

На правах рукописи

Чистякова Елена Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность:

2.6.17. Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2025

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

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

Официальные оппоненты: **Ястребов Анатолий Павлович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), профессор кафедры Бизнес-информатики и Менеджмента. Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

Рымкевич Ольга Васильевна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, доцент кафедры физики

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

Защита диссертации состоится 16 декабря 2025 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 437.

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

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.385.06
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Полимерные текстильные материалы с каждым годом становятся все более востребованными в различных областях промышленности. Поэтому немаловажным является исследование эксплуатационных свойств этих материалов, определяемыми, в первую очередь, деформационными и релаксационными процессами.

Условия эксплуатации полимерных текстильных материалов характеризуются, в основном, зоной действия неразрушающих значений деформаций и нагрузок, где не наблюдается существенных изменений микроструктуры изучаемых материалов. Эта исследуемая зона эксплуатации полимерных текстильных материалов ограничена значениями деформации и нагружения не более, чем 30% от разрывных значений. В указанной области и целесообразно заниматься построением математических моделей деформационных и релаксационных процессов изучаемых материалов, а также дальнейшим их численным прогнозированием.

К основополагающим эксплуатационным процессам полимерных текстильных материалов следует отнести деформационные и релаксационные процессы. Большинство других эксплуатационных процессов (например, деформационно-восстановительный процесс) можно свести к суперпозиции этих двух процессов.

Разработка математических моделей эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов и численных методов их прогнозирования связана с решением задачи проведения качественной оценки их эксплуатационных свойств, что особенно актуально при проектировании новых материалов и изделий с заданными свойствами.

Проведение наиболее достоверной качественной оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов может быть достигнуто только при построении наиболее адекватных математических моделей деформационных и релаксационных процессов этих материалов. Проверку адекватности такого математического моделирования можно осуществить, сравнивая прогнозируемые значения деформации и нагружения полимерных текстильных материалов с данными соответствующих экспериментов.

Полимерные текстильные материалы, в силу своей сложной макроструктуры, обладают некоторыми особенностями, заключающимися в том, что некоторая математическая модель деформационного или релаксационного процесса, идеально описывающая эти процессы для одного материала, может совсем не подходить для моделирования указанных процессов другого материала. В силу сказанного, имеется необходимость разработки новых математических моделей деформационных и релаксационных процессов для различных полимерных текстильных материалов с обязательной проверкой их адекватности.

Работа выполнялась в рамках базовой части государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации 2023 - 2025 гг. № FSEZ-2023-0003 по теме: "Разработка научных основ и критериев качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов, в том числе двойного назначения, применяемых в технике и медицине, на основе математического моделирования, системного анализа и цифрового прогнозирования этих свойств".

Степень разработанности темы исследования. Разработка математических моделей и численных методов прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов имеет существенное значение при проведении дальнейшей качественной оценки эксплуатационных свойств этих

материалов, что, в свою очередь, способствует повышению качества проектируемых материалов, а также повышению их конкурентоспособности.

Математическое моделирование и численное прогнозирование деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов - одно из развиваемых направлений исследований в научной школе "Разработка критериев и методов качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств материалов текстильной и легкой промышленности", возглавляемой научным руководителем - проф. Переборовой Н.В. (грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4.).

Цель работы состоит в разработке методов математического моделирования и цифрового прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

Основными **задачами** исследования являются:

- математическое моделирование основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационного и релаксационного;
- разработка цифровых методов прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов;
- разработка метода проверки адекватности разработанных математических моделей деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов на основе данных краткосрочного эксперимента;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования явились классические и современные научные представления, разработки и положения, применяемые при моделировании эксплуатационных свойств в механике полимеров. Используются также интегральные уравнения, уравнения математической физики, численные методы, методы вычислительной математики и информатики.

Соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.17. Материаловедение:

2. Установление закономерностей ... и физико-механических процессов, происходящих в ... композиционных структурах.
3. Разработка научных основ выбора ... неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям ... эксплуатации ... изделий.
4. Разработка ... физико-механических процессов формирования новых ... неметаллических и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, ...эксплуатационными и технологическими свойствами.
5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения ... неметаллических и композиционных материалов ... от действия механических нагрузок и внешней среды.

