

На правах рукописи



Переборова Нина Викторовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ ПО ПОВЫШЕНИЮ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА СТАДИИ ОРГАНИЗАЦИИ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург, 2020

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 консультант: **Макаров Авинир Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", заведующий кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты: **Рымкевич Павел Павлович**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского" Министерства обороны РФ, профессор кафедры физики

Коновалов Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности

Буре Владимир Мансурович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», профессор кафедры математической теории игр и статистических решений

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Костромской государственный университет", г. Кострома

Защита диссертации состоится 09 марта 2021 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, круглый зал заседаний.

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 ___ февраля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.236.07
доктор технических наук, профессор



Марковец Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В основе предлагаемых методов цифровой экономики для повышения конкурентоспособности продукции текстильной и легкой промышленности (ТЛП) на стадии организации ее производства лежит качественная оценка и системный анализ функциональных, потребительских, эксплуатационных и других свойств этой продукции. Техническим аппаратом для разрабатываемых методов служит математическое моделирование, компьютерное прогнозирование, численные методы и методы оптимизации функциональных, деформационных, восстановительных и релаксационных свойств материалов ТЛП.

Актуальность работы состоит, прежде всего, в необходимости проектирования и создания новой конкурентоспособной продукции ТЛП России, обладающей заданной функциональностью и требуемыми эксплуатационно-потребительскими характеристиками. Актуальность решаемой задачи усиливается также продолжающимися свое действие международными санкциями и учетом того, что значительная часть продукции ТЛП является продукцией двойного назначения и предназначена для использования в целях повышения обороноспособности страны. Полимерные текстильные материалы и композиты на их основе служат основой для корпусов космических и баллистических ракет, подводных лодок и глубоководных аппаратов. Современное армейское обмундирование и спецодежда различного назначения, к функциональности которых предъявляются определенные требования, - это тоже продукция ТЛП. Продукция ТЛП используется в судостроении, автомобилестроении, парашютостроении и других областях техники.

Проведенные исследования выполнены с учетом "Стратегии развития легкой промышленности России на период до 2020 года", согласно Постановлению Правительства России от 07 августа 2015 г., и (в составе коллектива апробирующей организации - Управляющей компании "Чайковский текстиль") получили высшую оценку экспертно-научного сообщества нашего государства в виде Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2019 года "за научное обоснование и разработку новых инновационных текстильных материалов, спецодежды, униформы и современных технологий их изготовления для решения задач импортозамещения" (Распоряжение правительства Российской Федерации от 29 ноября 2019 г. № 2846-р).

Развитие современной экономики страны невозможно без проектирования и создания новой инновационной продукции ТЛП, обладающей требуемыми функциональными свойствами, так как это существенно влияет на социальную, экономическую и интеллектуальную безопасность страны, а также укрепляет ее обороноспособность. Развитие и использование передовых методов цифровой экономики для решения поставленной задачи по улучшению качества продукции ТЛП способствует повышению ее конкурентоспособности, позволяя значительно упростить и ускорить процесс импортозамещения.

Диссертационная работа выполнялась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ в сфере научно-технической деятельности (проект № FSEZ-2020-0005) по теме: "Разработка методов математического моделирования и качественного анализа вязкоупруго-пластических свойств полимерных текстильных материалов двойного, технического и медицинского назначения с целью проектирования из них новых конкурентоспособных изделий с улучшенными эксплуатационными и функциональными характеристиками".

Степень разработанности темы исследования. Решение задачи повышения конкурентоспособности продукции ТЛП в период продолжения действия международных санкций, является одной из важнейших проблем отрасли. Задача качественной оценки эксплуатационных и функциональных свойств (ФЭС) материалов и изделий ТЛП в

процессе проектирования и организации их производства является весьма сложной, в силу того, что ее решение может предполагать не только экспериментальное исследование уже имеющихся образцов указанных материалов и изделий, но и проведение оценки их функциональности для случаев, когда условия эксплуатации этих материалов и изделий в лабораторных условиях воссоздать достаточно сложно или невозможно. В таком случае исследование и прогнозирование ФЭС материалов и изделий ТЛП может быть проведено только на основе математического моделирования и компьютерного прогнозирования их цифровых аналогов. Наглядным примером тому является изучение и прогнозирование функциональных свойств, например, таких текстильных материалов, которые применяются при армировании корпусов баллистических и космических ракет.

Автору диссертации принадлежит инновационная идея проведения качественного анализа виртуальных образцов материалов и изделий ТЛП на основе применения информационных технологий, а также методов системного анализа. Методы качественного исследования ФЭС материалов и изделий ТЛП активно развиваются в научной школе СПбГУПТД, возглавляемой автором диссертации и внесенной в реестр научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга.

Проведение качественного анализа виртуальных образцов материалов и изделий ТЛП становится возможным в силу изоморфизма (взаимно-однозначного соответствия) установленного между качественными функциональными характеристиками материалов и изделий ТЛП и их количественными эксплуатационными параметрами, получаемых математическим моделированием и компьютерным прогнозированием эксплуатационных процессов изучаемых материалов. Это значит, что задача по качественной оценке ФЭС материалов и изделий ТЛП будет решена, если удастся найти изоморфизм, связывающий количественные параметры математической модели эксплуатационных процессов этих материалов с их качественными функциональными характеристиками. Например, при моделировании эксплуатационных процессов защитной спецодежды, можно параметру, отвечающему за пластичность изделия (величине пластической деформации) поставить во взаимно-однозначное соответствие качественную характеристику комфортности. Тогда оптимальную (по критерию комфортности) геометрическую структуру и компонентный состав рассматриваемой спецодежды можно найти путем оптимизации эксплуатационных параметров математической модели (по критерию наибольшей пластичности).

Аналогичными исследованиями в плане повышения конкурентоспособности материалов и изделий ТЛП на стадии ее проектирования и организации производства в СПбГУПТД занимались Демидов А.В., Вагнер В.И., Макаров А.Г., Егорова М.А., Егоров И.М., Шванкин А.М., Кобякова Ю.В., Климова Н.С.

Цель работы состоит в разработке методов цифровой экономики по повышению конкурентоспособности продукции ТЛП на основе критериев и методов качественной оценки ее функциональных и эксплуатационных свойств.

