

На правах рукописи

Евдокимов Владислав Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность:
2.6.17. Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

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:

Гречухин Александр Павлович,
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромской государственный университет" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, ведущий научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности

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 автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Защита диссертации состоится 24 ноября 2026 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 437.

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

Автореферат разослан ____ октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.385.06
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы обоснована необходимостью прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов, имеющей определяющее значение при разработке и создании новых материалов. Расширение областей применения и условий эксплуатации арамидных текстильных материалов требует все более подробного исследования их функциональных свойств. Такие исследования целесообразно проводить на основе современных цифровых технологий, позволяющих моделировать и прогнозировать различные функциональные свойства.

На изучаемые функциональные свойства арамидных текстильных материалов могут оказывать влияние различные факторы, основными из которых являются: температурные воздействия, влажность, кислотность среды, уровни и длительности механических воздействий и т.д. Арамидные текстильные материалы выгодно отличаются от большинства других полимерных материалов достаточно большой деформационной жесткостью и устойчивостью к влиянию некоторых агрессивных сред.

Для проведения сравнительного анализа и исследования функциональных свойств арамидных текстильных материалов необходимы разработки математических моделей указанных свойств. Особую важность при этом имеет задача прогнозирования функциональных свойств в условиях их повседневной эксплуатации.

Создание новых перспективных арамидных текстильных материалов заданной функциональности обосновывает необходимость разработки новых математических моделей функциональных свойств этих материалов, а также применение для исследования указанных свойств цифровых технологий и современных методов обработки информации.

Работа выполнялась аспирантом в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2026-0003 на тему: «Разработка научных основ и методологии математического моделирования, цифрового прогнозирования и качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств полимерных материалов технического, двойного и медицинского назначения в условиях переменной температуры» под руководством научного руководителя аспиранта (в 2022 – 2026 гг.).

Степень разработанности темы исследования. Применение цифровых технологий при моделировании и прогнозировании функциональных свойств арамидных текстильных материалов является важной задачей. Проведение количественной и качественной оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов является достаточно трудоемкой задачей, так как предполагается не только исследование указанных свойств этих материалов, но и их математическое моделирование, а также последующее цифровое прогнозирование.

Исследованиями в данном направлении в настоящее время активно занимаются д.т.н., проф. Демидов А.В., д.т.н., проф. Макаров А.Г., д.т.н., проф. Переборова Н.В., к.т.н., доц. Егорова М.А., к.т.н., доц. Вагнер В.И., к.т.н., доц. Егоров И.М., к.т.н., доц. Козлов А.А., к.т.н., доц. Киселев С.В.

Цель работы состоит в разработке комплекса методов исследования и цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования и современных информационных технологий.

Основными **задачами** исследования являются:

- математическое моделирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов;

- разработка методов цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка методов системного анализа для оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- проведение сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Методология и методы исследования. Теоретическую и методологическую основу исследования составляют современные и классические представления и положения, известные в материаловедении полимеров. Используются также закономерности и законы физики, физико-химии полимеров, механики и термодинамики. Применяются также современные информационные технологии и методы математики (численные методы, интегро-дифференциальные уравнения и др.).

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 ... структурах.

3. Разработка научных основ выбора ... неметаллических ... материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям ... эксплуатации ... изделий.

4. Разработка ... физико-механических процессов формирования новых ... неметаллических ... материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, ...эксплуатационными и технологическими свойствами.

5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения ... неметаллических ... 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 ... материалов.

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

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

Научная новизна работы состоит:

- в разработке математической модели функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- в разработке цифровых методов прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- в разработке компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- в разработке методов системного анализа для оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе компьютерного цифрового прогнозирования;
- проведение сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что

разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие осуществлять:

