

На правах рукописи

Бусыгин Константин Николаевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АРАМИДНЫХ  
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАДИИ ОРГАНИЗАЦИИ ИХ  
ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность:

05.02.22 - организация производства  
(текстильная и легкая промышленность)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2022

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, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", зав. каф. 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 имени А.Ф.Можайского», 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 13 сентября 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 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 \_\_ августа 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07  
доктор технических наук, доцент

Переборова Нина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** диссертационной работы обоснована необходимостью изучения функциональных свойств арамидных текстильных материалов, близких к условиям их эксплуатации. Расширение областей применения и условий эксплуатации арамидных текстильных материалов требует более качественного исследования их физико-механических и физико-химических свойств. Такие исследования целесообразно проводить на основе современных информационных технологий, позволяющих моделировать и прогнозировать различные физико-механические и физико-химические функционально-эксплуатационные свойства.

На изучаемые физико-механические и физико-химические свойства арамидных текстильных материалов могут оказывать как позитивное, так и негативное влияние различные факторы. Среди них основными являются: температурные воздействия, влажность, кислотность среды, уровни и длительности механических воздействий и т.д. Арамидные материалы выгодно отличаются от большинства других полимерных материалов достаточно большой жесткостью и устойчивостью к влиянию некоторых агрессивных сред.

Для сравнительного анализа и исследования физико-механических и физико-химических свойств арамидных текстильных материалов необходимо произвести разработки адекватных математических моделей на основе физически обоснованного аналитического описания их свойств. Заметим, что изучение физико-механических и физико-химических свойств арамидных текстильных материалов, проявляющихся в условиях эксплуатации, гораздо сложнее, чем измерение их внешних технических характеристик, которые не дают полноценную объективную картину физико-механических и физико-химических свойств материала. Особую важность при этом имеет задача прогнозирования указанных свойств при условии их повседневной эксплуатации.

Появление новых арамидных текстильных материалов и изделий на их основе обосновывает разработку новых математических моделей физико-механических и физико-химических свойств этих материалов, а также применение для исследования их свойств информационных технологий и современных методов обработки информации.

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 20-38-90007 на тему: "Применение информационных технологий при моделировании и прогнозировании функциональных свойств арамидных текстильных материалов двойного назначения".

**Степень разработанности темы исследования.** Применение информационных 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 свойств указанных материалов, но и их моделирование и последующее прогнозирование.

Исследованиями в данном направлении в настоящее время активно занимаются д.т.н. Демидов А.В., д.т.н. Макаров А.Г., д.т.н. Переборова Н.В. и др.

**Цель работы** состоит в разработке комплекса методов исследования и 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 прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка методов системного анализа для оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе компьютерного прогнозирования;
- проведение сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от структурных характеристик и 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 Паспорту специальности.** Работа выполнялась в рамках Паспорта специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям) и соответствует его следующим пунктам:

2. Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов в организацию производственных процессов.
3. Разработка методов и средств информатизации и компьютеризации производственных процессов на всех стадиях.
4. Моделирование и оптимизация производственных процессов. Экспертные системы в организации производственных процессов.
5. Повышение качества и конкурентоспособности продукции, системы контроля качества и сертификации продукции.
10. Разработка методов и средств мониторинга производственных и сопутствующих процессов.
11. Разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

**Научная новизна** работы состоит:

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

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие осуществлять:

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

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

**Положения, выносимые на защиту:**

- разработанная математическая модель функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработанные методы численного прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- разработанные на основе информационных технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по 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 структурных характеристик и компонентного состава указанных материалов.

**Степень достоверности результатов.** Методики проведения системного и сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов были опробованы в ООО "СЕВЕРНЫЙ ТЕКСТИЛЬ " и подтвердили свою полную работоспособность. По результатам применения указанных методик были даны практические рекомендации по разработке новых образцов арамидных текстильных материалов, обладающих требуемыми функциональными свойствами.