Основными **задачами** исследования, решаемыми в диссертации, являются:

- разработка методологии математического моделирования ФЭС материалов и изделий ТЛП;
- разработка методологии численного прогнозирования ФЭС материалов и изделий ТЛП;
- разработка оценочных критериев ФЭС материалов и изделий ТЛП;
- разработка методов системного анализа ФЭС виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП;
- компьютеризация методов численного прогнозирования ФЭС материалов и изделий ТЛП;
- компьютеризация методов системного анализа ФЭС виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП;

- получение практических рекомендаций по оптимальной структуре и компонентному составу проектируемых материалов и изделий ТЛП заданного функционального назначения.

Методология и методы исследования. Проведенное диссертационное исследование опирается на современные представления, разработки и положения, которые применяются в математическом моделировании, текстильном материаловедении и в системном анализе. Использовались также различные инновационные методы менеджмента качества продукции, оптимизации, вычислительной математики, вязкоупругости полимеров, а также современные информационные технологии и методы цифровой экономики.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует пунктам Паспорта научной специальности 05.02.22 – Организация производства (по отраслям) ВАК Минобрнауки РФ:

2. Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов в организацию производственных процессов.

3. Разработка методов и средств информатизации и компьютеризации производственных процессов на всех стадиях.

4. Моделирование и оптимизация производственных процессов. Экспертные системы в организации производственных процессов.

5. Повышение качества и конкурентоспособности продукции, системы контроля качества и сертификации продукции.

10. Разработка методов и средств мониторинга производственных и сопутствующих процессов.

11. Разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

Научная новизна диссертационной работы состоит в:

- разработке новых математических моделей ФЭС материалов и изделий ТЛП, которые являются необходимыми для определения количественных эксплуатационных характеристик этих материалов;

- установлении изоморфизма (взаимно-однозначного соответствия) между количественными эксплуатационными характеристиками материалов и изделий ТЛП и их качественными функциональными свойствами с целью возможности проведения оптимизации этих свойств;

- разработке методов численного прогнозирования эксплуатационных свойств виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП;

- разработке оценочных критериев ФЭС материалов и изделий ТЛП с учетом установленного изоморфизма между количественными эксплуатационными и качественными функциональными характеристиками этих материалов и изделий;

- компьютерной реализации методов численного прогнозирования ФЭС материалов и изделий ТЛП;

- разработке методов системного анализа ФЭС виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП;

- компьютерной реализации методов системного анализа функциональных свойств виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП;

- получении практических рекомендаций по оптимальной структуре и компонентному составу проектируемых материалов и изделий ТЛП заданной функциональности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методологии и критериев качественной оценки функциональных свойств материалов и изделий ТЛП, которая стала возможной благодаря методам цифровой экономики по

переходу от исследований экспериментальных образцов указанных материалов и изделий к их виртуальным цифровым аналогам. Кроме того, благодаря установленному изоморфизму между количественными эксплуатационными характеристиками и качественными функциональными свойствами изучаемых материалов, стало возможным проведение оптимизации геометрической структуры и компонентного состава на основе разработанных критериев качественной оценки функциональных свойств этих материалов.

Основная практическая значимость представленной работы состоит в возможности получения практических рекомендаций по оптимальной структуре и компонентному составу проектируемых изделий ТЛП заданного функционального назначения, что существенно повышает конкурентоспособность этих изделий и вносит вклад в решение задачи по импортозамещению продукции ТЛП, что особенно важно в период действия продолжающихся международных санкций.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанные новые математические модели ФЭС материалов и изделий ТЛП, являющиеся необходимыми для определения количественных эксплуатационных характеристик этих материалов;

- установленный изоморфизм между количественными эксплуатационными характеристиками материалов и изделий ТЛП и их качественными функциональными свойствами, позволяющий осуществить переход от исследования эксплуатационных характеристик - количественных параметров математических моделей - к последующему исследованию функциональных свойств указанных материалов и изделий – их качественных характеристик;

- разработанные методы расчетного прогнозирования эксплуатационных процессов виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП, позволяющие заменить экспериментальные исследования опытных образцов указанных материалов и изделий их виртуальными цифровыми аналогами, что существенно сокращает технико-экономические затраты, связанные с выпуском соответствующих опытных партий материалов и изделий;

- разработанные критерии качественной оценки функциональных свойств материалов и изделий ТЛП, служащие основой для проведения оптимизации структуры и определения наилучшего компонентного состава проектируемых материалов и изделий ТЛП, заданного функционального назначения;

- разработанные методы системного анализа функциональных свойств виртуальных цифровых образцов материалов и изделий ТЛП на основе применения методов цифровой экономики и современных информационных технологий;

- разработанный комплекс универсального программного обеспечения по компьютерной реализации методов численного прогнозирования эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, методов системного анализа функциональных свойств их виртуальных цифровых образцов и методов определения оптимальной структуры и наилучшего компонентного состава проектируемых материалов и изделий.

Степень достоверности результатов. Разработанные в диссертации методы качественного анализа ФЭС материалов и изделий ТЛП были опробованы в ЗАО "ТЕКСТИЛЬ-ИНВЕСТ" в 2019 году с подтверждением своей полной работоспособности. На основе применения этих методов были получены практические рекомендации в части проектирования материалов и изделий ТЛП, обладающих требуемой функциональностью.

Методы качественной оценки функциональных свойств инновационных текстильных материалов, спецодежды и униформы с целью повышения их конкурентоспособности были опробованы в ведущей текстильной компании РФ УК "Чайковский текстиль", где получили наивысшую правительственную оценку в виде Премии Правительства в области науки и техники 2019 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 ноября 2019 г. № 2846-р).

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на научных и научно-технических конференциях различных уровней, в том числе на: Международной научной конференции "Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов", "Международном научно-практическом семинаре "Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки", Международной научно-технической конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах", Международной научно-практической конференции "Модели инновационного развития ТЛП на базе интеграции университетской науки и индустрии ОБРАЗОВАНИЕ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО", Международном научно-техническом симпозиуме "Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности", "Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов", Всероссийской научной конференции молодых ученых "Инновации молодежной науки".

Автор диссертационного исследования неоднократно являлась победителем конкурсов грантов, проводимых Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, грантов РФФИ, а также она является лауреатом Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2019 года, лауреатом Премии Правительства Санкт-Петербурга 2016 года в области научно-педагогической деятельности. Научная школа, возглавляемая автором диссертации, внесена в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга.

Автор диссертации имеет индекс Хирша по версии РИНЦ равный 41.

