

На правах рукописи

Шванкин Александр Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ
АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА
ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2017

Работа выполнена на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна"

Научный руководитель:

Переборова Нина Викторовна,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", доцент кафедры интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты:

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

Горшков Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», директор учебно-научного центра «Мониторинг и реабилитация природных систем»

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится 30 мая 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд.241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, <http://sutd.ru>.

Автореферат разослан апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07
доктор экономических наук, профессор

Титова Марина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В основе повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов лежат методы качественного анализа их эксплуатационно-деформационных свойств, внедряемые на стадиях разработки и производства указанных материалов.

Арамидные текстильные материалы находят все более широкое применение в различных областях техники. Из арамидных материалов, в частности, изготавливаются изделия альпинистского и горноспасательного назначения, одежда для защиты от пожаров, бронежилеты, средства спасения людей в шахтах, обмотки космических аппаратов и многое другое. В период продолжающихся международных санкций особо остро встает вопрос по созданию и развитию производств конкурентоспособных текстильных арамидных материалов, отвечающих задачам современного их использования. С целью повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов и изготавливаемых из них изделий, необходимо на стадии их разработки и производства всестороннее изучение эксплуатационно-деформационных и других физико-механических свойств. Такое изучение можно провести лишь на основе качественного анализа указанных свойств с использованием математического моделирования и компьютерного прогнозирования релаксационно-деформационных процессов указанных материалов, которые являются основополагающими в теории вязкоупругости полимеров, к группе которых относятся арамидные текстильные материалы.

Задача создания, исследования и совершенствования производств арамидных текстильных материалов различного назначения, обладающих определенными физико-механическими свойствами, соответствующих назначению этих материалов, несомненно, является актуальной, так как от решения этой задачи во многом зависит становление российской экономики, закрепление ее позиций на мировом уровне. Что же касается качества и функциональности отдельно взятых арамидных материалов, то зачастую от них зависят жизни людей: спортсменов-альпинистов, пожарных, военных и работников других многочисленных профессий. Арамидные текстильные материалы в виде шнуров и лент применяются, например, в горнодобывающих отраслях промышленности и в шахтах. Кроме этого, исследуемые материалы находят свое применение при спасении людей от пожаров и от различных стихийных бедствий.

Решение поставленных в диссертации задач соответствует "Стратегии развития легкой промышленности России на период до 2020 года", разработанной по поручению Президента РФ. Предлагаемые в диссертации способы повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов и продукции на их основе с использованием методов качественного анализа и математического моделирования их эксплуатационно-деформационных свойств, внедряемые в современные производства указанных материалов, позволят осуществить скорейший переход к импортозамещению продукции, так необходимой российской экономике. Решение поставленных задач позволит значительно повысить функциональность и потребность в производимой продукции, что также будет способствовать усилению экономической безопасности России.

Цель работы состоит в разработке методов повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов и изделий российского производства на основе внедрения инновационных методик оценки качества, эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов на стадии их разработки и производства.

Основными задачами исследования являются:

- построение математической модели деформационно-эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка методов определения деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов;
- качественная оценка эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий на основе параметров разработанной математической модели деформационно-эксплуатационных свойств;
- разработка методов прогнозирования деформационно-релаксационных процессов арамидных текстильных материалов, наилучшим образом соответствующих режимам эксплуатации указанных материалов;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационно-релаксационных процессов арамидных текстильных материалов, соответствующих режимам их эксплуатации;
- разработка методик сравнительного анализа эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий на стадии их проектирования и производства;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по проведению качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий;
- компьютерная реализация методик проведения сравнительного анализа эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий;
- практическая реализация на стадиях проектирования и производства российских текстильных арамидных материалов и изделий разработанных методов сравнительного анализа эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов с целью повышения конкурентоспособности создаваемой продукции.

Методы исследования. Основой теоретического и методологического исследования явились современные представления, положения и разработки, применяемые в экономике, математическом моделировании, текстильном материаловедении и системном анализе. В диссертации используются различные методы вычислительной математики, оптимизации, информатики и компьютерные технологии.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке методов повышения конкурентоспособности российских арамидных текстильных материалов и изделий на основе внедрения инновационных методик оценки качества, эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов;
- разработке математических моделей деформационно-релаксационных свойств арамидных текстильных материалов и изделий, наилучшим образом отражающих их функциональное назначение;
- разработке методов определения деформационно-релаксационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов и изделий, являющихся основой для оценки качества, эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов;
- разработке методов прогнозирования деформационно-релаксационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий, наиболее достоверно соответствующих режимам их эксплуатации;
- разработке методов проведения технологического отбора лучших арамидных

текстильных материалов и изделий по эксплуатационно-потребительскому и функциональному назначению с целью повышения конкурентоспособности разрабатываемой и производимой продукции;

- разработке методик выявления и оценки упругих, вязкоупругих и усадочных свойств арамидных текстильных материалов и изделий;

- компьютерной реализации методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий, являющейся основой для повышения конкурентоспособности проектируемой и производимой продукции.