6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств ... неметаллических и композиционных материалов.

8. Разработка и компьютерная реализация математических моделей ... фазовых и деформационных превращений при ... эксплуатации различных ... неметаллических и композиционных материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов.

13. Развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса ... неметаллических и композиционных материалов.

Научная новизна работы состоит в разработке:

- математической модели релаксационных процессов полимерных текстильных материалов на основе нормированной функции гиперболический тангенс;

- математической модели деформационных процессов полимерных текстильных материалов на основе нормированной функции гиперболический тангенс;

- цифрового метода прогнозирования релаксационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- цифрового метода прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов;

- компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

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

- разработаны новые математические модели основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационного и релаксационного, адаптированных к конкретным полимерным текстильным материалам;

- разработаны новые методы численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов;

- разработаны новые методы повышения точности численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов в зависимости от временной длительности этих процессов;

- разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

Положения, выносимые на защиту:

- математические модели основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационного процесса и релаксационного процесса;

- методы цифрового прогнозирования основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов;

- разработанный программный продукт по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов ;

- разработанный программный продукт по цифровому прогнозированию эксплуатационно-деформационных и эксплуатационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Степень достоверности результатов. Методы математического моделирования и численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов были внедрены в ЗАО "САЛЮТ" и в ООО "ЭКОВАСТ", где подтвердили свою полную работоспособность. По результатам применения указанных методов получены практические рекомендации по проектированию полимерных текстильных материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях: V Международной научной конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах" (С.Пб., 2024 г.) и Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых "Инновации молодежной науки" (С.Пб., 2017, 2018, 2020, 2023, 2024, 2025 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 38 печатных работ, среди которых 8 статей в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК", 4 свидетельства о государственной регистрации программ в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (116 наименований) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 139 страницах машинописного текста, иллюстрировано 20 рисунками, содержит 4 таблицы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности развиваемого научного направления, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы. Приведены также: степень разработанности темы исследования, методы исследования, соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов. Указана также информация об апробации результатов работы и о публикациях по тематике диссертационной работы.

В **первой главе** дается обзор научной литературы по известным методам математического моделирования и численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

В главе упоминаются научные подходы основоположников данного направления исследования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов (Кукин Г.Н., Николаев С.Д., Соловьев А.Н., Щербаков В.П., Сталевич А.М., Макаров А.Г., Работнов Ю.Н., Колтунов М.А., Ржаницин А.Р.), а также приведены различные варианты математических моделей деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

В главе также приведены основные закономерности теории вязкоупругости полимеров, на основе которых разрабатываются математические модели деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

Во **второй главе** приведено описание технических характеристик изучаемых полимерных текстильных материалов, в качестве которых были выбраны полимерные текстильные нити различного компонентного состава и различной линейной плотности (табл. 1) и изготовленные из этих нитей текстильные полотна.

Далее в главе проводится построение математических моделей деформационных и релаксационных процессов изучаемых полимерных текстильных материалов на основе учета краткосрочного экспресс-эксперимента указанных процессов.

Таблица 1. Технические характеристики синтетических нитей

Условное обозначение	Компонентный состав	Линейная плотность, Текс	Разрывная деформация, %	Разрывное напряжение, ГПа	Изготовитель
ЛН-114	лавсан	114	16,7	0,86	ВНИИСВ, Тверь
ЛН-16	лавсан	16	24,5	0,54	"Химволокно", Курск
КН-91	капрон	91	14,2	0,97	"Клинволокно", Клин
КН-187	капрон	187	16,5	0,89	ВНИИСВ, Тверь
КН-210	капрон	210	18,3	0,82	НИИТТ, Ярославль

Таблица 2. Технические характеристики текстильных полотен

Условное обозначение	Ширина, мм	Компонентный состав, %	Линейная плотность, Текс (основа/уток)	Разрывная деформация, %	Разрывная нагрузка, кН
ЛКП-130	130	лавсан -60, капрон - 40	6,7/9,6	18	2,9
КП-100	100	капрон-100	3,3/5,2	22	3,7
ЛП-140	140	лавсан -100	7,2/9,8	19	3,4
ЛКП-150	150	лавсан -80, капрон -20	6,8/9,5	21	3,6
КП-120	120	капрон-100	5,2/5,2	18	3,1