Публикации. По результатам диссертационного исследования в 2016-2020 гг. (после защиты кандидатской диссертации) опубликована 141 научная работа (в том числе 8 - без соавторов), из которых 38 - в изданиях, входящих в международные базы научного цитирования Web of Science или Scopus, 12 - в рецензируемых научных изданиях из "Перечня ВАК" (не входящих в Web of Science или Scopus). Помимо этого, соискателем зарегистрировано 81 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ (в том числе 7 - без соавторов).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы (322 наименования) и двух приложений. Основное содержание диссертации (без списка литературы и приложений) изложено на 263 страницах машинописного текста, иллюстрировано 65 рисунками и содержит 39 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности научного направления по разработке методов цифровой экономики по повышению конкурентоспособности продукции ТЛП на стадии организации ее производства, сформулированы степень разработанности темы исследования, цели и задачи исследования, методология и методы исследования, соответствие диссертации Паспорту научной специальности, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация результатов работы.

В **первой главе** дается обзор литературы по тематике диссертации, описываются проблемы, связанные с проведением качественных оценок функционально-потребительских и эксплуатационных свойств материалов ТЛП.

Механизм решения задач в области качественных оценок функционально-потребительских и эксплуатационных свойств материалов ТЛП носит комплексный, системный и многоцелевой характер. Он касается нескольких направлений исследований: от проведения экспериментальных исследований до разработки и применения качественных и оптимизационных критериев функционально-потребительских и эксплуатационных свойств указанных материалов. Проведение качественных оценок

функционально-потребительских и эксплуатационных свойств материалов ТЛП имеет важное стратегическое значение, так как это оно служит основой для создания материалов, обладающей большей конкурентоспособностью.

В главе рассматриваются также вопросы внедрения методов цифровой экономики и современных компьютерных технологий в проведение качественных оценок функционально-потребительских и эксплуатационных свойств материалов ТЛП, что позволяет наилучшим образом осуществить решение поставленной задачи повышения качества исследуемых материалов.

Во **второй главе** разрабатывается методология математического моделирования эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП. Основными эксплуатационными процессами материалов и изделий ТЛП являются релаксация и ползучесть. Для реализации возможности прогнозирования эксплуатационных процессов необходимо иметь адекватные математические модели указанных процессов.

Материалы и изделия ТЛП, в силу своей разнообразной микро и макроструктуры, отличаются от других материалов и изделий широким спектром своих возможных эксплуатационных свойств, что должно быть учтено на стадии математического моделирования. При этом, математические модели, достаточно хорошо служащие для описания процессов релаксации и ползучести одних материалов и изделий ТЛП, совсем не подходят для описания этих процессов у других материалов и изделий, либо при их описании дают значительную погрешность.

Для дальнейшего развития российской ТЛП, производящей и проектирующей текстильные материалы и изделия различного назначения, как технического, так и бытового, необходима разработка методов моделирования и прогнозирования всесторонних свойств этих материалов и изделий. Последнее время наметилась позитивная тенденция комплексного развития и совершенствования отечественных производств ТЛП с учетом инновационных методов изучения ФЭС материалов и изделий ТЛП на основе передовых информационных технологий.

Последующее ускорение технического и научного прогресса, также как и решение задачи по повышению конкурентоспособности продукции ТЛП, являются своеобразным локомотивом для разработки новых инновационных технологий проведения научных исследований в части моделирования и последующего прогнозирования ФЭС материалов и изделий. В силу сказанного, актуальной является задача разработки новых математических моделей для описания эксплуатационных процессов как новых разрабатываемых материалов и изделий ТЛП, так и для повышения точности в прогнозировании этих процессов для уже имеющихся материалов и изделий.

Разработка математических моделей релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП является одним из главных звеньев изучения ФЭС указанных материалов и изделий, так как на основе этих моделей можно в последующем как прогнозировать релаксационно-эксплуатационные свойства материалов и изделий, так и проводить качественную оценку их ФЭС.

Исследование ФЭС материалов и изделий ТЛП можно осуществлять посредством моделирования и прогнозирования двух основополагающих эксплуатационных процессов этих материалов и изделий, в частности: релаксационного и ползучести.

Процессы релаксации, также как и ползучести, имеют друг от друга отличия по своей природе, однако, дополняют друг друга и являются взаимобратными.

Учитывая то, что значение модуля релаксации $E_{\varepsilon t} = \sigma_t / \varepsilon$ (где σ_t - напряжение, ε - деформация, t - время) ограничено своими асимптотами E_0 и E_∞ :

$$E_\infty \leq E_{\varepsilon t} \leq E_0, \quad (1)$$

получаем, что для математического моделирования релаксации можно использовать

некоторые нормированные функции φ , аппроксимируя ими указанный модуль релаксации:

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

В качестве нормированных функций для аппроксимации модуля релаксации в диссертации выбирались:

$$\varphi = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_n} \ln \frac{t}{t_1} \right) - \quad (3)$$

функция НАЛ (нормированный арктангенс логарифма),

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_n} \ln \frac{t}{\tau} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \quad (4)$$

функция ИВ (интеграл вероятности),

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^{-A}} = \frac{1}{1 + e^{-A \ln \frac{t}{\tau}}} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A}{2} \ln \frac{t}{\tau} \right) \right) - \quad (5)$$

функция ГТ (гиперболический тангенс) и

$$\varphi = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^k} - \quad (6)$$

функция ФК (Кольрауша).

Здесь: b_n , a_n , A , k - параметры интенсивности релаксационных процессов, t_1 - нормирующее время, τ - время релаксации.

Аналогично получаются математические модели для процесса ползучести.

Учитывая то, что значение податливости $D_{\sigma t} = \varepsilon_t / \sigma$ ограничено своими асимптотами D_0 и D_∞ :

$$D_0 \leq D_{\sigma t} \leq D_\infty, \quad (7)$$

получаем, что для математического моделирования ползучести можно использовать нормированные функции φ (3) - (6), аппроксимируя ими указанную податливость:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{\sigma t}. \quad (8)$$

В этом случае у функций (2) - (6): b_n , a_n , A , k - параметры, характеризующие интенсивность ползучести, τ - время ползучести.

Следует заметить, что параметры процессов релаксации и ползучести имеют определенный физический смысл. На основе этих параметров в главе 5 (для релаксации) и в главе 6 (для ползучести) будут разработаны критерии качественной оценки соответственно релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП.