- цифровое прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- системный анализ по оценке функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- сравнительный анализ функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Материалы диссертации использованы в учебном процессе на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД, в научных исследованиях лаборатории информационных технологий СПбГУПТД, а также при курсовом и дипломном проектировании.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработанные методы цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- разработанные на основе информационных технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработанные методы системного анализа по оценке функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе компьютерного прогнозирования;
- разработанные методы сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и методики выявления зависимостей этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Степень достоверности результатов. Методы математического моделирования и цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов были внедрены в ЗАО «САЛЮТ» и в ООО «ПКФ «Петро-Васт», где подтвердили свою полную работоспособность. По результатам применения указанных методов получены практические рекомендации по проектированию арамидных текстильных материалов с заданными функциональными свойствами.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, в том числе, на Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием "Инновации молодежной науки", Санкт-Петербург, 2023 - 2026 гг., на Международной научной конференции «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» Санкт-Петербург, 2026 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, среди которых 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для опубликования материалов диссертаций по специальности 2.6.17 - Материаловедение, 8 свидетельств на государственную регистрацию программ для ЭВМ в Роспатенте.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (169 наименований) и 2 приложений. Основное содержание диссертации изложено на 171 странице машинописного текста, иллюстрировано 36 рисунками и содержит 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности развиваемого научного направления, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В основе исследования функциональных свойств арамидных текстильных материалов лежит математическое моделирование и численное прогнозирование этих свойств на основе данных краткосрочного эксперимента. Цифровое прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов основано на применении информационных технологий с использованием численных методов.

В **первой главе** приводится обзор литературы по тематике диссертационного исследования. Описаны известные способы математического моделирования функциональных свойств полимерных материалов, к классу которых относятся арамидные текстильные материалы.

Одно из направлений исследования функциональных свойств арамидных текстильных материалов, проводимых в лаборатории информационных технологий СПбГУПТД, основано на графической и функциональной аппроксимации экспериментально полученных значений различными нормированными функциями, среди которых особую ценность представляют такие аппроксимации с использованием функции нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), близкой по своим значениям к интегральной функции нормального распределения, но являющейся аналитической. Это заметно облегчает аналитические интегро-дифференциальные преобразования в рамках математического моделирования. Преимущество указанной аппроксимации посредством функции НАЛ особенно проявляется при моделировании функциональных свойств полимерных материалов сложной макроструктуры, к которым следует отнести арамидные текстильные материалы. Следует при этом заметить, что аналитическая функция НАЛ является интегральной функцией вероятностного распределения Коши, обладающего свойством аддитивности, то есть распределение суммы вероятностных величин, каждая из которых распределена по закону Коши, также распределена по этому закону. Актуальность такого моделирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов объясняется тем, что они представляют собой объекты сложной макроструктуры (нити состоят из волокон, ткани из нитей и т.д.). Поэтому математическая модель, разработанная для описания функциональных свойств более простых объектов, например, таких, как волокна, будет годиться и для описания функциональных свойств нитей, тканей и т.д. Математическим моделированием функциональных свойств полимерных материалов в различные годы в СПбГУПТД занимались: д.т.н., проф. Демидов А.В., д.т.н., проф. Макаров А.Г., д.т.н., проф. Переборова Н.В., к.т.н., доц. Егорова М.А., к.т.н., доц. Вагнер В.И., к.т.н., доц. Егоров И.М., к.т.н., доц. Козлов А.А., к.т.н., доц. Киселев С.В.

Во **второй главе** приведено описание исследуемых арамидных текстильных материалов, отличающихся различными техническими характеристиками. В качестве объектов исследования были выбраны:

- арамидные текстильные нити, технические характеристики приведены в табл. 1;
- арамидные бронезащитные ткани, изготовленные из СВМ (табл. 2);
- арамидные огнезащитные ткани (табл.3);
- арамидные шнуры (табл. 4).

Для получения прочностных показателей арамидных текстильных материалов применялись диаграммы растяжения. На рис. 1 приведены диаграммы растяжения нити СВМ, полученные для различных значений температуры (от 20⁰С до 300⁰С).