**Апробация результатов исследования.** Результаты работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: международной конференции "Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов", Санкт-Петербург, 2016, 2018 гг., Всероссийской научной конференции молодых ученых "Инновации молодежной науки", Санкт-Петербург, 2016-2021 гг.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 31 печатная работа, среди которых 10 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для опубликования материалов диссертаций по специальности 05.02.22 - Организация производства (текстильная и легкая промышленность).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (235 наименований) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 170 страницах машинописного текста, иллюстрировано 34 рисунками и содержит 12 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. Численное 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., к.т.н., доц. Переборова Н.В., к.т.н., доц. Егорова М.А., к.т.н., доц. Вагнер В.И., к.т.н., доц. Васильева Е.К., к.т.н., доц. Шванкин А.М., к.т.н., доц. Каланчук О.Э., к.т.н., доц. Федорова С.В., к.т.н., доц. Киселев С.В., к.т.н., доц. Терушкина О.Б., к.т.н., доц. Зурахов В.С., к.т.н., доц. Кобякова Ю.В.

Во **второй главе** приведено описание исследуемых арамидных текстильных материалов, отличающихся различными техническими характеристиками. В табл. 1 приведен компонентный состав изучаемых материалов. При этом приведены не только арамидные материалы, производимые в настоящее время, но и производимые в недавнем прошлом. Такая ретроспектива арамидных текстильных материалов позволяет получить наиболее репрезентативную линейку этих материалов,

отличающихся друг от друга различной структурой, компонентным составом и функциональными свойствами, что повышает ценность проведенного исследования.

В качестве объектов исследования были выбраны не только арамидные нити, технические характеристики которых приведены в табл. 2, но и арамидные бронезащитные ткани, изготовленные из кевлара (табл. 3), арамидные огнезащитные ткани (табл.4), арамидные шнуры (табл. 5).

Таблица 1 - Компонентный состав арамидных текстильных материалов

Марка	Компонентный состав	Производитель
Технора	со-поли-парафенилен3,4оксидифенелен терефталамид	Нидерланды, Teijin Twaron
Тварон	поли-пара-фенилентерефталамид	Нидерланды, Teijin Twaron
Кевлар	поли-пара-фенилентерефталамид	США, Du Pont De Nermour
Терлон	сополимеры с содержанием сомономеров (5-15)%, близкие к поли-пара-фенилентерефталамиду	Россия, ВНИИПВ
Русар	гетероциклический парасополиамид	ОАО «Каменскхимволокно»
СВМ	ароматический сополиамид на основе полиамидо-безимидазола (из гетероциклического парадиамида и терефталилхлорида)	Россия, ВНИИПВ, АО НИИхимволокно (СПб), ОАО «Тверьхимволокно», ОАО «Каменскхимволокно»
Арселон	поли-пара-фенилен-1,3,4-оксидиазола	Беларусь, Гомельской обл., РУП «Светлогорское ПО «Химволокно»
Армос	ароматический пара-сополиамид на основе полидобезимидазола из (35-45) % мол. гетероциклического парадиамина, (5-15)% мол. парафенилендиамина и 50 % мол. терефталилхлорида	Россия, ВНИИПВ, ОАО «Тверьхимволокно»

Таблица 2 - Технические характеристики арамидных нитей

Материал	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н	Удлинение при разрыве, %	Разрывное напряжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Технора	110	217	4,0	2,7	81
Тварон	120	226	2,6	2,6	122
Кевлар 49	130	199	2,2	2,2	109
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

Таблица 3 - Технические характеристики бронезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м <sup>2</sup>	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Состав
			основа	уток	основа	уток	
ТБ-130	105	130	2,6	2,6	4,0	4,0	кевлар
ТБ-190	105	190	3,4	2,9	4,0	3,0	кевлар
ТБ-350	100	350	6,4	6,4	4,0	4,0	кевлар

Таблица 4 - Технические характеристики огнезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м <sup>2</sup>	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 5 - 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	тварон
ШР-3	3	19,6	5,8	3,9	русар
ШС-6	6	41,3	21,4	4,1	СВМ
ШК-5	10	74,1	72,3	4,4	кевлар