В **третьей главе** разрабатываются методы численного прогнозирования эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП. Отдельно выделяются типы наиболее распространенных эксплуатационных процессов: релаксационно-эксплуатационный и деформационно-эксплуатационный.

Численное прогнозирование эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП осуществляется на основе определяющих интегральных соотношений нелинейной вязкоупругости указанных материалов и изделий типа Больцмана-Вольтерра с использованием математических моделей релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов, предложенных во второй главе.

Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных, деформационно-эксплуатационных и эксплуатационно-восстановительных процессов материалов и изделий ТЛП имеет стратегическое значение при определении функциональности того или иного материала или изделия ТЛП.

С учетом сказанного, интегральное определяющее соотношение нелинейной релаксации материалов и изделий ТЛП имеет вид:

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

Аналогично, интегральное определяющее соотношение нелинейной ползучести материалов и изделий ТЛП имеет вид:

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

Здесь: $\varphi'_{\varepsilon;t}$ - интегральное ядро релаксации, соответствующее математической модели релаксационного процесса, $\varphi'_{\sigma;t}$ - интегральное ядро ползучести, соответствующее математической модели процесса ползучести, предложенных в главе 2.

Проведение надежной оценки эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП желательно проводить с использованием информационных технологий и компьютерных программ. Это наиболее приемлемый вариант, так как позволяет с наибольшей точностью провести оценку указанных свойств изучаемых материалов.

В главе 3 были разработаны также компьютерные алгоритмы по расчетному прогнозированию эксплуатационно-релаксационных и эксплуатационно-деформационных процессов материалов и изделий ТЛП.

Исследование эксплуатационных свойств изучаемых материалов и изделий ТЛП зависит от большого числа всевозможных условий:

- от степени точности экспериментально полученных данных при исследовании;
- от степени адекватности математического и физического моделирования;
- от степени оптимальности используемых математических моделей;
- от удачного выбора методик расчетного прогнозирования.

Увеличить точность численного прогнозирования эксплуатационных процессов изучаемых материалов и изделий ТЛП можно различными способами, в том числе:

- используя для измерений при проведении экспериментальных исследований измерительной аппаратуры повышенной точности;
- увеличивая число проводимых экспериментальных исследований;
- повышая репрезентативность эксперимента, проводя его с большим числом материалов.

В то же время, альтернативным способом повышения точности численного прогнозирования эксплуатационных процессов изучаемых материалов и изделий ТЛП, могут являться методы, разработанные на основе применения критериев оптимальности математического моделирования эксплуатационных свойств этих материалов.

Разработанные в **четвертой** главе критерии оптимальности математического моделирования эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП носят интегральный характер и могут быть получены из определяющих соотношений, описывающих эксплуатационные процессы указанных материалов.

Разрабатываемые критерии оптимальности математических моделей эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП были созданы на основе интегральных определяющих соотношений Больцмана-Вольтерра, позволяющих прогнозировать эксплуатационные процессы изучаемых материалов.

На практике реализация критериев оптимальности математических моделей эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП сталкивается с большим объемом

численных вычислений, в силу чего возрастает роль информационных технологий, без которых не обойтись при оптимальном моделировании и прогнозировании эксплуатационных свойств изучаемых материалов.

Ответ о достоверности прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП может дать критерий оптимальности математического моделирования этих процессов, записанный в виде:

$$\max_{t \in [0, T]} \left| \chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (11)$$

где: T - величина полного времени прогнозирования релаксационно-эксплуатационного процесса, $\chi \left(\ln(t/\tau_\sigma) \right)$ - интегральная функция критерия, которая имеет вид:

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) = E_o D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma \theta} E'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta. \quad (12)$$

Приведенный критерий оптимальности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП (11) получается из уравнения (9) делением последнего на σ при $\sigma = const$:

$$E_o D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma \theta} E'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta = 1, \quad (13)$$

где: $E'_{\varepsilon t} = \partial E_{\varepsilon t} / \partial (\ln(t/t_1))$ - интегральное релаксационное ядро.

Суть критерия оптимальности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП состоит в том, что, при наилучшем выборе интегрального ядра $E'_{\varepsilon t}$ и, соответственно, модуля релаксации $E_{\varepsilon t}$, левая часть уравнения (13) имеет минимальное отклонение от значения "единицы".

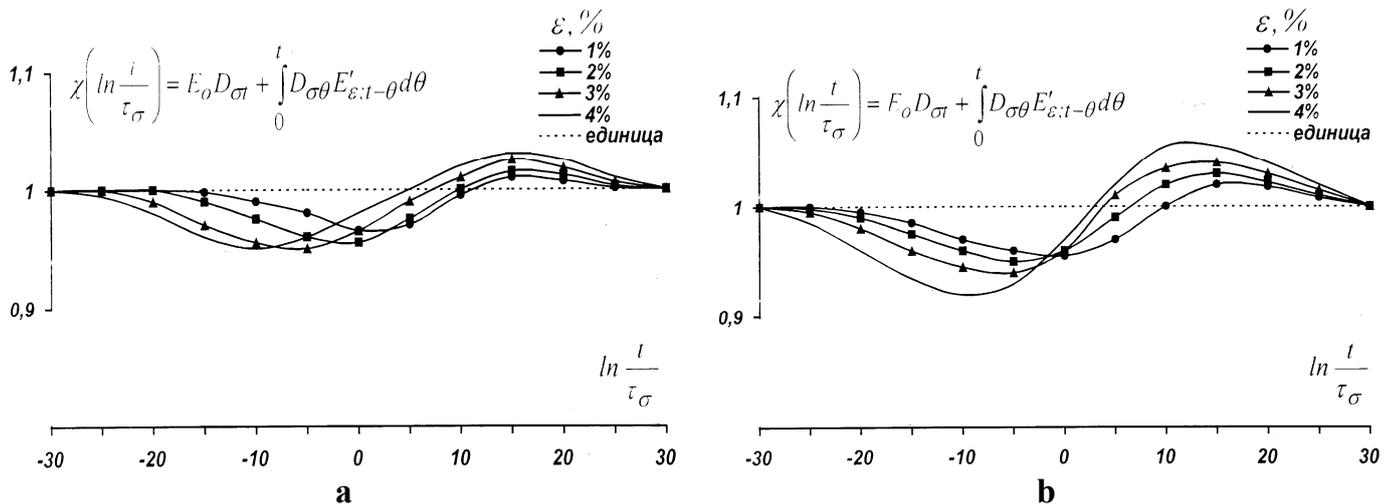


Рисунок 1 - Пример практического применения критерия (13) оптимальности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП с релаксационной функцией НАЛ (а) и с функцией ИВ (б) для текстильной полиэфирной нити 83 текс

На рис. 1 приведен пример практического применения критерия (13) оптимальности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП с релаксационной функцией НАЛ (а) и с функцией ИВ (б) для текстильной полиэфирной нити 83 текс.