Таблица 1 - Технические характеристики арамидных текстильных нитей

Материал	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н	Удлинение при разрыве, %	Разрывное напряжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Терлон	58,5	87	2,7	2,1	98
Русар	58,8	134	3,1	3,3	115
СВМ	29,5	65	2,6	3,2	105
Арселон	79,1	137	4,0	2,7	81
Армос	67,3	129	2,2	2,2	92

Таблица 2 - Технические характеристики бронезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Состав
			основа	уток	основа	уток	
ТБ-130	105	130	2,6	2,6	2,0	2,0	СВМ
ТБ-190	105	190	2,8	2,8	2,0	2,0	СВМ
ТБ-220	100	220	2,9	2,9	2,1	2,1	СВМ

Таблица 3 - Технические характеристики огнезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Состав
			основа	уток	основа	уток	
ТО-265	96	265,0	3,1	2,5	20,0	20,0	терлон
ТО-240	96	240,0	2,5	1,7	7,0	4,0	арселон
ТО-125	104	125,0	1,0	0,8	4,0	4,0	армос

Таблица 4 - Технические характеристики арамидных шнуров

Название	Диаметр, мм	Линейная плотность, ктекс	Разрывная нагрузка, кН	Удлинение при разрыве, %	Состав
ШТ-4	5	34,2	15,1	4,0	терон
ШР-3	3	19,6	5,8	3,9	русар
ШС-6	6	41,3	21,4	4,1	СВМ

Как видно из рис. 1, с ростом температуры от 20⁰С до 300 ⁰С, значения деформационной жесткости, разрывной деформации и разрывного напряжения арамидной текстильной нити СВМ уменьшаются.

На рис. 2 приведены зависимости прочности и модуля упругости арамидной текстильной нити СВМ 29,5 Текс от температуры.

Как видно из рис. 2, с ростом температуры от 20⁰С до 300 ⁰С значения прочности и модуля упругости арамидной текстильной нити СВМ уменьшаются.

В третьей главе рассмотрено математическое моделирование основных функциональных процессов арамидных текстильных материалов. В качестве основных функциональных процессов указанных материалов традиционно выбраны релаксационный процесс, характеризующийся изменением приложенного напряжения (силовой нагрузки) во времени в зависимости от значения деформации, и деформационный процесс (ползучесть), характеризующийся изменением приложенной деформации во времени в зависимости от значения напряжения.

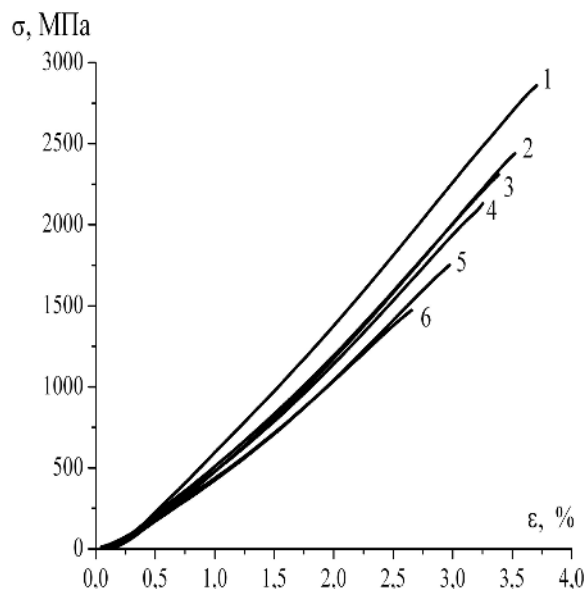


Рисунок 1 - Диаграмма растяжения нити СВМ при скорости растяжения $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, для разных температур $T = 20(1), 100(2), 150(3), 200(4), 250(5), 300(6) \text{ } ^\circ\text{C}$