Построение математических моделей релаксационного процесса полимерных текстильных материалов осуществляется на основе аппроксимации модуля релаксации

$$E_{\varepsilon t} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где:

σ - напряжение,

ε - деформация,

t - время

нормированной функцией $\varphi_{\varepsilon t}$:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_{\varepsilon t}, \quad (2)$$

в качестве которой выбран гиперболический тангенс:

$$\varphi_{\varepsilon t} = 0,5 \cdot \left(1 + th \left(0,5 \cdot A_\varepsilon \cdot \ln(t/\tau_\varepsilon) \right) \right). \quad (3)$$

Здесь:

A_ε - параметр интенсивности релаксационного процесса полимерных текстильных материалов,

E_0 - модуль упругости,

E_∞ - модуль вязкоупругости,

τ_ε - время релаксации, то есть время, за которое проходит половина релаксационного процесса при заданном значении приложенной деформации ε .

Аналогично, построение математических моделей деформационного процесса полимерных текстильных материалов осуществляется на основе аппроксимации податливости

$$D_{\sigma t} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma} \quad (4)$$

нормированной функцией $\varphi_{\sigma t}$:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad (5)$$

в качестве которой выбран гиперболический тангенс:

$$\varphi_{\sigma t} = 0,5 \cdot \left(1 + th \left(0,5 \cdot A_\sigma \cdot \ln(t/\tau_\sigma) \right) \right). \quad (6)$$

Здесь:

A_σ - параметр интенсивности деформационного процесса полимерных текстильных материалов,

D_0 - начальная податливость,

D_∞ - предельная равновесная податливость,

τ_σ - время запаздывания, то есть время, за которое проходит половина деформационного процесса при заданном значении приложенного напряжения σ .

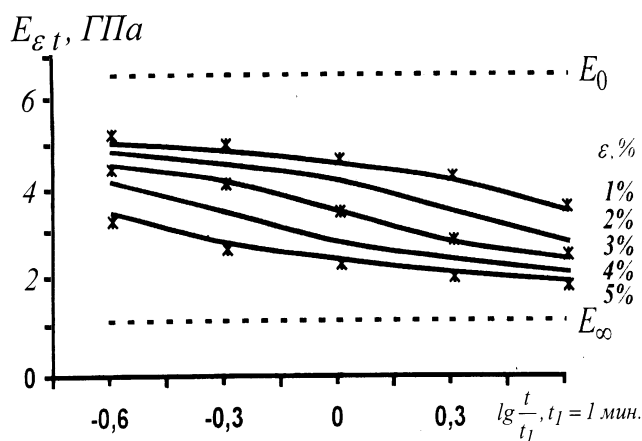


Рисунок 1 -Пример "семейства" модуля релаксации капроновой нити КН-91 (линии - экспериментальные значения, * - прогнозируемые значения)

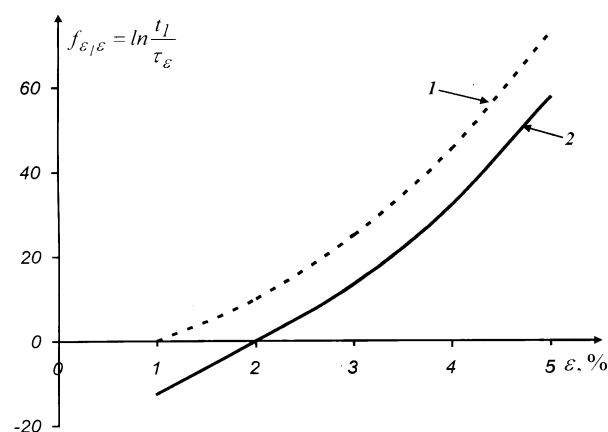


Рисунок 2 - Пример графиков функций времен релаксации капроновых нитей КН-91 (кривая 1) и КН-187 (кривая 2)

Несомненным достоинством приведенных математических моделей релаксационного процесса (1) - (3) и деформационного процесса (4) - (6) полимерных текстильных материалов является то, что они содержат минимальное из возможных число параметров, имеющих ясный физический смысл (по три константы и одну временную функцию).