Ответ о достоверности прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП, может дать критерий оптимальности математического моделирования указанных процессов, записанный в виде:

$$\max_{t \in [0, T]} \left| \chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) - 1 \right| \rightarrow \min, \quad (14)$$

где: T - величина полного времени прогнозирования деформационно-эксплуатационного процесса, $\chi \left(\ln \left(t / \tau_\varepsilon \right) \right)$ - интегральная функция критерия, которая имеет вид:

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) = D_o E_{\varepsilon t} + \int_0^t E_{\varepsilon \theta} D'_{\sigma; t-\theta} d\theta. \quad (15)$$

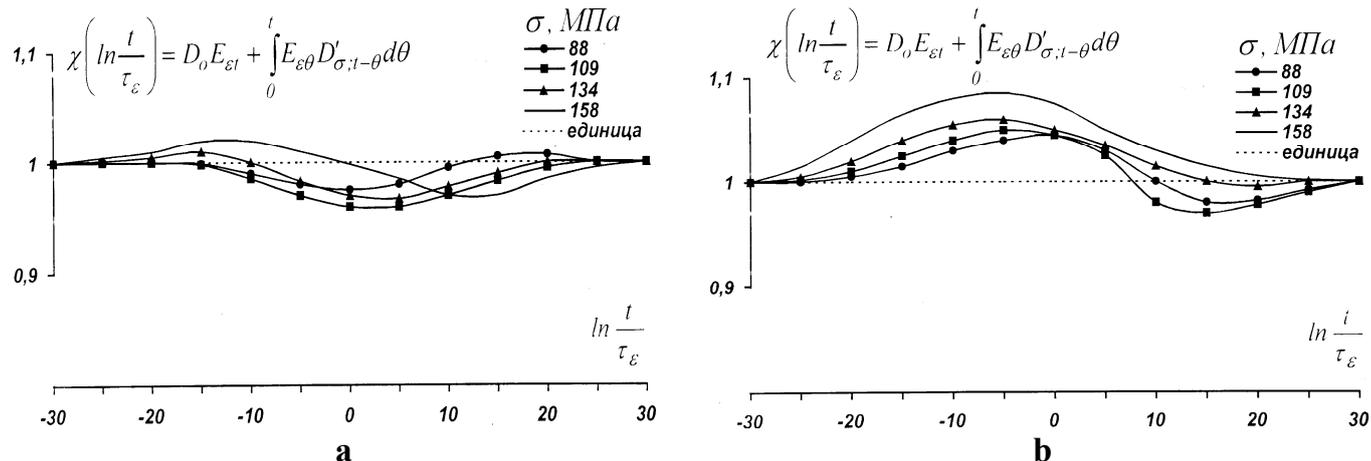


Рисунок 2 - Пример практического применения критерия (16) оптимальности математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП с деформационной функцией НАЛ (а) и с функцией ИВ (б) для текстильной полиэфирной нити 83 текс

Приведенный критерий оптимальности математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП (14) получается из уравнения (10) делением последнего на ε при $\varepsilon = const$:

$$D_o E_{\varepsilon t} + \int_0^t E_{\varepsilon \theta} D'_{\sigma; t-\theta} d\theta = 1, \quad (16)$$

где: $D'_{\sigma t} = \partial E_{\sigma t} / \partial \left(\ln \left(t / t_l \right) \right)$ - интегральное деформационное ядро.

Суть критерия оптимальности математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП состоит в том, что, при наилучшем выборе интегрального ядра $D'_{\sigma t}$ и, соответственно, податливости $D_{\sigma t}$, левая часть уравнения (16) имеет минимальное отклонение от значения "единицы".

На рис. 1 приведен пример практического применения критерия (16) оптимальности математического моделирования деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП с релаксационной функцией НАЛ (а) и с функцией ИВ (б) для текстильной полиэфирной нити 83 текс.

Практическое применение критериев (13) и (16) оптимальности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных (рис. 1) и деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП (рис. 2) показывает преимущество релаксационной и деформационной функций НАЛ перед ИВ для прогнозирования указанных процессов текстильной полиэфирной нити 83 текс.

Это - бесспорный аргумент в пользу выбора функции НАЛ в качестве нормированной релаксационной и деформационной функции при оценке соответственно релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств текстильной полиэфирной нити 83 текс.

Использование на практике критериев (13) и (16) возможно лишь при применении информационных методов цифровой экономики из-за значительного объема вычислений.

В **пятой главе** приводятся разработанные критерии качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП. В частности, были разработаны следующие критерии качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, использующие параметры математической модели релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП.

R1. Интенсивность восстановления материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\alpha_1 = b_n = b_{n\varepsilon} \quad (17)$$

характеризует степень интенсивности восстанавливаемости материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации. Величина α_1 равна параметру степени интенсивности релаксации, который отвечает за свойства восстановления функциональных свойств этих материалов, $\alpha_1 \geq 0$.

С уменьшением величины α_1 , восстановление материалов после их эксплуатации ускоряется. И, наоборот, при увеличении величины α_1 , процессы восстановления материалов после их эксплуатации замедляются. То есть, если $\alpha_{1k} > \alpha_{1n}$, то материал с номером n восстанавливается после своей эксплуатации быстрее, чем материал с номером k .

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, на сколько быстро восстанавливаются эксплуатационные свойства материалов и изделий ТЛП, после их эксплуатации.

Часто бывает важным, чтобы материал после его эксплуатации быстро восстанавливал свои функциональные характеристики и был готов к последующей эксплуатации.

R2. Степень восстанавливаемости материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\alpha_2 = \frac{E_\infty}{E_0 + E_\infty} \quad (18)$$

характеризует степень восстанавливаемости материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации, $\alpha_2 \geq 0$.