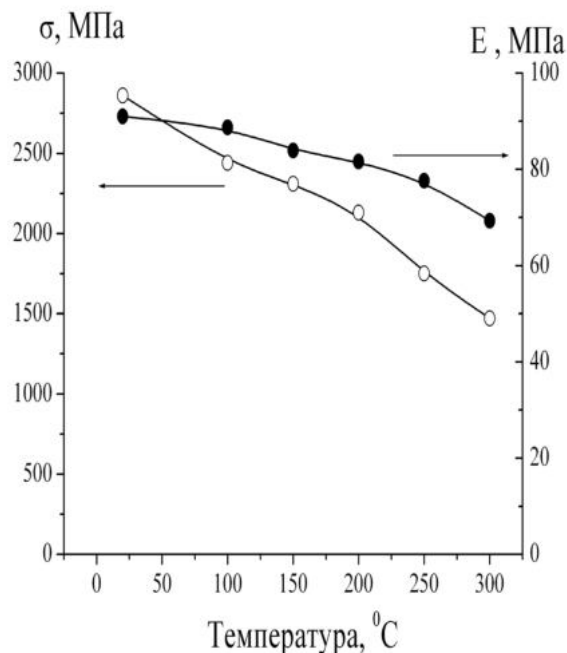


Рисунок 2 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити СВМ от температуры $T = 20(1), 100(2), 150(3), 200(4), 250(5), 300(6) \text{ } ^\circ\text{C}$

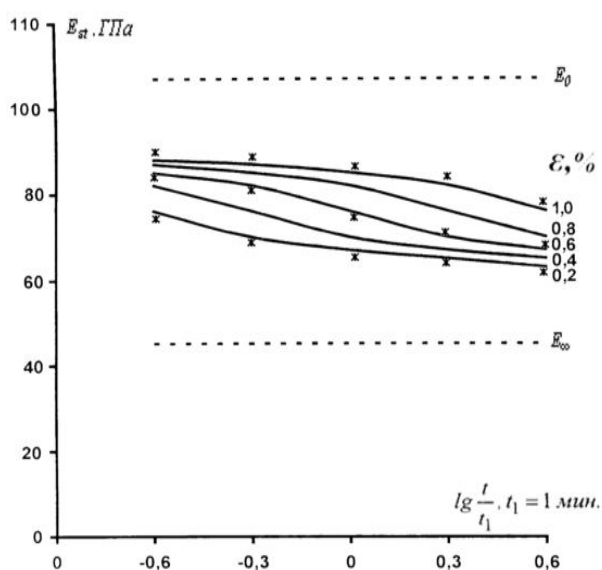


Рисунок 3 - "Семейство" кривых модуля релаксации нити СВМ при температуре $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (сплошные линии - эксперимент, звездочки – цифровое прогнозирование)

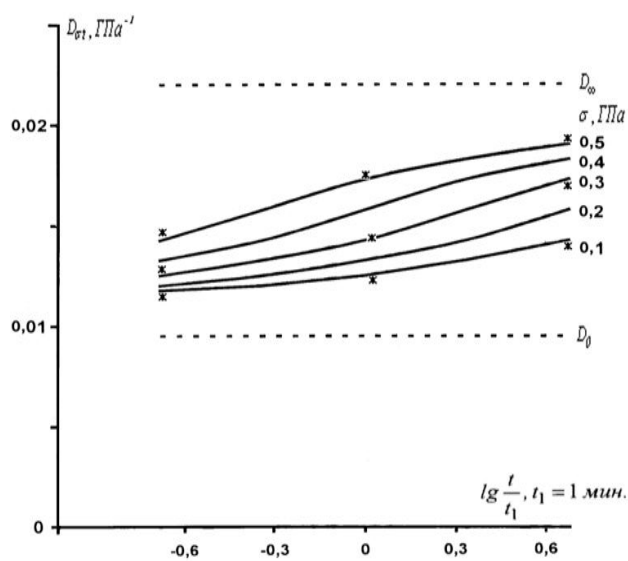


Рисунок 4 - "Семейство" кривых податливости нити СВМ при температуре $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ (сплошные линии - эксперимент, звездочки - цифровое прогнозирование)

Математическое моделирование указанных функциональных процессов релаксационного, ползучести и восстановительного арамидных текстильных материалов проводилось на основе аппроксимации функцией НАЛ, применяемой в виде функции релаксации:

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

«семейства» модуля релаксации (рис. 3) для процесса релаксации и в на основе аппроксимации функцией НАЛ, применяемой в виде функции запаздывания:

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

«семейства» податливости (рис. 4) для ползучести и восстановительного процесса.

Процессы ползучести и восстановительные процессы являются частными случаями деформационных процессов и моделируются по одним тем же формулам.