Практическая значимость работы.

Для повышения конкурентоспособности российских арамидных текстильных материалов и изделий на их основе, а также решения актуальной задачи российской экономики по импортозамещению продукции, предлагается разработанные в диссертации методы качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов, а также методики проведения их технологического отбора применять на стадии проектирования и на стадии производства.

Разработанные методы определения релаксационно-деформационных параметров-характеристик и методы прогнозирования релаксационных и деформационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий служат практической основой для улучшения качества указанных материалов и повышения их конкурентоспособности.

Благодаря компьютеризации методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий появился действенный механизм их практического применения с целью оценки уровня потребительского соответствия, а также расширения функциональности и повышения качества исследуемых материалов.

Разработанные в диссертации методы качественной оценки эксплуатационно-потребительских свойств арамидных текстильных материалов и методики проведения их целенаправленного технологического отбора применялись в ЗАО "ТЕКСТИЛЬ-ИНВЕСТ" на стадии проектирования и производства текстильных изделий. По результатам внедрения предлагаемых методик были даны практические рекомендации по технологическому отбору образцов текстильных материалов, обладающих определенными релаксационными и деформационными характеристиками в зависимости от компонентного состава, структуры, линейной и поверхностной плотности указанных материалов с целью улучшению эксплуатационно-потребительских свойств и повышения функциональности выпускаемой текстильной продукции.

Компьютерные реализации методов определения релаксационно-деформационных параметров-характеристик и методов прогнозирования релаксационных и деформационных процессов текстильных материалов, предложенные в диссертационной работе послужили практической основой для улучшения качества указанных материалов и повышения их конкурентоспособности.

Благодаря компьютеризации методов проведения качественного анализа эксплуатационно-потребительских свойств текстильных материалов появился действенный механизм их практического применения с целью оценки степени соответствия и уровня качества исследуемых материалов задачам эксплуатации, что способствует решению актуальной задачи российской экономики по импортозамещению текстильной продукции в период продолжающихся международных санкций.

Апробация результатов работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались соискателем на международных и всероссийских научных конференциях: XI международной Санкт-Петербургской конференции молодых ученых "Современные проблемы науки о полимерах" (Санкт-Петербург, ноябрь 2015); II Международной научно-практической конференции "Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии: образование - наука - производство" (Казань, март 2016); Российской-американской научной школе-конференции "Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов" (Казань, май 2016); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Инновации молодежной науки" (Санкт-Петербург, апрель 2016).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 19 научных работ, из которых 6 - в ведущих рецензируемых научных изданиях из "Перечня ВАК".

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (193 наименования) и двух приложений. Основное содержание диссертации изложено на 155 страницах машинописного текста, иллюстрировано 32 рисунками и содержит 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности развивающегося научного направления по организации и совершенствованию производства арамидных текстильных материалов и изделий на основе внедрения передовых информационных технологий и методов качественного анализа эксплуатационно-потребительских свойств указанных материалов, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В основе разработки методов качественного анализа эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий лежит математическое моделирование и системный анализ их деформационно-релаксационных процессов с учетом экспериментальных данных. Большое разнообразие методов математического моделирования и системного анализа полимерных материалов, к классу которых относятся арамидные материалы, обусловлено их большим количеством и широким разнообразием структурных характеристик, влияющих существенным образом на их свойства. В силу этого постоянно разрабатываются новые математические модели и методы системного анализа физико-механических свойств полимерных материалов, максимально учитывающих специфику того или иного материала.

В **первой главе** излагаются современные представления о методах повышения конкурентоспособности текстильных материалов, в том числе, на основе современных инновационных технологий, включающих математическое моделирование их деформационно-эксплуатационных свойств и проведение сравнительного компьютерного анализа функционально-потребительских характеристик изучаемых материалов (Работнов Ю.Н., Ржаницин А.Р., Колтунов М.А.).

Как аппарат изучения эксплуатационно-деформационных свойств арамидных текстильных материалов технического назначения, проводится обзор известных методик исследования их деформационных свойств и традиционных способов прогнозирования вязкоупругих процессов указанных материалов (Сталевич А.М., Демидов А.В., Макаров А.Г.).

В главе рассматриваются также различные варианты механики вязкоупругости

полимеров, к классу которых относятся изучаемые арамидные текстильные материалы (Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Николаев С.Д., Щербаков В.П.).

Повышение конкурентоспособности материалов текстильной и легкой промышленности может быть осуществлено за счет внедрения инновационных технологий на основе компьютерного моделирования и последующего прогнозирования их эксплуатационно-потребительских свойств, главенствующую роль среди которых принадлежит вязкоупругим процессам релаксации и ползучести.

Во второй главе приведено техническое описание исследуемых арамидных текстильных материалов и изделий, как российского, так и зарубежного производства.

Технические характеристики изучаемых арамидных нитей приведены в табл. 1. Среди изучаемых арамидных нитей подобраны четыре российских образца (Русар, СВМ, Армос, Терлон) и три зарубежных (Тварон - Нидерланды, Кевлар - США, Технора - Япония).

