Ржаницину А.Р., Колтунову М.А. Математическим моделированием и прогнозированием указанных свойств полимерных материалов занимались также Кукин Г.Н., Щербаков В.П., Николаев С.Д., Соловьев А.Н., Сталевич А.М., Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В., Егорова М.А. Климова Н.С.

**Вторая глава** посвящена разработанным методам математического моделирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов.

В главе приводятся также основные технические характеристики изучаемых в диссертации текстильных канатов, полученные от их производителей (табл. 1). Изучаемые текстильные канаты отличаются друг от друга компонентным составом, геометрической структурой (типом прядения), диаметром, значениями разрывных силовых и деформационных характеристик.

В главе описываются разработанные математические модели релаксационных процессов и процессов ползучести текстильных канатов.

В основе математического моделирования релаксационных процессов изучаемых текстильных канатов заложена аппроксимация графического семейства кривых модуля релаксации  $E_{\epsilon t}$  с помощью нормированной функции  $\varphi_{\epsilon t}$ , в качестве которой целенаправленно выбран нормированный арктангенс логарифма (НАЛ), являющийся интегральной функцией вероятностного распределения Коши

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

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

где параметрами математической модели релаксации являются: модуль упругости  $E_0$  и модуль вязкоупругости  $E_\infty$  - асимптоты обобщенной кривой модуля релаксации, структурный параметр, отвечающий за интенсивность релаксационного процесса  $b_\epsilon$  и функция времен релаксации  $\tau_\epsilon$ , распределенных по вероятностному закону Коши.

Функциональный параметр времени релаксации  $\tau_\epsilon$  позволяет проводить оценку времени релаксационного процесса для значения постоянной деформации  $\epsilon$ .

По аналогии, в основе математического моделирования процессов ползучести текстильных канатов заложена аппроксимация графического семейства кривых податливости  $D_{\sigma t}$  с помощью нормированной функции  $\varphi_{\sigma t}$ , в качестве которой также выбрана функция НАЛ

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

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right), \quad (4)$$

где параметрами математической модели ползучести являются: упругая податливость  $D_0$ , равновесная податливость  $D_{\infty}$ , - асимптоты обобщенной кривой податливости, структурный параметр, отвечающий за интенсивность процесса податливости  $b_{\sigma}$  и функция времен запаздывания  $\tau_{\sigma}$ , распределенных по вероятностному закону Коши.

Таблица 1 - Технические характеристики изучаемых текстильных канатов

Условное название	Компонентный состав	Количество прядей	Толщина, мм	Линейная плотность, Ктекс	Значение разрывного напряжения, ГПа	Значение разрывной деформации, %
К1	капрон - 100%	3	6	33,6	5,1	19
К2	капрон - 100%	3	12	124	4,7	17
К3	капрон - 100%	3	18	507	4,4	16
К4	капрон - 100%	6	6	48,2	6,3	17
К5	капрон - 100%	6	12	187	5,7	15
К6	капрон - 100%	6	18	732	5,2	14
П1	полипропилен - 100%	3	6	24,8	4,3	16
П2	полипропилен - 100%	3	12	87,2	4,1	15
П3	полипропилен - 100%	3	18	341	3,9	15
П4	полипропилен - 100%	6	6	34,8	5,1	14
П5	полипропилен - 100%	6	12	131	4,8	13
П6	полипропилен - 100%	6	18	482	4,5	13
КП1	капрон - 50% полипропилен - 50%	3	6	28,4	4,7	18
КП2	капрон - 50% полипропилен - 50%	3	12	109	4,4	16
КП3	капрон - 50% полипропилен - 50%	3	18	421	4,2	15
КП4	капрон - 50% полипропилен - 50%	6	6	41,7	5,7	15
КП5	капрон - 50% полипропилен - 50%	6	12	156	5,3	14
КП6	капрон - 50% полипропилен - 50%	6	18	634	4,8	13

Функциональный параметр времени запаздывания  $\tau_{\sigma}$  позволяет проводить оценку времени процесса ползучести при действии постоянного напряжения  $\sigma$ .