С учетом сказанного, математические модели релаксации (3) и ползучести (4) имеют вид

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \cdot \varphi_{\varepsilon t}, \quad , \quad (3)$$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad , \quad (4)$$

где t - время, $1/b_{n\varepsilon}$ - параметр интенсивности процесса релаксации, $1/b_{n\sigma}$ - параметр интенсивности деформационного процесса ползучести, τ_{ε} - время релаксации (время за которое проходит половина процесса релаксации при величине деформации ε), τ_{σ} - время запаздывания (время за которое проходит половина деформационного процесса при величине напряжения σ), $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$ - модуль релаксации, E_0 - модуль упругости, E_{∞} - модуль вязкоупругости, $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$ - податливость, D_0 - начальная податливость, D_{∞} - предельная равновесная податливость, ε - деформация, σ - напряжение.

Достоинством, не вызывающим сомнения, математических моделей (1) - (4) является то, что они содержат наименьшее из возможных число параметров, имеющих конкретный физический смысл:

- E_0 , E_{∞} , D_0 , D_{∞} - асимптотические предельные значения модуля релаксации и податливости:

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_{\varepsilon t}, \quad E_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} E_{\varepsilon t}, \quad D_0 = \lim_{t \rightarrow 0} D_{\sigma t}, \quad D_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{\sigma t}; \quad (5)$$

- параметры макроструктуры материалов $b_{n\varepsilon}$ и $b_{n\sigma}$ характеризуют скорости прохождения релаксационного процесса и деформационного процесса соответственно: эти параметры могут быть отождествлены с логарифмом времени "полурелаксации" (половина релаксационного процесса при заданной деформации ε проходит во временном интервале $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_{\varepsilon}) = -b_{n\varepsilon}$, $\ln(t''/\tau_{\varepsilon}) = b_{n\varepsilon}$) и с логарифмом времени "полузапаздывания" (половина деформационного процесса при заданном напряжении σ проходит во временном интервале $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_{\sigma}) = -b_{n\sigma}$, $\ln(t''/\tau_{\sigma}) = b_{n\sigma}$);

- функции времен релаксации $f_{\varepsilon t} = \ln(t/\tau_{\varepsilon})$ и времен запаздывания $f_{\sigma t} = \ln(t/\tau_{\sigma})$ могут быть отождествлены со сдвигами "семейств" кривых релаксации и кривых ползучести вдоль временной логарифмической шкалы; эти сдвиги содержатся в структурно-деформационно-временном аргументе-функционале

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_l} \right) + \ln \left(\frac{t_l}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right) \quad (6)$$

и в структурно-сило-временном аргументе-функционале

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_l} \right) + \ln \left(\frac{t_l}{\tau_{\sigma}} \right) \right). \quad (7)$$

Использование функции НАЛ в качестве основы для математического моделирования релаксационного и деформационного процессов, позволяет с большой степенью точности (5-10 %) прогнозировать физико-механические свойства изучаемых арамидных текстильных материалов.

В четвертой главе приведены методы цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов арамидных текстильных материалов на основе общеупотребительных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра (8) - в случае релаксационного процесса и (9) - в случае деформационного процесса

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta, \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta, \quad (9)$$

с интегральными ядрами (8) - для прогнозирования релаксационных свойств и (9) - для прогнозирования деформационных свойств соответственно с использованием НАЛ:

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t}, \quad (10)$$

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

Преимущество применения функции НАЛ в качестве основы математической модели при цифровом прогнозировании функциональных свойств арамидных текстильных материалов позволяет значительно (на 50 - 60 %) расширить область такого прогнозирования, что подтверждено сравнением прогнозных значений напряжения и деформации с данными эксперимента (рис. 3, рис. 4).