Таблица 1 - Технические характеристики арамидных нитей ($T = 20^{\circ} \text{C}$)

Материал	Линейная плотность, текс	Удлинение при разрыве, %	Разрывное напряжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Производитель
Тварон	0,12	2,5	2,6	0,12	Нидерланды, Teijin Twaron
Кевлар	0,13	2,2	2,9	0,09	США, Du Pont De Nemour
Технора	0,11	3,5	2,7	0,08	Япония, Teijin
Русар	0,11	3,3	3,3	0,11	РФ, ОАО «Каменскволокно»
СВМ	0,08	2,6	2,4	0,11	РФ, ОАО «Тверьхимволокно»
Армос	0,09	3,1	2,8	0,10	РФ, ОАО «Тверьхимволокно»
Терлон	0,10	2,9	2,6	0,09	РФ, Мытищи, ГП ВНИИПВ

Таблица 2 - Технические характеристики бронезащитных тканей ($T = 20^{\circ} \text{C}$)

Название	Ширина, м	Поверхностная плотность, кг/м ²	Разрывное напряжение, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Состав
ТБК-1	1,0	0,13	2,6	4,0	кевлар
ТБК-2	1,0	0,19	3,4	4,0	кевлар
ТБК-3	1,0	0,35	6,4	4,0	кевлар
ТБС-1	0,8	0,17	2,9	4,1	СВМ
ТБС-2	0,8	0,22	3,7	3,9	СВМ
ТБС-3	0,8	0,29	4,9	3,8	СВМ

Таблица 3. Технические характеристики огнезащитных тканей ($T = 20^{\circ} \text{C}$)

Название	Ширина, м	Поверхностная плотность, кг/м ²	Разрывное напряжение, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Состав
ТОХ	1,0	0,17	1,9	7,9	технора
ТОР	0,96	0,26	3,1	7,6	терлон
ТОР	0,96	0,24	2,5	7,3	русар
ТОА	1,1	0,12	1,0	6,4	армос

Таблица 4 - Технические характеристики арамидных шнурков ($T = 20^{\circ} \text{C}$)

Название	Диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрывное напряжение, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Состав
ШТ	5	34	3,6	4,3	тварон
ШК	10	74	3,8	3,6	кевлар
ШС	6	41	4,4	4,1	СВМ
ШР	3	20	4,1	3,9	русар

В табл. 2 приведены технические характеристики бронезащитных тканей различной поверхностной плотности, применяемых для изготовления бронежилетов, как отечественного (СВМ), так и иностранного (Кевлар) производства.

В табл. 3 приведены технические характеристики огнезащитных тканей, применяемых для изготовления одежды работников пожарной охраны.

В табл. 4 приведены технические характеристики арамидных шнурков.

С целью качественной оценки деформационно-эксплуатационных характеристик изучаемых арамидных материалов, проводилось математическое моделирование их релаксационно-деформационных свойств на основе данных краткосрочного эксперимента в режимах:

- равномерного растяжения (на универсальной измерительно-силовой установке "Instron 1122");
- релаксации напряжения (на релаксометре напряжений);
- ползучести (на релаксометре деформаций).

Для учета влияния температуры на релаксационно-деформационные свойства, исследования проводились в режимах равномерного растяжения при различных значениях температуры: $T = 20, 100, 150, 200, 250, 300^{\circ}\text{C}$ со скоростями деформирования $\dot{\varepsilon} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (соответствующей удлинению образца на 10 % в минуту), $\dot{\varepsilon} = 8,33 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (соответствующей удлинению образца на 5 % в минуту) и $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (соответствующей удлинению образца на 2,5 % в минуту). На рис. 1 приведены графики диаграмм растяжения нити СВМ при различных температурах для скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

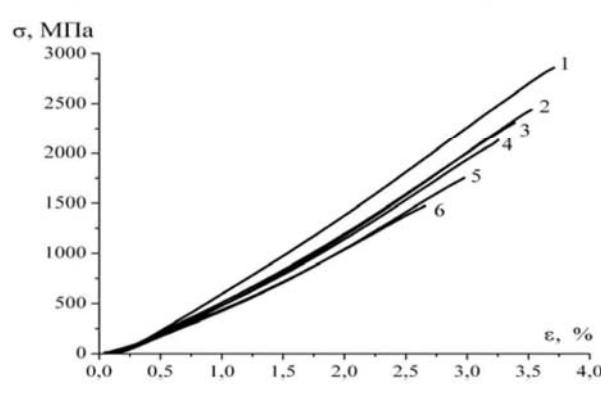


Рисунок 1 - Экспериментальные диаграммы растяжения нити СВМ при температурах 20 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5) и 300 °C (6)