При маленьких значениях величины α_2 , восстанавливаемость материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации бывает более полной. И, наоборот, при больших значениях величины α_2 , восстанавливаемость материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации является менее полной. То есть, если $\alpha_{2k} > \alpha_{2n}$, то материал с номером n восстанавливается после своей эксплуатации более полно, чем материал с номером k .

Из формулы (18) следует, что материал имеет полное восстановление при нулевом значении модуля вязкоупругости $E_\infty = 0$.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда требуется оценить, насколько долго исследуемый материал может сохранять свои функциональные свойства.

R3. Возможность многократного восстановления материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\alpha_3 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_p} \quad (19)$$

характеризует возможность многократного восстановления материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации, $\alpha_3 \geq 0$. Здесь, ε_p - экспериментально полученная разрывная деформация в процентах, ε_0 - некоторое нормирующее значение деформации, например, $\varepsilon_0 = 10\%$.

Для малых значений α_3 , материалы и изделия ТЛП обладают большей способностью к многократному восстановлению своих функциональных характеристик в процессе эксплуатации. И, наоборот, при больших значениях величины α_3 , материалы и изделия ТЛП обладают малой способностью к многократному восстановлению своих функциональных характеристик в процессе эксплуатации.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, как много раз могут восстанавливать свои эксплуатационные свойства материалы и изделия ТЛП в процессе эксплуатации.

R4. Временное восстановление функционально-потребительских свойств материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации. восстановления материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\alpha_4 = \frac{\bar{\tau}_\varepsilon}{t_1} \quad (20)$$

характеризует время восстанавливаемости функционально-потребительских характеристик материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации, $\alpha_4 \geq 0$. Здесь: t_1 - некоторое фиксированное базовое время, используемое для нормирования, к примеру: $t_1 = 600 \text{ с}$, $\bar{\tau}_\varepsilon$ - усредненное релаксационное время, которое может быть вычислено с помощью формулы:

$$\bar{\tau}_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon \cdot d\varepsilon, \quad (21)$$

где: ε_1 и ε_2 - соответственно нижняя и верхняя границы интервала исследуемых деформаций: $\varepsilon \in [\varepsilon_1, \varepsilon_2]$.

С уменьшением величины α_4 , материал после своей эксплуатации восстанавливается быстрее. И, наоборот, чем больше значение α_4 , тем медленнее восстанавливается материал после своей эксплуатации.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, как быстро или как медленно во времени восстанавливается тот или иной материал после своей эксплуатации.

R5. Устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\alpha_5 = \frac{E_\infty}{E_0 - E_\infty} \quad (22)$$

характеризует устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после их эксплуатации, $\alpha_5 \geq 0$.

При маленьких значениях величины α_5 , материалы и изделия ТЛП обладают большей устойчивостью к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после эксплуатации. И, наоборот, при больших значениях

величины α_5 , материалы и изделия ТЛП обладают меньшей устойчивостью к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после эксплуатации.

Чем выше устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после эксплуатации, тем меньшее влияние могут оказать факторы внешнего воздействия на эти материалы (температура, влажность, радиация и т.д.) в плане снижения их восстановительных свойств. Нулевое значение величины $\alpha_5 = 0$ означает абсолютную устойчивость материала к его многократному восстановлению после эксплуатации.

Немаловажную роль в качественной оценке релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП играет нормированная релаксационная функция НАЛ - основа математической модели указанных свойств, которая является, в свою очередь, интегральной функцией для распределения Коши, которое обладает свойством аддитивности.

В силу сказанного, численные значения параметров математической модели релаксации изучаемых материалов и изделий ТЛП, а именно: E_0 , E_∞ , $b_{n\varepsilon}$, τ_ε также должны подчиняться вероятностному закону Коши. Разрывная характеристика ε_p , хотя и не является параметром релаксации материалов и изделий ТЛП, но подчинена закону Коши, так как оно достаточно близко к нормальному.

Отсюда следует, что и предложенные в критериях R1-R5 величины α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 так же подчинены закону Коши.

Поэтому является целесообразным рассмотреть новую составную релаксационно-эксплуатационной величины

$$A_p = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5, \quad (23)$$

включающей в себя все вышеперечисленные величины α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 и также являющейся распределенной по вероятностному закону Коши, в силу его аддитивности.

Учитывая свойства величин α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , можно утверждать, что и их сумма - величина A_p может быть только неотрицательной: $A_p \geq 0$.

Анализируя рассмотренные критерии R1-R5 качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, можно заметить, что для всех введенных величин α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , функциональные свойства указанных материалов тем лучше, чем меньшие значения принимают указанные величины α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , то есть, чем меньше значение составной релаксационно-эксплуатационной величины A_p .

Отсюда, например, следует, что наилучшей функциональностью будет обладать такой материал, для которого релаксационно-эксплуатационная величина имеет нулевое значение: $A_p = 0$. Однако, в природе таких материалов не бывает.

Анализируя сказанное, получаем аналитическую форму записи для первого критерия оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП:

$$\frac{\sum_{k=1}^N A_{pk}}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N (\alpha_{1k} + \alpha_{2k} + \alpha_{3k} + \alpha_{4k} + \alpha_{5k})}{N} = \overline{A_p} \rightarrow \min, \quad (24)$$

где: k - номер образца материала, A_{pk} - значение релаксационно-эксплуатационной величины k - го образца материала, N - объем выборки (число взятых образцов), $\overline{A_p}$ - усредненное значение для релаксационно-эксплуатационных величин A_{pk} .

В случае же, если при качественной оценке релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП необходимо выделить главенствующую роль одной или нескольких величин из множества

$$A = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}, \quad (25)$$

либо же, наоборот, роль какой-то одной или нескольких величин из этого множества малозначительна, то наиболее уместным будет второй критерий оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, в который величины $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ входят с соответствующими весами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$, множество которых можно записать в виде:

$$A = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}. \quad (26)$$

Аналитическая форма записи второго критерия оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП имеет вид:

$$\frac{\sum_{k=1}^N A_{pk}^\lambda}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N (\lambda_1 \cdot \alpha_{1k} + \lambda_2 \cdot \alpha_{2k} + \lambda_3 \cdot \alpha_{3k} + \lambda_4 \cdot \alpha_{4k} + \lambda_5 \cdot \alpha_{5k})}{N} = A_p^\lambda \rightarrow \min, \quad (27)$$

где: λ - верхний индекс у релаксационно-эксплуатационных величин A_p , показывает, что величины $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ входят в оценочный критерий (26) вместе со своими весами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$.