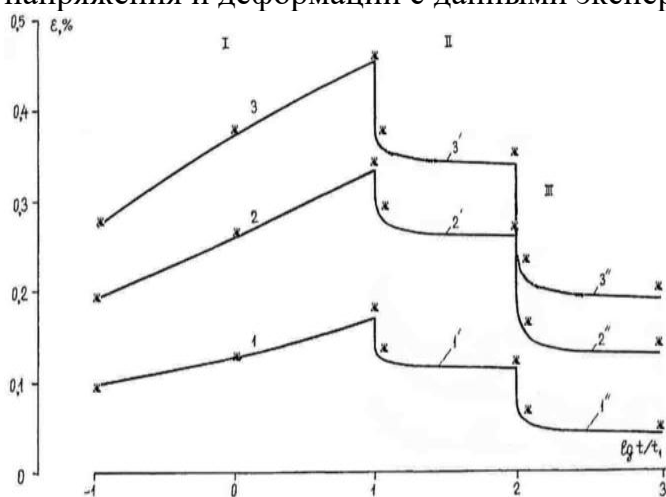


Рисунок 5 - Деформационно-восстановительный процесс нити СВМ

I - деформационный процесс,
II - восстановительный процесс после снятия половинной нагрузки,
III - восстановительный процесс после снятия полной нагрузки
(напряжения: 100 МПа (1), 200 МПа (2), 300 МПа (3); 50 МПа (1'), 100 МПа (2'), 150 МПа (3'); 0 МПа (1''), 0 МПа (2''), 0 МПа (3''); $t_1 = 1$ мин., "звездочки" - цифровое прогнозирование).

Для повышения точности прогнозирования применялись методы вычисления несобственных нелинейно-наследственных интегралов, основанные на неравномерном разбиении временной шкалы с учетом специфики рассматриваемого процесса:

- при прогнозировании активных (быстропротекающих) деформационных, восстановительных или релаксационных процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования или нагружения, временная шкала разбивалась в возрастающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования или нагружения в начале процесса;

- при прогнозировании длительных деформационных, восстановительных или релаксационных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования или нагружения, временная шкала разбивалась в убывающей геометрической прогрессии - для лучшего учета длительных воздействий деформации или нагрузки.

Разработанные методы цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов могут быть применимы к любым релаксационным процессам, процессам ползучести и восстановления, включая такие сложные процессы, как процесс обратной релаксации и деформационно-восстановительный процесс (рис. 5), характеризующиеся переменными значениями приложенной деформации и нагрузки соответственно.

В пятой главе приведены методы проведения системного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов, разработанные на основе информационных технологий, а также результаты проведения качественной сравнительной оценки указанных свойств этих материалов.

При разработке методов определения вязкоупругих параметров-характеристик учитывалось, что ключевой задачей является задача определения времён релаксации и запаздывания. Однако, в отличие от определения других вязкоупругих параметров-характеристик, например, таких как время жизни нагруженного материала, разрывной деформации и разрывного напряжения, которые можно произвести экспериментальным путем, времена релаксации и запаздывания не подлежат экспериментальному определению в силу своей природы. Тем самым, задачи определения времен релаксации и запаздывания относятся к задачам математической физики, в отличие от приведенных примеров, которые относятся к задачам экспериментальной физики.

Знание вязкоупругих характеристики арамидных текстильных материалов помогают осуществить наилучший выбор материала, обладающего определенными деформационными свойствами.

Параметры интенсивности процессов релаксации и ползучести приведены в табл.5. По ним можно определить насколько быстро проходят процессы релаксации и ползучести того или иного материала.

Из табл.5 видно, что наиболее быстро проходят процессы релаксации и ползучести у бронезащитных и огнезащитных тканей - у них наблюдаются самые маленькие значения параметров интенсивности (чем больше значение параметра интенсивности - тем медленнее процесс).

Таблица 5 - Расчетные характеристики интенсивности процессов релаксации ($b_{n\varepsilon}$) и ползучести ($b_{n\sigma}$) арамидных текстильных материалов

Материал	Интенсивность релаксации	Интенсивность ползучести
aramидные нити		
Терлон	8,14	5,91
Русар	11,4	7,92
СВМ	9,32	6,74
бронезащитные ткани		
ТБ-130	3,38	2,29
ТБ-190	2,91	1,93
ТБ-220	2,76	1,86
огнезащитные ткани		
ТО-265	2,31	1,59
ТО-240	3,17	2,09
ТО-125	2,94	1,87
aramидные шнуры		
ШТ-4	4,53	3,17
ШР-3	6,42	4,37
ШС-6	7,28	4,92

Самые медленные процессы релаксации и ползучести наблюдаются у арамидных нитей, у которых самые большие значения параметров интенсивности.