Таблица 6 - Интегральные работы сорбции и десорбции воды арамидными текстильными материалами

Волокно	a <sub>0</sub>	W <sub>0</sub>	E <sub>c</sub>	E <sub>d</sub>	A <sub>i</sub> <sup>c</sup>	A <sub>i</sub> <sup>d</sup>	A <sub>i</sub> <sup>d</sup> /A <sub>i</sub> <sup>c</sup>
	моль/г		Дж/моль		Дж/г		
Армос	5,7	8,7	1180	2750	8,5	19,8	2,33
Кевлар	4,4	4,6	1690	1950	9,4	10,8	1,15
Тварон	4,9	4,9	1610	1930	10,0	12,0	1,20
Капрон	5,5	5,9	1190	1390	6,5	7,6	1,17

В главе приведены также исследования основных физико-химических свойств изучаемых арамидных текстильных материалов.

Было выяснено, что при десорбции происходит молекулярная усадка арамидных текстильных материалов, приводящая к снижению сегментальной подвижности звеньев макромолекул, и возрастает упорядоченность структуры макромолекул, которая должна соответствовать исходной структуре полимера. Подобные явления происходят при сорбции воды волокнообразующими полимерами, на основе которых получены волокна армос, кевлар, тварон. Из них только армос имеет мезоморфную жидкокристаллическую структуру, остальные являются ориентированными частично кристаллическими полимерами.

Волокна кевлар и тварон сорбируют воду в аморфных областях полимера. В результате сорбции происходит пластификация аморфных областей, структура кристаллитов при этом не изменяется. Процесс десорбции связан с обратным переходом из пластифицированного состояния в стеклообразное, что сопровождается гистерезисом сорбции, как и в других полимерных материалах.

В третьей главе приводится описание построения математической модели физико-механических свойств арамидных текстильных материалов. В качестве основных физико-механических 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. Указанные два процесса - релаксационный и деформационный - являются основополагающими процессами в теории вязкоупругости полимеров.

Математическое моделирование двух указанных процессов релаксационного и деформационного арамидных текстильных материалов проводилось на основе функции НАЛ, применяемой в виде функции релаксации

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

для процесса релаксации и в виде функции запаздывания

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

для деформационного процесса.

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

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

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

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

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

-  $E_0$ ,  $E_{\infty}$ ,  $D_0$ ,  $D_{\infty}$  - 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  $\varepsilon$  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  $\sigma$  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  $f_{\varepsilon t} = \ln(t_1/\tau_\varepsilon)$  и времен запаздывания  $f_{\sigma t} = \ln(t_1/\tau_\sigma)$  могут быть отождествлены со сдвигами "семейств" кривых релаксации и кривых ползучести вдоль временной логарифмической шкалы; эти сдвиги содержатся в структурно-деформационно-временном аргументе-функционале

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad (6)$$

и в структурно-сило-временном аргументе-функционале

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

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 численного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов 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 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.

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.

Проведенный сравнительный анализ функциональных свойств арамидных текстильных материалов выявил зависимость макроструктуры этих материалов от геометрических характеристик, линейной плотности, типа переплетения нитей в тканях и шнурах, а также компонентного состава на указанные функциональные свойства. 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  $b_{n\varepsilon}$  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.

Практическим 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  $b_{n\varepsilon}$  и  $b_{n\sigma}$ , то есть прохождение релаксационных и деформационных процессов ускорятся.

По результатам проведенных исследований были разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ: «Моделирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов», «Оценка функциональных свойств арамидных текстильных материалов», «Прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов», свидетельства на государственную регистрацию которых приведены на рис. 1 – рис. 3.



Рисунок 1 - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666316 от 08.12.2020 «Моделирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов»

Рисунок 2 - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666317 от 08.12.2020 «Оценка функциональных свойств арамидных текстильных материалов»

Рисунок 3 - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666318 от 08.12.2020 «Прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов»

Разработанные математические модели и методы численного 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.