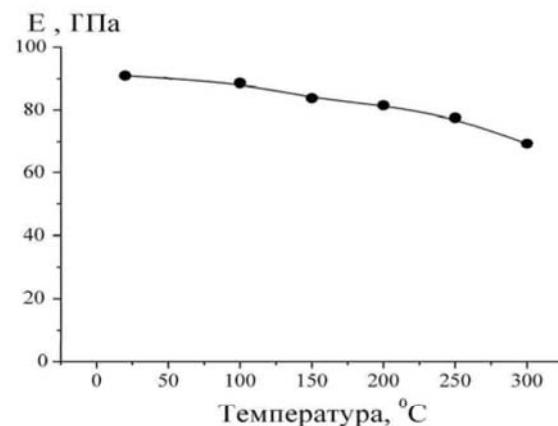


Рисунок 2 - Экспериментальная зависимость модуля упругости нити СВМ от температуры

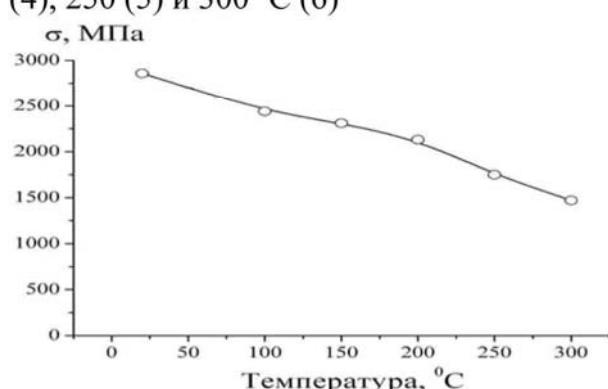


Рисунок 3 - Экспериментальная зависимость прочности при растяжении нити СВМ от температуры

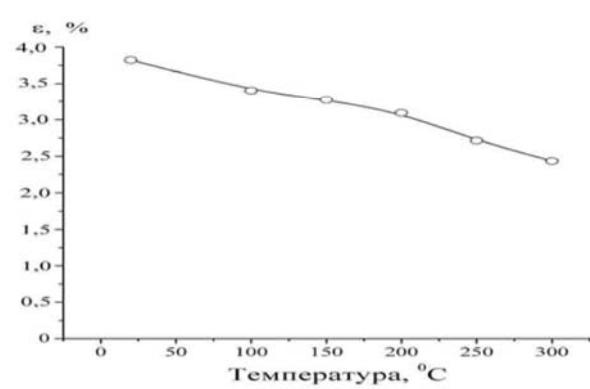


Рисунок 4 - Экспериментальная зависимость значений разрывных деформаций нити СВМ от температуры

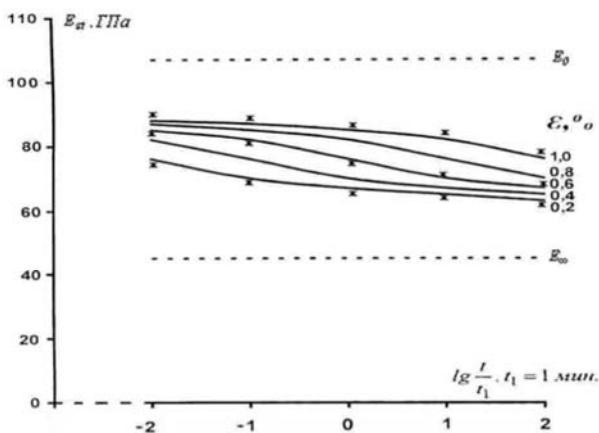


Рисунок 5 - "Семейство" значений модуля релаксации нити СВМ при температуре 20 °C (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

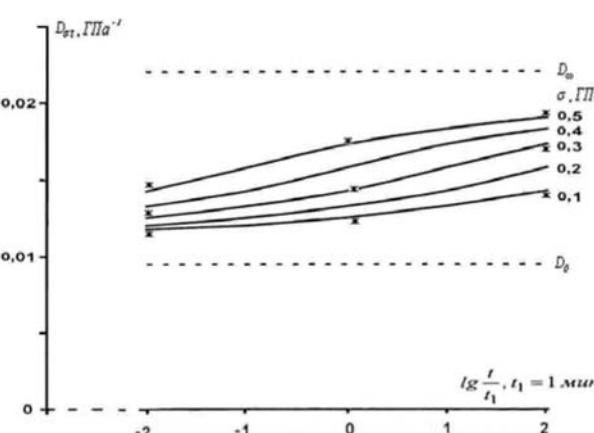


Рисунок 6 - "Семейство" значений податливости нити СВМ при температуре 20 °C (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

При анализе полученных диаграмм растяжения, были установлены зависимости от температуры значения модуля упругости (рис. 2), прочности при растяжении (рис. 3) и разрывной деформации (рис. 4) изучаемых материалов.

Результатом проведения экспериментальных исследований изучаемых материалов в режиме релаксации напряжения являются кривые "семейств" релаксации, которые, после деления экспериментально полученных значений напряжений σ на соответствующие значения выбранных деформаций ϵ , перестраиваются в "семейства" значений модуля релаксации $E_{et} = \sigma/\epsilon$. Один из примеров такого "семейства" для нити СВМ приведен на рис. 5.

Аналогично, результатом проведения экспериментальных исследований изучаемых материалов в режиме ползучести являются кривые "семейств" ползучести, которые, после деления экспериментально полученных значений деформации ϵ на соответствующие значения выбранных напряжений σ , перестраиваются в "семейства" значений податливости $D_{et} = \epsilon/\sigma$. Один из примеров такого "семейства" для нити СВМ приведен на рис. 6.