Так, для релаксационного процесса это:

- асимптотические значения модуля релаксации E_0 и E_∞ (рис. 1):

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_{\varepsilon t}, \quad (7)$$

$$E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_{\varepsilon t}, \quad (8)$$

- структурный параметр A_ε , характеризующий скорость прохождения релаксационного процесса полимерных текстильных материалов;

- функция времен релаксации $f_{\varepsilon t} = \ln(t/\tau_\varepsilon)$ (рис.2), характеризующая сдвиги кривых "семейства" релаксации вдоль логарифмическо-временной шкалы, содержащиеся в структурно-деформационно-временном аргументе-функционале

$$W_{\varepsilon t} = 0,5 \cdot A_\varepsilon \cdot \ln(t/\tau_\varepsilon) = 0,5 \cdot A_\varepsilon \cdot (\ln(t/t_1) + \ln(t_1/\tau_\varepsilon)). \quad (9)$$

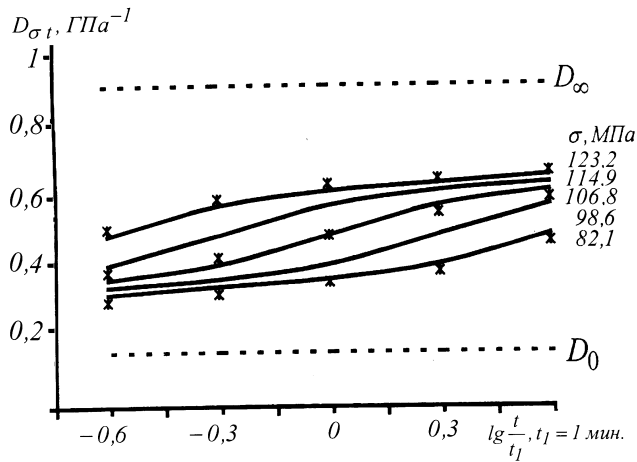


Рисунок 3 -Пример "семейства" податливости капроновой нити КН-91 (линии - экспериментальные значения, * - прогнозируемые значения)

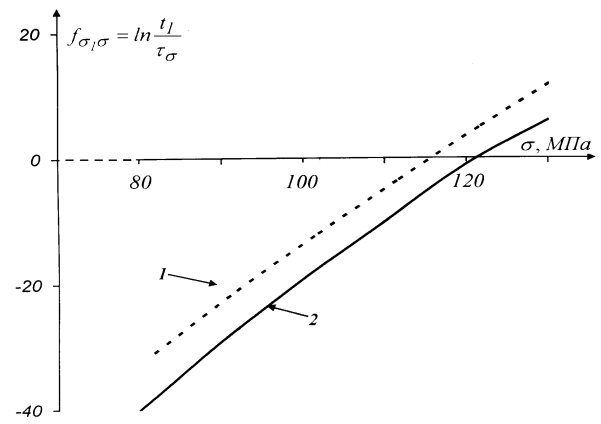


Рисунок 4 - Пример графиков функций времен запаздывания капроновых нитей КН-91 (кривая 1) и КН-187 (кривая 2)

Аналогично, для деформационного процесса это:

- асимптотические значения податливости D_0 и D_∞ (рис. 3):

$$D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_{\sigma t}, \quad (10)$$

$$D_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\sigma t}, \quad (11)$$

- структурный параметр A_σ характеризующий скорость прохождения деформационного процесса полимерных текстильных материалов;

- функция времен запаздывания $f_{\sigma t} = \ln(t_1/\tau_\sigma)$ (рис.4), характеризующая сдвиги кривых "семейства" податливости вдоль логарифмическо-временной шкалы содержащиеся в структурно-сило-временном аргументе-функционале

$$W_{\sigma t} = 0,5 \cdot A_\sigma \cdot \ln(t/\tau_\sigma) = 0,5 \cdot A_\sigma \cdot (\ln(t/t_1) + \ln(t_1/\tau_\sigma)). \quad (12)$$

Другим достоинством предлагаемых математических релаксационного процесса (1) - (3) и деформационного процесса (4) - (6) полимерных текстильных материалов является то, что производные функций релаксации $\varphi_{\varepsilon t}$ и запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ рекуррентным образом выражаются через сами эти функции

$$\frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial W_{\varepsilon t}} = A_{\varepsilon} \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}), \quad (13)$$

$$\frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial W_{\sigma t}} = A_{\sigma} \cdot \varphi_{\sigma t} \cdot (1 - \varphi_{\sigma t}), \quad (14)$$

что упрощает аналитические преобразования.