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработанная математическая модель функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе функции НАЛ является основой для дальнейшего численного прогнозирования указанных свойств изучаемых материалов.

2. Разработанные на основе математического моделирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов численные методы прогнозирования указанных свойств этих материалов позволяют с достаточной степенью точности проводить оценку функциональности различных арамидных материалов независимо от сложности их макроструктуры.

3. Разработанные на основе информационных технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для проведения системного анализа указанных свойств изучаемых материалов.

4. Разработанные методы системного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для целенаправленного отбора образцов изучаемых материалов и проведения сравнительного анализа их функциональности.

5. Разработанные методы проведения сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов позволяют получать рекомендации по отбору имеющихся и проектированию новых материалов, обладающих заданными функциональными свойствами, а также выявлять зависимость этих свойств от структурных характеристик и компонентного состава арамидных текстильных материалов.

6. Разработанные в диссертации математические модели функциональных свойств арамидных текстильных материалов и методы 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"**

1. Бусыгин К.Н., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Киселев С.В. Оптимальная математическая модель деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения//Химические волокна, 2020, № 4, с. 78-80.

англ.вар.: K.N. Busygin, A.G. Makarov, N.V. Pereborova, S.V. Kiselev. Optimal Mathematical Model of Deformation: Operational Processes in Polymer Textile Materials for Technical Purposes// Fibre Chemistry, v. 52, № 4, pp. 313-316. (Web of Science, Scopus)

2. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Чалова Е.И., Разумеев К.Э. Методы моделирования и прогнозирования деформационных режимов эксплуатации

геотекстильных нетканых материалов//Химические волокна, 2022, № 2, с. 45-48.

англ. вар.: Pereborova N.V., Makarov A.G., Busygin K.N., Chalova E.I., Razumeev K.E. Methods for modeling and predicting deformation modes of operation of geotextile nonwoven materials// Fibre Chemistry, 2022, Vol. 54, No. 2. (Web of Science, Scopus)

3. Егоров И.М., Киселев С.В., Бусыгин К.Н. Спектральный анализ деформационных и восстановительных режимов эксплуатации полимерных нетканых материалов//Химические волокна, 2022, , № 2, с. 72-74.

англ. вар.: Egorov I.M., Kiselev S.V., Busygin K.N. Spectral analysis of deformation and recovery modes of operation of polymeric nonwoven materials// Fibre Chemistry, 2022, Vol. 54, No. 2. (Web of Science, Scopus).

4. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Овсянников Д.А. Моделирование эксплуатационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. - 2022. - № 1, с. 11-18.

5. Жиженов В.В., Квачадзе Н.Г., Гребенников С.Ф., Бусыгин, К.Н., Смотрина Т.В., Смотрин В.А. Образование структур жидкокристаллического типа в полипараамидах// Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2017. Т. 59. № 2. С. 156-164. (Web of Science, Scopus).

англ. яз.: Zhizhenkov V.V., Kvachadze N.G., Grebennikov S.F., Busygin K.N., Smotrina T.V., Smotrin V.A. Formation of liquid-crystalline-type structures in polyaramides//Polymer Science. Series A. 2017. Т. 59. № 2. С. 198-205. (Web of Science, Scopus)

6. Смотрина Т.В., Гребенников С.Ф., Бусыгин К.Н., Смотрин В.А., Жиженов В.В., Квачадзе Н.Г. // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2017. Т. 59. № 2. С. 165-173.

англ. яз.: Smotrina T.V., Grebennikov S.F., Busygin K.N., Smotrin V.A., Zhizhenkov V.V., Kvachadze N.G. Destruction of liquid-crystalline structures in paraaramides polymers during swelling in water //Polymer Science. Series A. 2017. Т. 59. № 2. С. 206-214. (Web of Science, Scopus).