Выбор функции НАЛ для аппроксимации и математического моделирования релаксационных процессов и процессов ползучести текстильных канатов не случаен, т.к. она не только элементарная, но и описывает закон распределения Коши, обладающий аддитивностью (сумма величин, так же как и каждая из них описываются одним законом Коши). Для текстильных канатов это важно, так как они образованы из прядей - нитей - волокон. Пользоваться законом Коши в случае исследования вероятностных характеристик - времен релаксации и времен запаздывания текстильных канатов очень удобно. Еще одним достоинством распределения Коши является более медленная сходимость его интегральной функции распределения к своим

асимптотическим значениям, что позволяет лучше, в отличие от нормального распределения, описывать кратковременные и длительные процессы релаксации и ползучести. Ну и, наконец, аналитический вид функции НАЛ упрощает дифференциальные и интегральные преобразования с ней, в отличие от нормального распределения.

Далее особое внимание уделяется проверке адекватности описанных выше математических моделей процессов релаксации (1)-(2) и процессов ползучести (3)-(4). Для такой проверки используется сравнение экспериментальных данных с вычисленными модулем релаксации и податливостью. Исследование показало, что величина относительных отклонений данных эксперимента от расчетных значений не более, чем 10 %.

Другое достоинство моделей процессов релаксации (1)-(2) и ползучести (3)-(4) состоит в том, что они используют наименее возможное число своих параметров с определенным физическим смыслом.

Так:

-  $E_0, E_\infty$  - асимптотические характеристики модуля релаксации  $E_{\varepsilon t}$ :

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

-  $D_0, D_\infty$  - асимптотические характеристики податливости  $D_{\sigma t}$ :

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

- интенсивность прохождения релаксации  $b_\varepsilon$  (пол процесса релаксации проходит за время  $t \in [t', t'']$ ,  $\ln(t'/\tau_\varepsilon) = -b_\varepsilon$ ,  $\ln(t''/\tau_\varepsilon) = b_\varepsilon$ );

- интенсивности прохождения ползучести  $b_\sigma$  (пол процесса ползучести проходит за время  $t \in [t', t'']$ ,  $\ln(t'/\tau_\sigma) = -b_\sigma$ ,  $\ln(t''/\tau_\sigma) = b_\sigma$ );

- функция релаксационно-временных сдвигов  $f_{\varepsilon t} = \ln(t_1/\tau_\varepsilon)$ , определяющая по сути значения времен релаксации  $\tau_\varepsilon$ , определяет величины сдвигов кривых модуля релаксации до наложения на обобщенную кривую модуля релаксации); указанная функция содержится внутри релаксационного аргумента-функционала

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_\varepsilon} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_\varepsilon} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right); \quad (7)$$

- функция деформационно-временных сдвигов  $f_{\sigma t} = \ln(t_1/\tau_\sigma)$ , определяющая по сути значения времен запаздывания  $\tau_\sigma$ , определяет величины сдвигов кривых податливости до наложения на обобщенную кривую податливости); указанная функция содержится внутри деформационного аргумента-функционала:

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

В табл. 2 приведены расчетные характеристики математических моделей релаксации и ползучести изучаемых текстильных канатов (табл. 1).

Таким образом, из второй главы диссертации можно сделать вывод о целесообразности применения нормированной функции НАЛ в качестве основной для моделирования релаксации и ползучести текстильных канатов. Указанная функция позволяет достаточно точно моделировать вязкоупруго-пластические процессы этих материалов.