Наряду с аналитической формой записи второго критерия оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП (25), бывает удобной и векторная форма его записи. Так, полагая, что A (25) и A (26) - есть пятимерные вектора, получаем векторную форму записи второго критерия оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП:

$$\frac{\sum_{k=1}^N (A_k \cdot A_k)}{N} = A_p^\lambda \rightarrow \min. \quad (28)$$

Таким образом, разработанные первый и второй критерии оптимизации релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП включают в себя, как составные части, частные критерии R1-R5.

Следовательно, разработанные в главе 5 критерии качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП позволяют оценивать функциональность материалов и давать рекомендации по оптимизации их релаксационно-эксплуатационных свойств с целью повышения функциональности.

В **шестой главе** приводятся разработанные критерии качественной оценки деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП. В частности, были разработаны следующие критерии качественной оценки деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, использующие параметры математической модели деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП.

D.1. Интенсивность деформирования материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\beta_I = b_n = b_{n\sigma} \quad (29)$$

характеризует интенсивность деформирования материалов при эксплуатации, $\beta_I \geq 0$.

При уменьшении величины β_I , деформирование материалов в процессе эксплуатации ускоряется. И, наоборот, при увеличении величины β_I , процессы деформирования материалов в процессе их эксплуатации замедляются. То есть, если

$\beta_{1k} > \beta_{1n}$, то материал с номером n деформируется при своей эксплуатации быстрее, чем материал с номером k .

Этот критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, на сколько быстро может проходить деформирование материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации.

D.2. Степень деформируемости материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\beta_2 = \frac{D_0}{D_0 + D_\infty} \quad (30)$$

характеризует степень деформируемости материалов и изделий ТЛП в процессе эксплуатации, $\beta_2 \geq 0$.

При маленьких значениях величины β_2 , деформируемость материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации бывает более полной. И, наоборот, при больших значениях величины β_2 , деформируемость материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации является менее полной. То есть, если $\beta_{2k} > \beta_{2n}$, то материал с номером n деформируется в процессе своей эксплуатации более полно, чем материал с номером k .

Из формулы (30) следует, что материал имеет полное деформирование при нулевом значении начальной упругой податливости $D_0 = 0$.

Этот критерий имеет особую значимость, когда требуется оценить, насколько полно исследуемый материал может деформироваться при своей эксплуатации. Чем менее полно может деформироваться материал (например, одежда), тем менее комфортен он при эксплуатации.

D.3. Возможность многократного деформирования материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\beta_3 = \frac{\sigma_0}{\sigma_p} \quad (31)$$

характеризует возможность многократного деформирования материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации. Здесь: σ_p - значение разрывного напряжения, σ_0 - некоторое фиксированное значение напряжения, применяющееся для его нормирования, например, $\sigma_0 = 1 \text{ ГПа}$, $\beta_3 > 0$.

При маленьких значениях величины β_3 материалы и изделия ТЛП обладают большей способностью выдерживать многократные деформационные воздействия в процессе своей эксплуатации. И, наоборот, при больших значениях величины β_3 материалы и изделия ТЛП обладают малой способностью выдерживать многократные деформационные воздействия в процессе своей эксплуатации.

Этот критерий имеет особую значимость, когда надо оценить возможность исследуемого материала многократно выдерживать деформационные воздействия в процессе своей эксплуатации.

D.4. Временные деформационные воздействия на материалы и изделия ТЛП в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\beta_4 = \frac{\bar{\tau}_\sigma}{t_1} \quad (32)$$

характеризует время деформационного воздействия на материал при эксплуатации. Здесь: t_1 - величина базового времени, применяемого для нормирования, например, $t_1 = 600 \text{ с}$, $\bar{\tau}_\sigma$ - усредненное значение деформационного времени, рассчитываемого по следующей формуле:

$$\bar{\tau}_\sigma = \frac{\sigma_0}{\sigma_2 - \sigma_1} \cdot \int_{\sigma_1/\sigma_0}^{\sigma_2/\sigma_0} \tau_\sigma \cdot d\frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (33)$$

где: σ_1 и σ_2 - соответственно нижняя и верхняя границы интервала исследуемых напряжений: $\sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]$, $\beta_4 \geq 0$.

С уменьшением величины β_4 , материал скорее деформируется в процессе эксплуатации. И, наоборот, чем больше значение β_4 , тем медленнее материал деформируется в процессе эксплуатации.

Введенный критерий имеет особую значимость, когда надо оценить, как быстро или как медленно во времени деформируется тот или иной материал в процессе своей эксплуатации.

Если в качестве материалов и изделий ТЛП выбирается одежда, то при меньших значениях σ_4 она быстрее деформируется, обеспечивая больший комфорт при ее носке.

D.5. Устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному деформированию в процессе их эксплуатации. Безразмерная величина

$$\beta_5 = \frac{D_0}{D_\infty - D_0} \quad (34)$$

характеризует устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному деформированию в процессе их эксплуатации, $\beta_5 \geq 0$.

При маленьких значениях величины β_5 , материалы и изделия ТЛП обладают большей устойчивостью к многократному деформированию в процессе их эксплуатации. И, наоборот, при больших значениях величины β_5 , материалы и изделия ТЛП обладают меньшей устойчивостью к многократному деформированию в процессе их эксплуатации.

Чем выше устойчивость материалов и изделий ТЛП к многократному деформированию в процессе их эксплуатации, тем меньшее влияние могут оказать факторы внешнего силового и деформационного воздействия на эти материалы в плане снижения их функциональных свойств. Нулевое значение $\beta_5 = 0$ означает абсолютную устойчивость материала к повторному деформированию.

Также, как в случае качественной оценки релаксационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП, немаловажную роль в качественной оценке деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП играет деформационная функция НАЛ - основа математической модели указанных свойств, которая является, в свою очередь, интегральной функцией распределения Коши, которое характеризуется свойством аддитивности.

В силу сказанного, численные значения параметров математической модели ползучести изучаемых материалов и изделий ТЛП, а именно: D_0 , D_∞ , $b_{n\sigma}$, τ_σ также должны подчиняться вероятностному закону Коши. Разрывная характеристика σ_p , хотя и не является параметром ползучести материалов и изделий ТЛП, но подчинена закону Коши, так как оно достаточно близко к нормальному.