Зная асимптотические значения модуля релаксации и податливости можно ответить на вопрос, насколько полно проходят процессы релаксации и ползучести.

Коэффициент степени релаксации определяется по формуле:

$$k_{\text{рел.}} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} \cdot 100 \%, \quad (12)$$

а коэффициент степени ползучести, соответственно равен

$$k_{\text{полз.}} = \frac{D_\infty - D_0}{D_\infty} \cdot 100 \%. \quad (13)$$

Чем больше значение коэффициентов степени релаксации и ползучести, тем выше способность материала соответственно к релаксации и ползучести.

В табл.6 приведены асимптотические значения модуля релаксации и ползучести, а также коэффициенты степени релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов.

Из табл.6 видно, что наиболее полно - на три четверти - проходят процессы релаксации и ползучести у бронезащитных и огнезащитных тканей. У арамидных же нитей эти процессы проходят лишь наполовину.

У арамидных шнуров процессы релаксации и ползучести проходят на две третьих.

Применение разработанных методик определения параметров релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов на практике заметно упрощается благодаря автоматизации вычислений с помощью соответствующего программного обеспечения.

Таблица 6 - Расчетные асимптотические значения модуля релаксации и податливости, коэффициенты степени релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов

Материал	E_0 , ГПа	E_∞ , ГПа	$k_{\text{рел.}}$, %	D_0 , ГПа ⁻¹	D_∞ , ГПа ⁻¹	$k_{\text{полз.}}$, %
aramидные нити						
Терлон	98	47	52	0,010	0,021	52
Русар	115	54	53	0,0087	0,019	54
СВМ	105	48	54	0,0095	0,021	55
бронезащитные ткани						
ТБ-130	76	21	72	0,013	0,048	73
ТБ-190	68	17	75	0,015	0,059	75
ТБ-220	71	19	73	0,014	0,053	74
огнезащитные ткани						
ТО-265	63	18	71	0,016	0,056	71
ТО-240	54	14	74	0,019	0,071	73
ТО-125	59	15	75	0,017	0,067	75
aramидные шнуры						
ШТ-4	77	26	66	0,013	0,038	66
ШР-3	80	28	65	0,013	0,036	64
ШС-6	73	23	68	0,014	0,043	67

Проведенный сравнительный анализ функциональных свойств арамидных текстильных материалов выявил зависимость указанных свойств этих материалов от линейной плотности и от компонентного состава. Например, сравнивая образцы арамидных шнуров с одинаковым типом переплетения нитей и одного диаметра, но различные по компонентному составу, мы видим почти двукратное увеличение коэффициентов структуры $b_{n\epsilon}$ и $b_{n\sigma}$. В данном случае на релаксационный и деформационные процессы оказывают влияние удвоение линейной плотности изучаемых материалов. То есть, увеличение линейной плотности арамидных текстильных материалов приводит к замедлению релаксационного и деформационного

процессов этих материалов.

Примером использования разработанных методов системного и сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов является решение задачи о влиянии диаметра арамидного шнура на его деформационно-функциональные свойства. При уменьшении диаметров шнуров, одного компонентного состава наблюдается уменьшение параметров интенсивности $b_{n\epsilon}$ и $b_{n\sigma}$, то есть прохождение релаксационных и деформационных процессов ускоряется.

Разработанные математические модели и методы цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов находят свое применение в научных исследованиях и в учебных целях. Полученные в диссертации результаты включены в аспирантские курсы лекций, разработанные алгоритмы и программы для ЭВМ включены в лабораторные практикумы магистрантов и аспирантов.