Математическое моделирование релаксации изучаемых арамидных материалов проводилось на основе принципа деформационно-временной аналогии с использованием для аппроксимации модуля релаксации

$$E_{et} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{et} \quad (1)$$

нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании релаксации текстильных материалов сложной макроструктуры, каковыми являются изучаемые материалы, изготовленные из арамидных нитей и волокон:

$$\varphi_{et} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{ne}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_e} \right). \quad (2)$$

Обоснованность выбора функции НАЛ заключается в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее тем важным свойством, что распределение суммы случайных величин, подчиняющихся закону Коши, также подчинено этому закону.

Текстильные объекты сложной макроструктуры типа арамидных лент, тканей и шнурков можно считать условно состоящими из "суммы" объектов простой макроструктуры - нитей (а сами нити - из волокон), поэтому математическое моделирование процесса релаксации напряжения для них желательно проводить на основе функции НАЛ.

Правильность выбора математической модели релаксации в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений модуля релаксации к соответствующим экспериментальным кривым. Расчетные значения модуля релаксации (рис. 5), вычисленные по математической модели (1), (2) нанесены на соответствующие экспериментальные графики.

Отличие предложенной математической модели релаксации от других известных математических моделей релаксации состоит в том, что времена релаксации τ_ε задаются в виде кусочно-линейной непрерывной функции, зависящей от значений приложенной деформации, что упрощает процесс прогнозирования, не влияя существенным образом на его точность.

Аналогично, математическое моделирование ползучести изучаемых текстильных материалов проводилось на основе принципа сило-временной аналогии с использованием для аппроксимации податливости

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

также нормированной функции НАЛ, которая в этом случае имеет вид:

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

Правильность выбора математической модели ползучести в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений податливости к соответствующим экспериментальным кривым. Расчетные значения податливости (рис. 6), вычисленные по математической модели (3), (4) нанесены на соответствующие экспериментальные графики.

Отличие предложенной математической модели ползучести от аналогичных известных математических моделей ползучести состоит в том, что времена запаздывания τ_σ задаются в виде кусочно-линейной непрерывной функции, зависящей от значений приложенного напряжения, что упрощает процесс прогнозирования, не влияя существенным образом на его точность.

В приведенных формулах (1) - (4) использованы следующие обозначения: t - время, $b_{n\varepsilon}$ - параметр интенсивности процесса релаксации, $b_{n\sigma}$ - параметр интенсивности процесса ползучести, τ_ε - время релаксации (время, за которое "отрелаксирует" половина всех "релаксирующих" частиц при величине деформации ε), τ_σ - время запаздывания (время, за которое осуществляется половина конформационных переходов "запаздывающих" частиц 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.

Необходимость проведения математического моделирования релаксационных процессов и процессов ползучести вызвана тем, что указанные процессы являются основополагающими в теории вязкоупругости полимерных материалов. На основе математического моделирования проводится в дальнейшем качественное исследование эксплуатационно-деформационных свойств изучаемых материалов, необходимое для разработки методов повышения качества и конкурентоспособности российских арамидных материалов и изделий. Рассмотрение в диссертации не только российских, но и зарубежных аналогов необходимо для того, чтобы иметь сравнительные образцы материалов и изделий, соответствующие принятым международным стандартам качества продукции.

В третьей главе рассмотрено прогнозирование сложных релаксационных и деформационных процессов арамидных материалов и изделий, которое является необходимым звеном для полноценной качественной оценки эксплуатационно-потребительских свойств указанных материалов. От того, каким образом будут проходить релаксационные и деформационные процессы арамидных материалов, зависят во многом их эксплуатационно-потребительские свойства. Без изучения этих процессов качественная картинка эксплуатационно-деформационных свойств указанных материалов была бы не полной.

Если простые релаксационные процессы (при постоянных значениях деформации $\varepsilon = \text{const}$) и простые процессы ползучести (при постоянных значениях напряжения $\sigma = \text{const}$) можно рассчитать на основе математических моделей релаксации (1), (2) и ползучести (3), (4) соответственно, то для расчета сложных релаксационных процессов (при меняющихся значениях деформации $\varepsilon \neq \text{const}$) и сложных процессов ползучести (при меняющихся значениях $\sigma \neq \text{const}$) необходимо учитывать наследственный принцип предыстории деформирования или нагружения.

Математическую модель релаксационного процесса с учетом принципа нелинейно-наследственного деформирования можно построить на основе интегрального соотношения Больцмана-Вольтерра

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon,t-\theta} d\theta, \quad (5)$$

где в интегральном ядре учтены деформационные вклады релаксирующих частиц в виде интегральной свертки.

Аналогично, математическую модель процесса ползучести с учетом принципа нелинейно-наследственного нагружения можно построить на основе интегрального соотношения Больцмана-Вольтерра

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma,t-\theta} d\theta, \quad (6)$$

где в интегральном ядре учтены силовые вклады запаздывающих частиц в виде интегральной свертки.