Таблица 2 - Расчетные характеристики изучаемых текстильных канатов

Условное название	$b_\varepsilon$	$E_0$ , ГПа	$E_\infty$ , ГПа	$b_\sigma$	$D_0$ , ГПа <sup>-1</sup>	$D_\infty$ , ГПа <sup>-1</sup>
К1	5,68	6,49	0,58	3,98	0,15	1,72
К2	5,09	6,21	0,71	3,56	0,16	1,41
К3	4,43	5,89	0,84	3,12	0,17	1,19
К4	4,52	5,58	0,49	3,16	0,18	2,04
К5	4,13	5,32	0,58	2,89	0,19	1,72
К6	3,79	5,11	0,67	2,65	0,21	1,49
П1	10,12	11,73	0,36	7,08	0,09	2,78
П2	9,76	11,24	0,39	6,83	0,09	2,56
П3	9,17	10,68	0,42	6,42	0,09	2,38
П4	9,21	10,57	0,45	6,45	0,09	2,22
П5	8,85	10,22	0,49	6,21	0,10	2,04
П6	8,47	8,93	0,53	5,93	0,11	1,89
КП1	7,90	9,08	0,47	5,53	0,11	2,13
КП2	7,43	8,71	0,55	5,19	0,11	1,82
КП3	6,80	8,28	0,63	4,76	0,12	1,59
КП4	6,87	8,14	0,47	4,81	0,12	2,13
КП5	6,49	7,75	0,54	4,54	0,13	1,87
КП6	6,13	7,04	0,61	4,29	0,14	1,67

В третьей главе решается задача численного прогнозирования релаксационных процессов и процессов ползучести текстильных канатов. Указанное прогнозирование осуществляется на основе интегральных определяющих уравнений релаксации и ползучести типа Больцмана-Вольтерра

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

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta, \quad (10)$$

в которых интегральными ядрами являются:

- производная от релаксационной функции (2)

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_\varepsilon} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t} - \quad (11)$$

для релаксационного процесса и

- производная от нормированной функции запаздывания (4)

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_\sigma} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot \frac{1}{t} - \quad (12)$$

для ползучести.

На рис. 1 приведено экспериментальное "семейство" кривых модуля релаксации трехрядного капронового каната толщины 6 мм и линейной плотности 33,6 Ктекс.

На рис. 2 приведено экспериментальное "семейство" кривых податливости трехрядного капронового каната толщины 6 мм и линейной плотности 33,6 Ктекс.

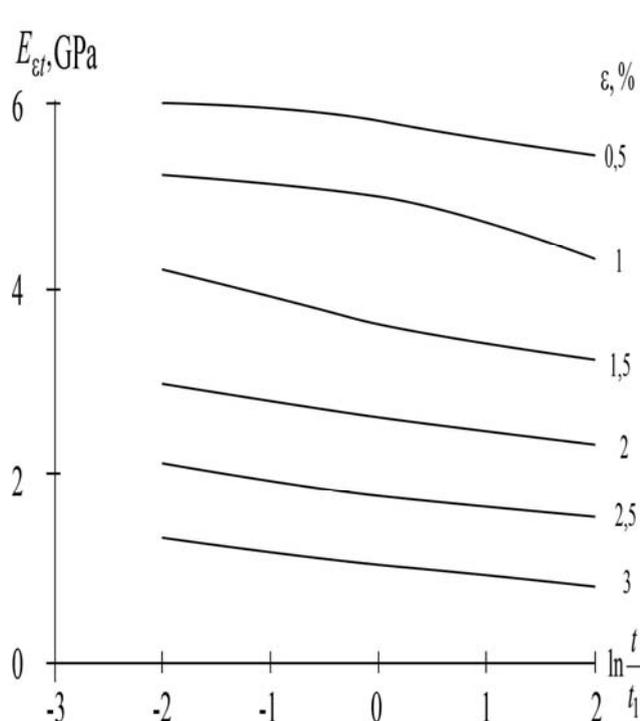


Рисунок 1 - Экспериментальное "семейство" кривых модуля релаксации трехрядного капронового каната толщины 6 мм и линейной плотности 33,6 Ктекс