7. Sashina E.S., Kashirskii D.A., Busygin K.N. Dissolution of cellulose with pyridinium-based ionic liquids: effect of chemical structure and interaction mechanism //Cellulose Chemistry and Technology. 2016. Т. 50. № 2. С. 199-211. (Web of Science, Scopus)/

8. Гребенников С.Ф., Цобкалло Е.С., Лебедева Н.П., Бусыгин К.Н., Мачалаба Н.Н., Стожаров В.М. Структурные аспекты термодинамики и механики взаимодействия арамидных волокон с водой // Химия волокон. 2015. № 6. С. 41-47.

англ. яз.: Grebennikov S.F., Tsobkallo E.S., Lebedeva N.P., Busygin K.N., Machalaba N.N., Stozharov V.M. Structural aspects of the thermodynamics and mechanics of interaction between aramid fibers and water //Fibre Chemistry. 2015. Т. 46. № 6. С. 349-356.

9. Бусыгин К.Н., Гребенников С.Ф., Каширский Д.А., Челышев А.М. Прогнозирование свойств полимерных материалов, подвергаемых влажно-тепловой нагрузке //Химия волокон. 2015. № 4. С. 52-58.

англ. яз.: Busygin K.N., Grebennikov S.F., Kashirskii D.A., Chelyshev A.M. Predicting the properties of polymeric materials exposed to moisture and thermal loading //Fibre Chemistry. 2015. Т. 47. № 4. С. 329-336.

10. Гребенников С.Ф., Лебедева Н.П., Бусыгин К.Н. Коэффициенты активности

нозкомолекулярного компонента в набухающих полимерах // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2015. Т. 57. № 5. С. 383-389.

англ. яз.: Grebennikov S.F., Lebedeva N.P., Busygin K.N. Activity coefficients of the low-molecular-mass components in swelling polymers //Polymer science. Series A. P. 501 – 507. (Web of Science, Scopus).

### **Прочие публикации**

10. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Чалова Е.И., Бусыгин К.Н. Спектральный анализ деформационных и восстановительных свойств нетканых материалов// Дизайн. Материалы. Технология, 2021, № 4, с. 127-133.

11. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Бусыгин К.Н., Чалова Е.И. Системный анализ деформационных процессов арамидных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2021, № 4, с. 21-27.

12. Бусыгин К.Н., Истомина Е.В., Машкевская Т.Н., Романов А.А., Мемедляев Э.А. Разработка математических моделей функциональных процессов арамидных текстильных материалов //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. - 2021. - № 1, с. 33-43.

13. Бусыгин К.Н., Истомина Е.В., Машкевская Т.Н., Романов А.А., Мемедляев Э.А. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных текстильных материалов // Всероссийская конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки", 2021, с. 15-16.

14. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н. Разложение полной деформации полимерных текстильных материалов на составные компоненты // Всероссийская конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки", 2021, с. 20-21.

15. Переборова Н.В., Чалова Е.И., Бусыгин К.Н. Моделирование и прогнозирование деформационных свойств полимерных текстильных материалов // II Международная научная конференция "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах", СПб., 2021, с. 113-116.

16. Макаров А.Г., Киселев С.В., Зурахов В.С., Бусыгин К.Н. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование усадочных и восстановительных свойств арамидных текстильных материалов //Дизайн. Материалы. Технология. 2020. № 4 (60). С. 119-125.

17. Макаров А.Г., Киселев С.В., Зурахов В.С., Бусыгин К.Н. Разработка методов математического моделирования и качественного анализа деформационно-эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2020. № 4. С. 7-16.

18. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н. Качественная оценка эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов – основа улучшения их функциональности //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 133-143.

19. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н. Системный анализ функциональных свойств арамидных материалов специального назначения //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 84-94.

20. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Киселев С.В., Зурахов В.С. Моделирование и прогнозирование деформационных свойств термостойких арамидных материалов //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 4. С. 79-89.