Уравнения (5) и (6), построенные на основе математических моделей (1) - (4) изучаемых материалов являются основополагающими для расчета их релаксационно-деформационных процессов любой степени сложности с деформациями и нагрузками, изменяющимся по любым заданным законам.

Для повышения точности прогнозирования применялись методы вычисления несобственных нелинейно-наследственных интегралов (5), (6), основанные на неравномерном разбиении временной шкалы с учетом специфики рассматриваемого процесса. При прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, временная шкала разбивалась в возрастающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса. При прогнозировании длительных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, временная шкала разбивалась в убывающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета длительных деформационных воздействий.

В главе показано, что, использование математических моделей с функцией НАЛ для прогнозирования сложных релаксационных и сложных деформационных процессов изучаемых материалов, позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать релаксационно-деформационные свойства указанных материалов. Расчетные данные полностью подтверждены экспериментом.

В четвертой главе аппарат прогнозирования релаксационных и деформационных процессов арамидных материалов и изделий, разработанный в третьей главе, применяется для разделения полной деформации на две составляющие - упругую и вязкоупруго-пластическую.

Такое разделение полной деформации арамидных материалов и изделий позволяет ответить на многие вопросы, касающихся упругих и вязкоупруго-пластических свойств изучаемых материалов. Рассматриваемые в работе материалы, с практической точки зрения, должны обладать различными механическими свойствами, соответствующим их функционально-эксплуатационному назначению.

Рассматриваемые в работе огнезащитные арамидные ткани, предназначенные для изготовления одежды, защищающей от пожаров, должны обладать не столько большой степенью жесткости, которая свойственна всем арамидным материалам, но определенной долей пластичности, чтобы максимально гасить вредные механические воздействия и быть, в то же время, комфортной в ношении. На повышение пластичности огнезащитных тканей, как было выяснено, в первую очередь оказывают существенное влияние структура ткани, способ переплетения нитей в ткани, геометрическая структура материала, количество слоев ткани. Получить огнезащитные ткани, соответствующие оптимальным деформационно-эксплуатационным характеристикам и, в то же время, обладающие достаточной степенью комфортности при ношении огнезащитной одежды - задача компьютерного моделирования, которая решается на стадии разработки изделий и контролируется в процессе их производства с целью соблюдения технологических условий.

Другая группа рассматриваемых материалов - арамидные шнуры, применяющихся для эвакуации людей на пожарах, при горноспасательных мероприятиях и в шахтах, наоборот, должна обладать преимущественно упругими свойствами.

Разработанная в диссертации методика разделения полной деформации арамидных материалов и изделий на упругую и вязкоупруго-пластическую компоненты позволяет оценить качественно их упруго-деформационные характеристики, служит основой для проведения технологического отбора материалов и изделий, обладающих необходимыми эксплуатационно-потребительскими свойствами. На основе разработанной методики, реализованной посредством компьютерных технологий в виде комплекса программ для ЭВМ решается задача по отбору наиболее качественных изделий с точки зрения упруго-пластических свойств, что в свою очередь, и способствует решению задачи по повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Арамидные материалы и изделия обладают таким свойством, как усадка с ростом температуры и последующим восстановлением при остывании. Если, например, металлы расширяются при нагревании, то арамидные материалы ведут себя противоположным образом - они усаживаются.

Физическая суть этого интересного явления заключается в том, что в нормальных условиях (при комнатной температуре) макромолекулы арамидных нитей находятся в транс-конформации, то есть геометрически представляют собой более или менее распрымленные отрезки.

С увеличением температуры эти макромолекулы постепенно меняют свою геометрическую структуру, переходя к цис-конформации, которая представляет собой уже не прямые отрезки, а волнообразную структуру. Явление усадки, как показали эксперименты (рис. 7 - рис. 10) является обратимым, то есть при остывании арамидного материала его макромолекулы снова стремятся полностью или частично перейти к транс-конформации.

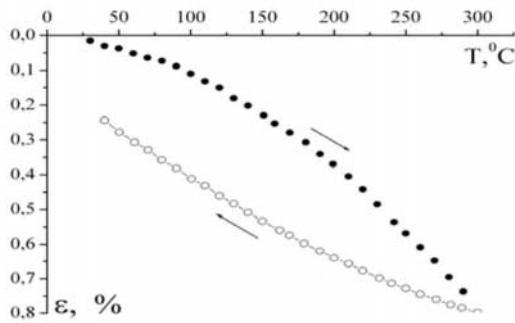


Рисунок 7 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити кевлар (● - режим усадки; ○ - режим восстановления)

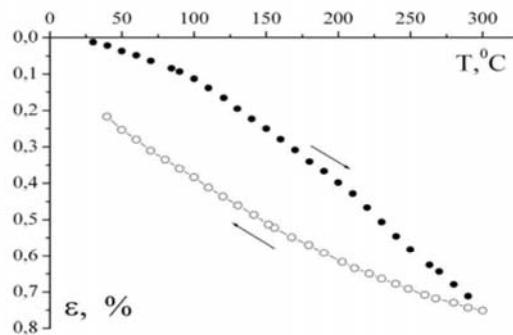


Рисунок 8 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити тварон (● - режим усадки; ○ - режим восстановления)