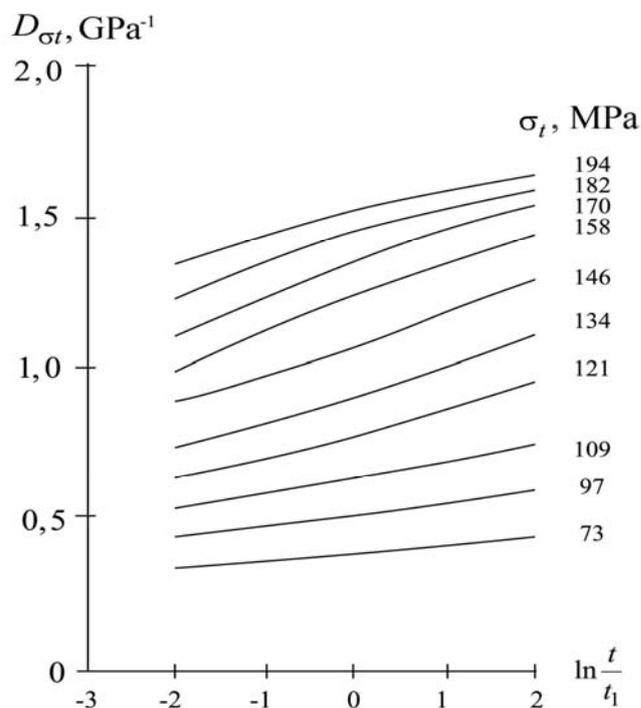


Рисунок 2 - Экспериментальное "семейство" кривых податливости трехрядного капронового каната толщины 6 мм и линейной плотности 33,6 Ктекс

Таким образом, разработанные в третьей главе численные методы расчета релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов имеют важное значение для проведения последующего сравнительного анализа и оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов с целью получения рекомендаций по проектированию канатов с улучшенными свойствами.

**Четвертая глава** посвящена разработке методов повышения точности и достоверности прогнозирования процессов релаксации и ползучести текстильных канатов в зависимости от временной длительности этих процессов.

В частности показано, что при прогнозировании краткосрочных и быстротекущих процессов релаксации и ползучести путем численного интегрирования наибольший вклад в интегральные суммы дают приложенные деформация или напряжение в самом начале процесса.

В силу этого, разбивать временную шкалу при численном интегрировании надо на основе возрастающей геометрической прогрессии, чтобы лучшим образом учесть указанные вклады приложенной деформации и нагрузки в начале соответствующих процессов.

И, наоборот, при прогнозировании длительных и затяжных процессов релаксации и ползучести путем численного интегрирования, наибольший вклад в интегральные суммы дают приложенные деформация или напряжение в зоне завершения этих процессов.

В силу этого, разбиение временной шкалы интегрирования будет наиболее правильным, если его произвести в убывающей геометрической прогрессии - тогда деформационные и силовые вклады в конце процесса будут учтены наилучшим образом.