Рисунок 6
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для ЭВМ
№ 2026680897

Рисунок 7
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для ЭВМ
№ 2026680901

Рисунок 8
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для
ЭВМ № 2026616484

Рисунок 9
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для
ЭВМ № 2026616485



Рисунок 10
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для ЭВМ
№ 2026680445

Рисунок 11
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для ЭВМ
№ 2026667644

Рисунок 12
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для
ЭВМ № 2026667321

Рисунок 13
Свидетельство
о государственной
регистрации
программы для
ЭВМ № 2026680449

По результатам проведенных исследований были разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ:

- "Моделирование деформационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";

- "Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
 - "Моделирование восстановительных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
 - "Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
 - "Качественная оценка восстановительных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов в условиях переменной температуры";
 - "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов медицинского назначения в условиях переменной температуры";
 - "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры";
 - "Качественная оценка восстановительных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры",
- свидетельства на государственную регистрацию которых приведены на рис. 6 - рис. 13.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные математические модели эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов на основе функции НАЛ является основой для дальнейшего цифрового прогнозирования указанных свойств изучаемых материалов.
2. Разработанные на основе математического моделирования эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов цифровые методы прогнозирования указанных свойств этих материалов позволяют с достаточной степенью точности проводить оценку функциональности различных арамидных материалов.
3. Разработанные на основе цифровых технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для проведения системного анализа указанных свойств изучаемых материалов.
4. Разработанные методы системного анализа эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для целенаправленного отбора образцов изучаемых материалов и проведения сравнительного анализа их функциональности.
5. Разработанные методы проведения сравнительного анализа функциональности арамидных текстильных материалов позволяют получать рекомендации по проектированию новых материалов, обладающих заданными эксплуатационными свойствами, а также выявлять зависимость этих свойств от компонентного состава.
6. Разработанные в диссертации математические модели эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов и методы цифрового прогнозирования этих свойств являются достаточно универсальными и могут быть применены для оценки функциональности других полимерных материалов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ" по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

1. Вагнер В.И., Евдокимов В.В., Чуркин К.С., Колодин А.А. Энергетическая оценка деформационных процессов полимерных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2023 - 3, с. 5-8.
2. Киселев С.В., Евдокимов В.В.. Математическое моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов //

Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2025, № 6, с. 83-86.

3. Евдокимов В.В. Системный анализ деформационно-восстановительных процессов арамидных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2025, № 6, с. 44-47.

4. Евдокимов В.В., Переборова Н.В. Вариант оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных нитей // Дизайн. Материалы. Технология - 2026, № 2, с. 104-109.

5. Переборова Н.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Расчет упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации полимерных текстильных материалов // Химические волокна, 2026, № 3, с. 47-51.

Другие публикации

6. Макаров А.Г., Евдокимов В.В., Чуркин К.С., Рыжов Ф.С., Добрякова М.Г., Матвеев В.С. Релаксационные процессы полимерных материалов с позиции спектральной теории // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2023, № 2, с. 88-92.

7. Киселев С.В., Козлов А.А., Евдокимов В.В. Моделирование ползучести геотекстильных нетканых материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 1, с. 5-8.

8. Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Компоненты деформации геотекстильных нетканых материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 1, с. 40-43.

9. Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Математическое моделирование и автоматизированный расчет эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии, 2026, № 2, с. 5-9.

10. Переборова Н.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Разложение на компоненты полной деформации полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии, 2026, №2, с. 108-112.

11. Егорова М.А., Евдокимов В.В. Разработка методов математического моделирования и расчета эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 2, с. 58-63.

12. Егоров И.М. Евдокимов В.В. Метод разложения полной деформации полимерных текстильных материалов на составные компоненты // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, №2, с. 72-76.

13. Переборова Н.В., Евдокимов В.В. Методология математического моделирования ползучести полимерных текстильных нитей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, №2, с. 91-95.

14. Евдокимов В.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, №3, с. 27-31.

15. Макаров А.Г., Евдокимов В.В. Цифровое прогнозирование деформационных процессов полимерных материалов // Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 23-24.

16. Евдокимов В.В. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных текстильных материалов // Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 25-27.

17. Переборова Н.В., Евдокимов В.В. Разложение деформации полимерных материалов на упругую и вязкоупругую составляющую // Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 27-28.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

18. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Качественная оценка восстановительных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667321. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.06.2026.

19. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов медицинского назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667644. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.06.2026.

20. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680445. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.07.2026.

21. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Качественная оценка восстановительных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680449. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.07.2026.

22. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680897. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.

23. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680901. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.07.2026.

24. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование восстановительных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616484. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.

25. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616485. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.