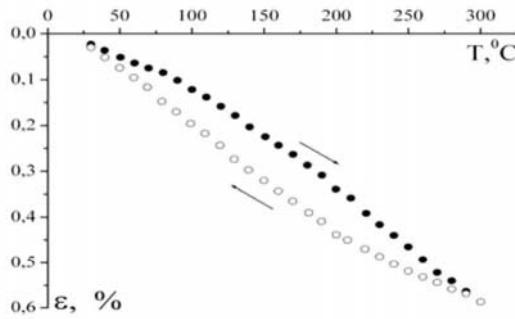


Рисунок 9 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити русар (● - режим усадки; ○ - режим восстановления)

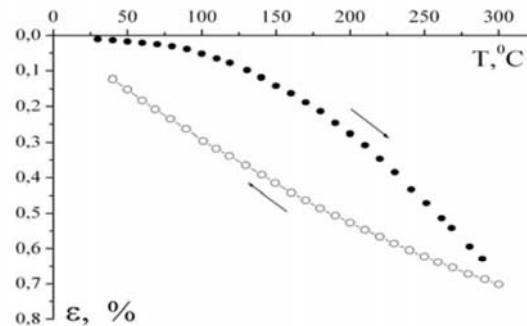


Рисунок 10 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити СВМ (● - режим усадки; ○ - режим восстановления)

Как видно из рис. 7 - рис. 10, полной обратимостью усадки из представленных материалов обладает только нить русар (рис. 9), относящаяся к российским арамидным материалам (что выгодно отличает ее от аналогичных зарубежных образцов), остальные же нити восстанавливаются не полностью.

Таким образом, проведенные температурно-деформационные исследования арамидных материалов и изделий, позволяют определить степень усадки и степень восстановления после нее, что чрезвычайно важно с точки зрения эксплуатационно-потребительских характеристик, т.к. совсем не маловажным является тот факт, как будет вести себя, например, огнезащитный материал при остывании после нагрева, насколько он пригоден для многократного последующего использования без потери своих эксплуатационно-деформационных свойств.

Таким образом, исследования, проведенные в главе, позволяют выявить упругие и вязкоупруго-пластические свойства арамидных материалов и изделий, а также определить степень усадки при температурных воздействиях и степень восстановления после нее. Разработанные методики позволяют качественно оценить степень конкурентоспособности разрабатываемой арамидной продукции.

Пятая глава посвящена компьютерной реализации методов, разработанных в диссертационной работе для решения задач по сравнительному анализу эксплуатационно-потребительских свойств арамидных материалов и изделий, для исследования взаимосвязи указанных свойств со структурой и их целенаправленного технологического регулирования, для оценки конкурентоспособности и повышения качества производимой продукции.

Разработанные компьютерные методики оценки эксплуатационно-потребительских свойств изучаемых материалов целесообразно внедрять в

исследовательских лабораториях на стадиях организации производства и разработки новой или совершенствования имеющейся арамидной продукции с целью отбора для производства наиболее перспективных и конкурентоспособных материалов и изделий.

Кроме того, внедрение указанных компьютерных методик на стадии производства арамидных материалов, позволяет осуществлять непрерывный технологический контроль за процессом выпуска готовых изделий, чтобы избежать ситуации снижения их качественных показателей.

Проведенный качественный анализ эксплуатационно-деформационных свойств арамидных материалов и изделий на основе разработанного в диссертации комплекса программ для ЭВМ выявил роль влияния геометрических размеров, линейной плотности, способа переплетения нитей и компонентного состава указанных материалов на их деформационные свойства. Были выявлены также существенные отличия в протекании процессов релаксации и ползучести у арамидных тканей и шнурков в отличие от арамидных нитей. Процессы релаксации и ползучести тканей и шнурков протекают заметно более активно, чем у образующих их нитей. Это связано с макростроением материалов. В начале процессов релаксации и ползучести происходит перестройка макроструктуры геометрического характера за счет изменения расстояний между образующими материал нитями. На этом этапе ткани и шнуры имеют меньшую деформационную жесткость, чем нити. На втором этапе деформирования, когда изменения макроструктуры геометрического характера будут исчерпаны, включается механизм релаксации и ползучести самих арамидных нитей. Начиная с этого момента деформационное поведение тканей и шнурков аналогично нитям.

Компьютерные методы качественного исследования эксплуатационно-деформационных свойств арамидных материалов и изделий являются основой организации производства указанных материалов, как на стадии их разработки - с целью повышения конкурентоспособности продукции и ее качества путем отбора наилучших образцов по потребительским характеристикам, так и на стадии выпуска готовой продукции - с целью мониторинга ее эксплуатационно-деформационных параметров и контроля качества выпускаемых изделий.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы повышения конкурентоспособности российских арамидных текстильных материалов и изделий на основе внедрения инновационных методик оценки качества, эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов.