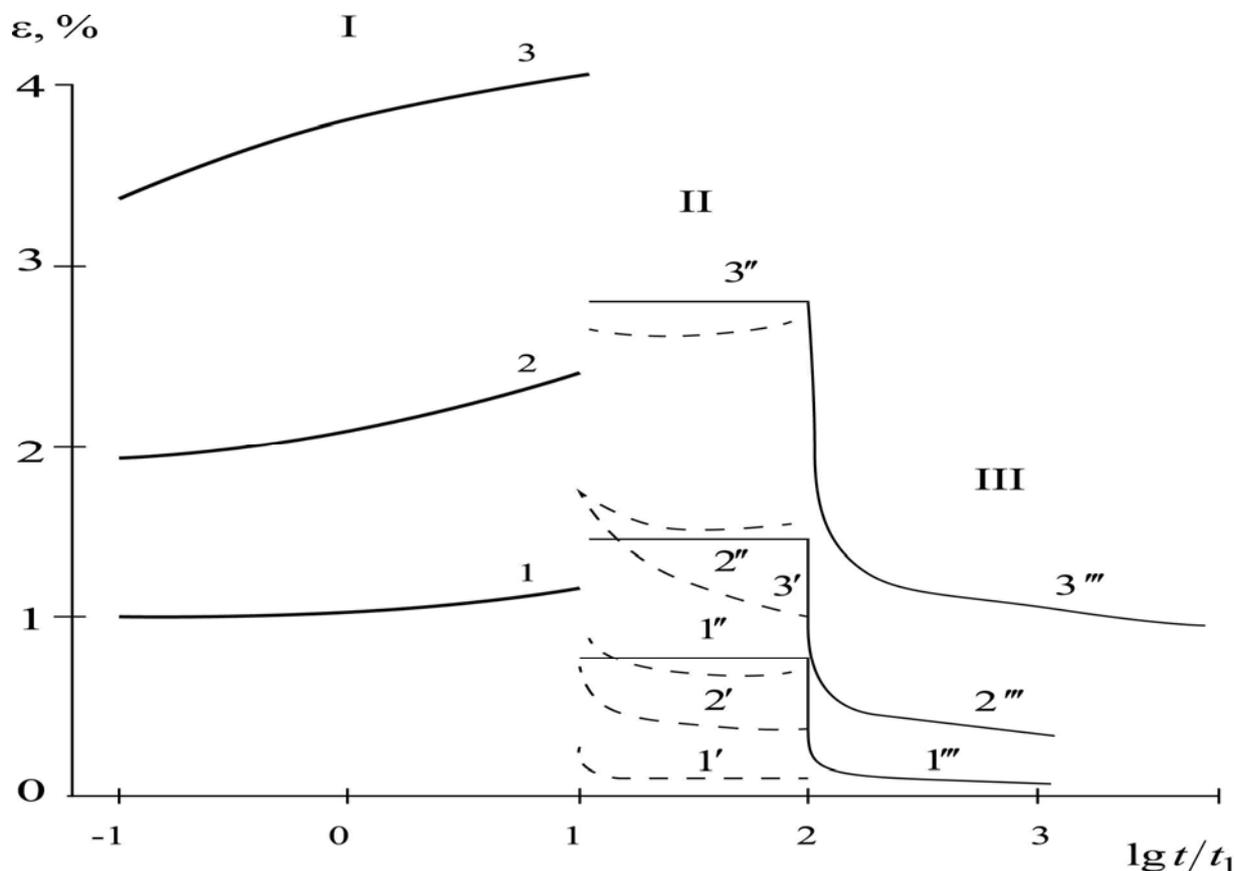


Рисунок 3 - Пример деформационно-восстановительного процесса трехрядного капронового каната толщины 6 мм и линейной плотности 33,6 Ктекс.

I - нагружение: 1 -  $\sigma_t = 72$  МПа, 2 -  $\sigma_t = 134$  МПа, 3 -  $\sigma_t = 194$  МПа.

II - полная разгрузка: 1'' -  $\sigma_t = 0$  МПа, 2'' -  $\sigma_t = 0$  МПа, 3'' -  $\sigma_t = 0$  МПа.

II - половинная разгрузка: 1'' -  $\sigma_t = 36$  МПа, 2'' -  $\sigma_t = 67$  МПа, 3'' -  $\sigma_t = 87$  МПа.

III - полная разгрузка: 1''' -  $\sigma_t = 0$  МПа, 2''' -  $\sigma_t = 0$  МПа, 3''' -  $\sigma_t = 0$  МПа.

Таким образом, за счет учета временных специфик релаксационного процесса и процесса ползучести можно добиться повышение точности численного прогнозирования указанных процессов.

Исследования показали, что такое повышение точности расчетного прогнозирования уменьшает относительную погрешность вычисления, в среднем, с 10% до 6 %.

**Пятая глава** посвящена компьютерной реализации методов, разработанных в диссертации.

Рассмотрено применение компьютерной реализации разработанных методов математического моделирования, численного прогнозирования и качественной оценки эксплуатационных свойств текстильных канатов с целью повышения их конкурентоспособности.

В главе приведена также качественная оценка функциональных свойств текстильных канатов, которая проведена на основе предложенных методик сравнительного и системного анализа, которые определили зависимость указанных свойств от значений технических характеристик канатов: толщины каната, компонентного состава, линейной плотности, типа переплетения прядей и т.д..