Математические модели релаксационного процесса (1) - (3) и деформационного процесса (4) - (6) полимерных текстильных материалов с нормированной функцией в виде гиперболического тангенса (3), (6) имеют преимущество перед другими известными математическими моделями при прогнозировании быстротекущих релаксационных деформационных процессов.

Данное обстоятельство вытекает из достаточно быстрой сходимости модуля релаксации и податливости к своим асимптотическим значениям по сравнению с другими применяемыми математическими моделями и подтверждено сравнением с экспериментальными данными.

В **третьей главе** рассмотрено численное прогнозирование релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Указанное прогнозирование осуществляется на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_{\infty}) \cdot \int_0^t \varepsilon_{\theta} \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta - \quad (15)$$

для релаксационного процесса и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_{\infty} - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_{\theta} \cdot \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta - \quad (16)$$

для деформационного процесса.

При этом, в качестве интегрального ядра релаксации выбирается производная функции (3):

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \left(1 - th^2(W_{\varepsilon t})\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (17)$$

а в качестве интегрального ядра запаздывания выбирается производная функции (6):

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

Разработанные методы вычисления нелинейно-наследственных интегралов (15), (16) на основе математических моделей с функцией гиперболический тангенс и соответствующее программное обеспечение опробованы на различных видах релаксационных и деформационных процессов. Близость расчетных точек к экспериментальным значениям наблюдается для большинства рассмотренных материалов.

В **четвертой главе** рассмотрены методы проверки адекватности математических моделей деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Следует заметить, что выбор нормированной функции для математических моделей эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов осложняется тем, что нельзя априорно отдать предпочтение какой-то из них.

Основным критерием для отбора служит эксперимент. Наличие нескольких нормированных функций для моделирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов позволяет сделать более правильный выбор и, тем самым, повысить надежность прогнозирования.

Предложены также критерии проверки адекватности математических моделей релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Разработанные критерии наиболее адекватного выбора математических моделей релаксационного и деформационного процессов можно использовать для цифрового определения наилучших (с точки зрения точности математического моделирования релаксационных и деформационных процессов) нормированных релаксационных и деформационных функций.

Величины относительных отклонений расчетных точек значений модуля релаксации и податливости, полученных прогнозированием на основе соответствующих математических моделей релаксационного процесса (1) - (3) и деформационного процесса (4) - (6) полимерных текстильных материалов, и нанесенных на графики экспериментальных семейств кривых модуля релаксации (рис. 1) и податливости (рис. 3) составляют не более 10%, что подтверждает правильный выбор нормированной функции гиперболический тангенс в качестве основы для математического моделирования эксплуатационных свойств рассматриваемых материалов, а также адекватность построения математических моделей релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Таким образом, использование нормированной функции гиперболический тангенс в качестве основы математических моделей релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов, позволяет с достаточной степенью точности моделировать эксплуатационные свойства полимерных текстильных материалов.

Аналитическое задание функции гиперболический тангенс и принадлежность ее к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования и облегчает с нахождение релаксационных и деформационных характеристик изучаемых полимерных текстильных материалов.

Пятая глава посвящена практическому применению математического моделирования к исследованиям эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов.

Разработка методов математического моделирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов на основе функции гиперболический тангенс получила дальнейшее развитие в виде программного продукта, позволяющего компьютеризировать и упростить вычисления.

Для упрощения практического применения разработанных математических моделей релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов было разработано соответствующее программное обеспечение и программы для ЭВМ.

- "Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612848 от 01.03.2018.

- "Проведение сравнительного анализа релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612704 от 22.02.2018.

- "Расчет параметров математических моделей деформационных процессов технических тканей". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663557 от 26.06.2023.