21. Бусыгин К.Н., Макаров А.Г., Киселев С.В., Козлов А.А. Исследование и сравнительный анализ деформационных свойств горно- и пожароспасательных арамидных шнуров //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 4. С. 90-100.

22. Чалова Е.И., Мусиенко К.Н., Бусыгин К.Н., Терушкина О.Б., Воронина О.С., Переборова Н.В. Исследование функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов на основе моделирования их вязкоупругости //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 2. С. 89-100.

23. 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.

24. Гребенников С.Ф., Лебедева Н.П., Бусыгин К.Н., Мачалаба Н.Н. Физико-химические свойства волокнообразующих параарамидных полимеров. Обзор. Часть 2. Твердые растворы низкомолекулярных веществ в полимерах// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. Т. 35. № 1. С. 84-90.

25. Лебедева Н.П., Гребенников С.Ф., Бусыгин К.Н., Мачалаба Н.Н., Москалюк О.А. Физико-химические свойства волокнообразующих параарамидных полимеров. Обзор. Часть 3. Влияние эксплуатационных факторов на деформационные свойства АПА //Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. Т. 36. № 2. С. 45-53.

26. Гребенников С.Ф., Лебедева Н.П., Бусыгин К.Н., Мачалаба Н.Н. Физико-химические свойства волокнообразующих параарамидных полимеров. Обзор. Часть 1. Структура и термические свойства // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 34. № 4. С. 34-41.

27. Смотрина Т.В., Бусыгин К.Н., Смотрин В.А., Жиженков В.В., Квачадзе Н.Г., Гребенников С.Ф., Зайцева Е.И. Молекулярное движение и структурные изменения в полипараарамидных волокнах при внешних воздействиях. Сообщение 2. Взаимодействие жидкокристаллических волокон с водой // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2016. № 2. С. 51-56.

28. Бусыгин К.Н., Гребенников С.Ф., Мачалаба Н.Н., Зайцева Е.И. Надмолекулярная структура высокомолекулярных волокон на основе полипараарамидов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2015. Т. 27. № 1. С. 46-50.

29. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Лёдов Д.С., Бусыгин К.Н., Коновалов А.С. Методология спектрального моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2015. Т. 30. № 4. С. 7-16.

24. Жиженков В.В., Смотрина Т.В., Бусыгин К.Н., Смотрин В.А., Квачадзе Н.Г., Зайцева Е.И., Гребенников С.Ф., Мачалаба Н.Н. Молекулярное движение и

структурные изменения в полипараарамидных волокнах при внешних воздействиях. Сообщение 1. Структурные аспекты термической и механической модификации волокон // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 47-52.

25. Бусыгин К.Н., Гребенников С.Ф., Обкалло Е.С., Лебедева Н.П., Мачалаба Н.Н. Взаимодействие воды с арамидными волокнами // Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение. 2015. № 21. С. 202-208.

26. Бусыгин К.Н., Гребенников С.Ф. Математическая модель прогнозирования механических свойств полимерных текстильных материалов при термовлажностных воздействиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2014. № 1. С. 48-52.

27. Гребенников С.Ф., Зайцева Е.И., Бусыгин К.Н. Термодинамика и механика полимерных материалов в сорбционно-активных средах // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2014. № 3. С. 26-29.

28. Бусыгин К.Н., Внучкин А.В. Математическое моделирование и оценка параметров термодинамической устойчивости полимерных систем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2012. № 3. С. 3-6.

29. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Переборова Н.В., Киселев С.В. Моделирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666316 от 08.12.2020.

30. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Переборова Н.В., Киселев С.В. Оценка функциональных свойств арамидных текстильных материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666317 от 08.12.2020.

31. Макаров А.Г., Бусыгин К.Н., Переборова Н.В., Киселев С.В. Прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666318 от 08.12.2020.

Оригинал подготовлен автором

Подписано в печать 29.06.2022. Печать трафаретная

Усл. печ. л. 0,9. Формат 60 x 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ 320.

Отпечатано в типографии СПбГУПТД

121028, г. Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26