Сравнивая образцы текстильных канатов одинакового типа переплетения прядей и равной толщины, но разного компонентного состава выявляем отличие структурных коэффициентов  $b_\varepsilon$  и  $b_\sigma$ , где увеличение линейной плотности текстильных канатов ведет к снижению интенсивностей процесса релаксации и процесса ползучести.

В главе рассмотрены компьютерные алгоритмы и соответствующие программы для ЭВМ (рис. 4):

а - по математическому моделированию вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов (свидетельство № 2020616506 от 18.06.2020);

б - по прогнозированию релаксационных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения (свидетельство № 2020615887 от 03.06.2020);

в - по прогнозированию деформационных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения (свидетельство № 2020616068 от 08.06.2020);

г - по прогнозированию восстановительных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения (свидетельство № 2020615788 от 02.06.2020);

д - по компьютерному прогнозированию вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов (свидетельство № 2020615820 от 03.06.2020);

е - по прогнозированию деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения (свидетельство № 2018612702 от 22.02.2018);

ж - по проведению сравнительного анализа деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения (свидетельство № 2018612705 от 22.02.2018);

и - по системному анализу вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов (свидетельство № 2020615787 от 02.06.2020).



Рисунок 4 - Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

Сравнивая образцы текстильных канатов, одной толщины и одного типа переплетения прядей, но различных компонентных составов, было увидено, что для капроновых канатов свойственно замедление релаксационных процессов и процессов ползучести по сравнению с полипропиленовыми.

Было определено также, что с уменьшением толщины текстильных канатов, для равных остальных условий, происходит уменьшение параметров  $b_\varepsilon$  и  $b_\sigma$ , то есть происходит увеличение интенсивностей релаксационных процессов и процессов ползучести.

Таким образом, методы моделирования, прогнозирования и оценки релаксационных процессов и процессов ползучести текстильных канатов могут являться инструментами повышения их конкурентоспособности.

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработанные математические модели вязкоупруго-пластических процессов различной сложности текстильных канатов позволяют с достаточной точностью описывать эти процессы.

2. Разработанные методы численного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов служат основой проведения сравнительного и системного анализа функциональности этих канатов.

3. Разработанные методы повышения точности компьютерного прогнозирования вязкоупруго-пластических процессов текстильных канатов способствуют получению достоверных оценок функциональных свойств изучаемых канатов.

4. Разработанные компьютерные методики и алгоритмы по моделированию, прогнозированию и качественной оценке вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов процессов полимерных текстильных канатов служат основой для целенаправленного отбора изучаемых канатов, в зависимости от их функционально-эксплуатационного назначения.

5. Разработанный комплекс программного обеспечения является универсальным, так как может быть использован при оценке функциональности широкого круга материалов.

6. Предложенные методы математического моделирования, расчетного прогнозирования и качественной оценки вязкоупруго-пластических свойств текстильных канатов, а также соответствующие им программы для ЭВМ были апробированы на широкой репрезентативной группе текстильных канатов с получением соответствующей оценки их функциональности.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК..."**

1. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егоров И.М., Вагнер В.И. Методы численного прогнозирования релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов//Химические волокна, 2020, № 3, с. 21 - 24. (Web of Science, Scopus)

2. Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. Математическое моделирование и системный анализ вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов//Химические волокна, 2020, № 3, с. 48 - 51. (Web of Science, Scopus)

3. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Демидов А.В. Разработка методов улучшения функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Химические волокна, 2020, № 3, с. 64 - 67. (Web of Science, Scopus)

4. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Егоров И.М. Методы моделирования и компьютерного прогнозирования релаксации текстильных эластомеров медицинского назначения//Химические волокна, 2019, № 6, с. 57-59. (Web of Science, Scopus)

англ. вар.: Pereborova, N.V., Makarov, A.G., Egorova, M.A., Egorov, I.M. Methods of Modeling and Computer-Aided Prediction of Relaxation of Medical-Purpose Textile Elastomers//Fibre Chemistry, 2020, 51(6), с. 467-470.

5. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Егоров И.М. Методы моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных и восстановительных процессов текстильных эластомеров медицинского назначения//Химические волокна, 2019, № 6, с. 60-62. (Web of Science, Scopus)

англ. вар.: Pereborova, N.V., Makarov, A.G., Egorova, M.A., Egorov, I.M. Methods Modeling and Computer-Aided Prediction of Strain and Relaxation Processes of Medical-Purpose Textile Elastomers//Fibre Chemistry, 2020, 51(6), с. 471-474

6. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Васильева Е.К., Шванкин А.М., Егоров И.М. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна, 2018, № 6, с. 3-6. (Web of Science, Scopus)

англ. вар.: Pereborova N.V., Makarov A.G., Vasil'eva E.K., Shvankin A.M., Egorov I.M. Mathematical Modeling and Computed Prediction of Viscoelastic Creep in Geotextile Nonwoven Fabrics//Fibre Chemistry, 2019, Vol. 50, № 6, p. 487-490.

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

англ. вар.: Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Development of Methods of Mathematical Modeling of Processes of Relaxation and Creep of Polymer Filaments Based on a Spectral Interpretation //Fibre Chemistry. 2018. Т. 49. № 1. С. 70-75.

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

англ. вар.: Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. Development of Criteria for Reliability of the Prediction of the Deformation and Relaxation Processes of Polymeric Materials//Fibre Chemistry. 2018. Т. 49. № 2. С. 137-141.

9. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Качественный анализ деформационно-релаксационных свойств арамидных шнуров горноспасательного назначения/Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2 (368). С. 309-313. (Scopus)

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

11. Васильева Е.К., Егоров И.М., Козлов А.А., Зурахов Н.С. Методы математического моделирования при исследовании релаксационных и деформационных процессов полиамидных тканей для куполов парашютов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017. - № 3. - С. 32-41.

12. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Прогнозирование усадочных и восстановительных свойств арамидных текстильных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2017. № 4. С. 142-150.

13. Шванкин А.М., Егорова М.А., Егоров И.М. Моделирование деформационных свойств термостойких арамидных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2016. № 2. С. 38-45.

14. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Козлов А.А., Шванкин А.М., Лёдов Д.С. Компьютерное моделирование деформационных свойств арамидных материалов сложного строения//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2016. № 4. С. 23-31.

15. Егоров И.М., Козлов А.А., Кондрашов В.В., Оглуздина Л.В., Зурахова Т.А., Шванкин А.М. Моделирование вязкоупругих свойств полимерных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2015. № 3. С. 52-57.

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

16. Козлов А.А., Переборова Н.В., Буряк Е.А., Егоров И.М. Прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство № 2020616068 от 08.06.2020.

17. Козлов А.А., Переборова Н.В., Буряк Е.А., Егоров И.М. Прогнозирование релаксационных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство № 2020615887 от 03.06.2020.

18. Козлов А.А., Переборова Н.В., Буряк Е.А., Егоров И.М. Прогнозирование восстановительных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство № 2020615788 от 02.06.2020.

19. Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. Математическое моделирование вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов. Свидетельство № 2020616506 от 18.06.2020.

20. Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. Компьютерное прогнозирование вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов. Свидетельство № 2020615820 от 03.06.2020.

21. Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. Системный анализ вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов. Свидетельство № 2020615787 от 02.06.2020.

22. Переборова Н.В., Козлов А.А., Егорова М.А., Егоров И.М. Прогнозирование деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство № 2018612702 от 22.02.2018.

23. Переборова Н.В., Козлов А.А., Егорова М.А., Егоров И.М. Проведение сравнительного анализа деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство № 2018612705 от 22.02.2018.

Подписано в печать 20.10.2020. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,0. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № 274  
Отпечатано в типографии СПбГУПТД  
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, д.26