- "Расчет параметров математических моделей вязкоупругих процессов технических тканей". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663584 от 26.06.2023.

Свидетельства на разработанное программное обеспечение приведены на рис. 5.



Рисунок 5 - Свидетельства на разработанные программы для ЭВМ

Компьютерные программы по прогнозированию эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов объединены с программами по определению их релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик, а также по сравнительному анализу эксплуатационных свойств указанных материалов в рамках единого программного продукта, снабжённого необходимым интерфейсом.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные математические модели релаксационных и деформационных процессов, адаптированные к конкретным полимерным текстильным материалам с большой степенью точности моделируют указанные процессы.

2. Разработанные методы цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов позволяют осуществить указанное прогнозирование и являются средством для подтверждения адекватности проведенного математического моделирования этих процессов.

3. Разработанные методы компьютерного определения релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров полимерных текстильных материалов, а также методы цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов позволяют проводить сравнительный анализ эксплуатационных свойств указанных материалов, имеющий существенное значение для повышения их конкурентоспособности и решении проблемы импортозамещения продукции.

4. Разработанное программное обеспечение по расчету параметров математических моделей процессов релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов и по численному прогнозированию указанных процессов, объединенное общим интерфейсом в единый комплекс программ,

позволяет проводить качественную оценку эксплуатационных свойств изучаемых материалов.

5. Разработанные в диссертации методы математического моделирования, численного прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов и их сравнительной оценки опробованы на большой группе указанных материалов с положительным эффектом, что позволяет считать их универсальными и рекомендовать для проведения аналогичных исследований других групп полимерных текстильных материалов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ" по специальности 2.6.17. Материаловедение

1. Переборова Н.В., Климова Н.С., Чистякова Е.С., Зурахов В.С., Зурахова Т.А. Моделирование сложных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. Т. 37. № 3. С. 26-33.

2. Переборова Н.В., Максимова Н.А., Чистякова Е.С. Вариант логистической модели склада изделий текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2018. № 1. С. 113-116.

3. A.V. Demidov, N.V. Pereborova, A.A. Makarova, E.S. Chistyakova. Development of a Method for Taking into Account the Influence of Temperature in Predicting Complex Deformation Processes of Polymeric Textile Materials // Fibre Chemistry, 2020, v. 52, № 4, pp. 279-282.

русский вариант: Демидов А.В., Переборова Н.В., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Разработка метода учета влияния температуры при прогнозировании сложных деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2020. № 4. С. 47 - 49.

4. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Коробовцева А.А., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Математическое моделирование и качественный анализ деформационных и восстановительных процессов полимерных текстильных эластомеров, применяемых в хирургической имплантологии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6 (390). С. 196-201.

5. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Вариант оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных нитей // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 2. С. 44-47.

6. Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Чистякова Е.С. Вопросы проектирования текстильных материалов медицинского назначения // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 3. С. 20-24.

7. Вагнер В.И., Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Чистякова Е.С. Компьютерное моделирование вязкоупругости ориентированных полимерных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология, 2023. № 3. С. 118-123.

8. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Климова Н.С., Томашевич Я.С. Определение степени достоверности цифрового прогнозирования эксплуатационных режимов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. Т. 64. № 6. С. 35-38.

Другие публикации

9. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Чистякова Е.С., Вагнер В.И. Варианты компьютерного прогнозирования деформационных процессов технического текстиля // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2018. № 1. С. 109-119.

10. Козлов А.А., Овсянников Д.А., Терушкина О.Б., Бусыгин К.Н., Чистякова Е.С. Разработка методов системного анализа для исследования функциональных свойств полиамидных тканей для парашютостроения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2018. № 1. С. 39-49.

11. Переборова Н.В., Егорова М.А., Абрамова И.В., Чистякова Е.С. Методы проведения качественной оценки деформационных и восстановительных свойств медицинских текстильных эластомеров на стадии их производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 2. С. 17-27.

12. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С. Методы системного анализа деформационных свойств геотекстильных нетканых полотен для оценки их функционально-эксплуатационных свойств // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 2. С. 54-65.

13. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С. Вариант моделирования спектра релаксации аморфного полимерного материала // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 5. С. 79-91.

14. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Чалова Е.И. Компьютерное прогнозирование эксплуатационных процессов текстильных материалов при организации их производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 5. С. 27-37.

15. Буряк Е.А., Козлов А.А., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Прогнозирование процесса восстановления формы текстильных материалов на стадии организации производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 33-45.

16. Чистякова Е.С. Математическое моделирование эластических и восстановительных свойств полиэфирных нитей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2023. № 4. С. 14-18.

17. Чистякова Е.С. Методы математического моделирование и численного прогнозирования деформационных процессов арамидных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2023. № 4. С. 95-99.

18. Вагнер В.И., Разумеев К.Э., Коновалов А.С., Чистякова Е.С. Математическое моделирование и цифровое прогнозирование механических процессов текстильных полимеров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2023. № 3. С. 10-15.

19. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Литвинов А.М., Пушкарь Д.В. Исследование сложных релаксационно-деформационных процессов полиамидных тканей для парашютостроения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2024. № 2. С. 134-140.

20. Чистякова Е.С. математическое моделирование вязкоупругости морских полимерных канатов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2024. № 2. С. 146-151.

21. Переборова Н.В., Чистякова Е.С. Моделирование, прогнозирование и системный анализ деформационных свойств арамидных текстильных материалов сложного строения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2024. № 3. С. 17-21.

22. Литвинов А.М., Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Пушкарь Д.В. Цифровое прогнозирование вязкоупругости полимерных морских канатов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2024. № 4. С. 5-11.

Выступления на конференциях

23. Колодин А.А., Павличенко Д.В., Чистякова Е.С., Матюшин Н.С., Пантелеев Я.А., Степанов Р.О. Научный руководитель: Переборова Н.В. Компьютерное моделирование деформационных процессов арамидных материалов//Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2017. С. 9-11.

24. Козлов А.А., Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Антонова И.А., Переборова Н.В. Математическое моделирование физико-механических свойств полимерных текстильных материалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2018. С. 19-20.

25. Козлов А.А., Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Переборова Н.В. Компьютерное прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2018. С. 20-21.

26. Козлов А.А., Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Антонова И.А., Переборова Н.В. Критерии достоверности математического моделирования и компьютерного прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2018. С. 21-22.

27. Егоров И.М., Бусыгин К.Н., Чистякова Е.С. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование деформационных процессов морских полимерных канатов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2020. С. 20-21.

28. Егоров И.М., Бусыгин К.Н., Чистякова Е.С. Разработка методов системного анализа деформационных свойств морских полимерных канатов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых. СПб.: СПбГУПТД, 2020. С. 21-22.

29. Чистяков А.С., Чистякова Е.С. Модели нарушителя безопасности персональных данных // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов

Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: СПбГУПТД, 2023. С. 61-62.

30. Чистякова Е.С., Переборова Н.В. Методы цифрового моделирования физико-механических процессов арамидных материалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: СПбГУПТД, 2024. С. 11-13.

31. Чистякова Е.С., Переборова Н.В. Спектральное моделирование полимерных текстильных материалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: СПбГУПТД, 2024. С. 20-22.

32. Чистякова Е.С., Киселев С.В. Спектральный анализ релаксационных процессов полимерных текстильных материалов // Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах. Тезисы докладов V Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 68-70.

33. Чистякова Е.С., Переборова Н.В. Разработка методологии проведения качественной оценки деформационных процессов полимерных текстильных материалов, применяемых в парашютостроении // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: СПбГУПТД, Часть 1, 2025. С. 45-46.

34. Чистякова Е.С., Переборова Н.В. Методы спектрального моделирования полимерных текстильных наноматериалов // Инновации молодежной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. СПб.: СПбГУПТД, Часть 1, 2025. С. 19-21.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

35. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Климова Н.С. Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612848 от 01.03.2018.

36. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Климова Н.С. Проведение сравнительного анализа релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612704 от 22.02.2018.

37. Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Чистяков А.С. Расчет параметров математических моделей деформационных процессов технических тканей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663557 от 26.06.2023.

38. Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Чистяков А.С. Расчет параметров математических моделей вязкоупругих процессов технических тканей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663584 от 26.06.2023.