2. Разработаны математические модели деформационно-релаксационных свойств арамидных текстильных материалов и изделий, наилучшим образом отражающие их функциональное назначение.

3. Предложены методы определения деформационно-релаксационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов и изделий, которые являются основой для проведения качественного анализа их эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств.

4. Разработаны методы прогнозирования деформационно-релаксационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий, наиболее достоверно отображающие режимы их эксплуатации.

5. Предложены методы сравнительного анализа и проведения технологического отбора арамидных текстильных материалов и изделий по эксплуатационно-потребительскому и функциональному назначению, обеспечивающие повышение конкурентоспособности указанных материалов.

6. Разработаны инновационные методы оценки упругих, вязкоупругих и усадочных свойств арамидных текстильных материалов и изделий, влияющих на деформационно-эксплуатационные характеристики указанных материалов.

7. Реализация методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий осуществляется с использованием компьютерных информационных технологий на стадии разработки и производства указанных материалов.

8. Предложенные методы качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий, а также методики проведения их сравнительного анализа и технологического отбора являются основой повышения конкурентоспособности указанных материалов.

9. Благодаря компьютеризации методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий появился действенный механизм их практического применения с целью оценки уровня соответствия своему функциональному назначению и повышения конкурентоспособности исследуемых материалов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ":

1. Шванкин, А.М. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных материалов / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2016. - № 1. - С. 10-14.

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

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

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

5. Шванкин, А.М. Прогнозирование сложных деформационных процессов полимерных материалов, используемых для производства обуви / А.М. Шванкин, Н.В. Переборова, М.А. Ковтун // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017. - № 1. - С. 38-46.

6. Шванкин, А.М. Методы моделирования вязкоупругости полимерных волокнистых материалов сложного строения / А.М. Шванкин, Н.В. Переборова, А.А. Козлов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017. - № 1. - С. 51-59.

Прочие публикации

7. Шванкин, А.М. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2016. - Т. 31. - № 1. - С. 22-27.

8. Шванкин, А.М. Системный анализ деформационных свойств горно- и пожароспасательных арамидных шнуров / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров // Дизайн. Материалы. Технология. - 2016. - № 2 (42). - С. 93-97.
9. Шванкин, А.М. Моделирование и исследование физико-механических свойств арамидных материалов / А.М. Шванкин, И.М. Егоров, М.А. Егорова, А.А. Козлов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. - 2016. - Т. 32. - № 2. - С. 10-18.
10. Шванкин, А.М. Численное прогнозирование деформационно-релаксационных процессов арамидных материалов в условиях переменной температуры / А.М. Шванкин, А.В. Демидов, А.Г. Макаров, Н.В. Переборова // Дизайн. Материалы. Технология. - 2016. - № 3 (43). - С. 55-61.
11. Шванкин, А.М. Компьютерное прогнозирование вязкоупругих процессов арамидных материалов / А.М. Шванкин, А.В. Демидов, Н.В. Переборова, Д.С. Лёдов // Дизайн. Материалы. Технология. - 2016. - № 4 (44). - С. 76-82.
12. Шванкин, А.М. Моделирование вязкоупругих свойств полимерных материалов / А.М. Шванкин, И.М. Егоров и др. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2015. - № 3. - С. 52-57.
13. Шванкин, А.М. Компьютерное моделирование деформационных процессов арамидных материалов / А.М. Шванкин // Одиннадцатая международная Санкт-Петербургская конференция молодых ученых "Современные проблемы науки о полимерах". - СПб.: ИВС РАН. - 09-12.11.2015.
14. Шванкин, А.М. Системный анализ физико-механических свойств текстильных материалов горноспасательного назначения / А.М. Шванкин // II Международная научно-практическая конференция "Модели инновационного развития текстильной и легкой промышленности на базе интеграции университетской науки и индустрии: образование - наука - производство". - Казань: КНИТУ. - 23-24.03.2016.
15. Шванкин, А.М. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных материалов / А.М. Шванкин // Российско-американская научная школа-конференция "Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов". - Казань: КНИТУ. - 22-26.05.2016.
16. Шванкин, А.М. Исследование деформационных свойств арамидных шнуров специального назначения / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров и др. // Всероссийская научная конференция молодых ученых "Инновации молодежной науки". - СПб.: СПбГУПТД. - 25-29.04.2016. - С. 12-13.
17. Шванкин, А.М. Расчетное прогнозирование деформационных процессов функциональных полимерных наноматериалов с учетом интегрального критерия достоверности / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров и др. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016615055 от 13.05.2016.
18. Шванкин, А.М. Прогнозирование вязкоупруго-пластических процессов морских полимерных канатов / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров и др. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016661296 от 05.10.2016.
19. Шванкин, А.М. Прогнозирование деформационных процессов огнестойких арамидных материалов / А.М. Шванкин, А.Г. Макаров и др. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016661267 от 05.10.2016.

Подписано в печать 29.03.2017. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 1,0. Формат 60 × 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № 134

Отпечатано в типографии СПбГУПТД
191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, д.26