Отсюда следует, что в критериях D1-D5 величины β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 тоже подчиняются закону Коши.

В силу сказанного, целесообразно рассмотреть новую составную деформационно-эксплуатационную величину

$$B_d = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5, \quad (35)$$

включающую в себя все вышеперечисленные величины β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 и также являющуюся распределенной по вероятностному закону Коши, в силу его аддитивности.

Учитывая свойства величин $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$, можно утверждать, что и их сумма - величина B_d может быть только неотрицательной: $B_d \geq 0$.

Анализируя рассмотренные критерии D1-D5 качественной оценки деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, можно заметить, что для всех введенных величин $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$, функциональные свойства указанных материалов тем лучше, чем меньше значения принимают указанные величины $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$, то есть, чем меньше значение составной деформационно-эксплуатационной величины B_d .

Отсюда, например, следует, что наилучшей функциональностью будет обладать такой материал, для которого деформационно-эксплуатационная величина имеет нулевое значение: $B_d = 0$. Однако, в природе таких материалов не бывает.

Анализируя сказанное, получаем аналитическую форму записи для первого критерия оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП:

$$\frac{\sum_{k=1}^N B_{dk}}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N (\beta_{1k} + \beta_{2k} + \beta_{3k} + \beta_{4k} + \beta_{5k})}{N} = \overline{B_d} \rightarrow \min, \quad (36)$$

где: k - номер образца материала, B_{dk} - значение деформационно-эксплуатационной величины k -го образца материала, N - объем выборки (число взятых образцов), $\overline{B_d}$ - усредненное значение для деформационно-эксплуатационных величин B_{dk} .

В случае же, если при качественной оценке деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП необходимо выделить главенствующую роль одной или нескольких величин из множества

$$B = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5\}, \quad (37)$$

либо же, наоборот, роль какой-то одной или нескольких величин из этого множества малозначительна, то наиболее уместным будет второй критерий оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, в который величины $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ входят с соответствующими весами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$, которые можно записать в виде:

$$A = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5\}. \quad (38)$$

Аналитическая форма записи второго критерия оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП имеет вид:

$$\frac{\sum_{k=1}^N B_{dk}^\lambda}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N (\lambda_1 \cdot \beta_{1k} + \lambda_2 \cdot \beta_{2k} + \lambda_3 \cdot \beta_{3k} + \lambda_4 \cdot \beta_{4k} + \lambda_5 \cdot \beta_{5k})}{N} = \overline{A_p^\lambda} \rightarrow \min, \quad (39)$$

где: λ - верхний индекс у деформационно-эксплуатационных величин B_d , показывает, что величины $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ входят в оценочный критерий (38) вместе со своими весами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$.

Наряду с аналитической формой записи второго критерия оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП (39), бывает удобной и векторная форма его записи.

Так, полагая, что B (37) и A (38) - есть пятимерные вектора, получаем векторную форму записи второго критерия оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП:

$$\frac{\sum_{k=1}^N (A_k \cdot B_k)}{N} = B_d^{\lambda} \rightarrow \min. \quad (40)$$

Таким образом, разработанные первый и второй критерии оптимизации деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП включают в себя, как составные части, частные критерии D1-D5.

Следовательно, разработанные в главе 6 критерии качественной оценки деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП позволяют оценивать функциональность материалов и давать рекомендации по оптимизации их деформационно-эксплуатационных свойств с целью повышения функциональности.

В **седьмой главе** рассматриваются методы численного определения спектров времен релаксации и запаздывания материалов и изделий ТЛП. Знание спектров релаксации и запаздывания позволяет ответить на некоторые вопросы, связанные с протеканием релаксационных и деформационных процессов. В частности, они дают ответы на вопросы о скорости и длительности протекания указанных процессов.

В главе рассмотрены также методы графического построения кривых спектров времен релаксации и запаздывания материалов и изделий ТЛП. По форме этих кривых можно также получить информацию о протекании релаксационных и деформационных процессов материалов и изделий ТЛП, а, следовательно, и о функциональности указанных материалов.

В главе решается задача определения аналитических видов спектров времен релаксации и запаздывания по интегральным ядрам релаксации и ползучести с нормированными функциями НАЛ и ГТ.

Функционально-релаксационные свойства материалов и изделий ТЛП отражаются интегральным ядром релаксации $r_{\varepsilon t}$, связь которого со спектром релаксации $\bar{H}_{\varepsilon \tilde{\tau}}$ может быть выражена формулой:

$$\int_0^{\infty} \bar{H}_{\varepsilon \tilde{\tau}} \cdot e^{-tx} \cdot dx = \frac{d\varphi_{\varepsilon t}}{dt} = r_{\varepsilon t}, \quad (41)$$

которая соответствует преобразованию Лапласа, где релаксационный спектр $\bar{H}_{\varepsilon \tilde{\tau}}$ выступает как оригинал, а релаксационное ядро $r_{\varepsilon t}$ - как изображение.

Приближения нормированного релаксационного спектра можно получить по формулам:

$$\bar{H}_1 = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} = \varphi'_{\varepsilon t} = \bar{r}_{\varepsilon t} \Big|_{t=\tilde{\tau}}, \quad (42)$$

при $k = 1$ и

$$\bar{H}_k = \bar{H}_{k-1} - \frac{1}{k-1} \cdot \frac{d\bar{H}_{k-1}}{d \ln \tilde{\tau}} \Big|_{t=(k-1)\tilde{\tau}}, \quad (43)$$

при $k \geq 2$.

Графическая форма приближений релаксационного спектра текстильной полиэфирной нити 83 текс приведена на рис. 3, из которого видно, что графики релаксационного спектра в первом и в десятом приближениях достаточно близки друг к другу.

Это происходит ввиду того, что приближения релаксационных спектров H_k достаточно быстро сходятся к своим предельным значениям $\bar{H}_{\varepsilon \tilde{\tau}}$, которые и являются искомыми релаксационными спектрами.

На рис. 3 использована логарифмическая шкала приведенного времени

$$\ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} = \ln \frac{t}{t_1} + f_{\varepsilon_1 \varepsilon}, \quad (44)$$

которая в неявном виде содержит деформационную функцию $f_{\varepsilon_1 \varepsilon} = \ln(t_1/\tau_\varepsilon)$, которая отвечает за деформационно-временную аналогию.

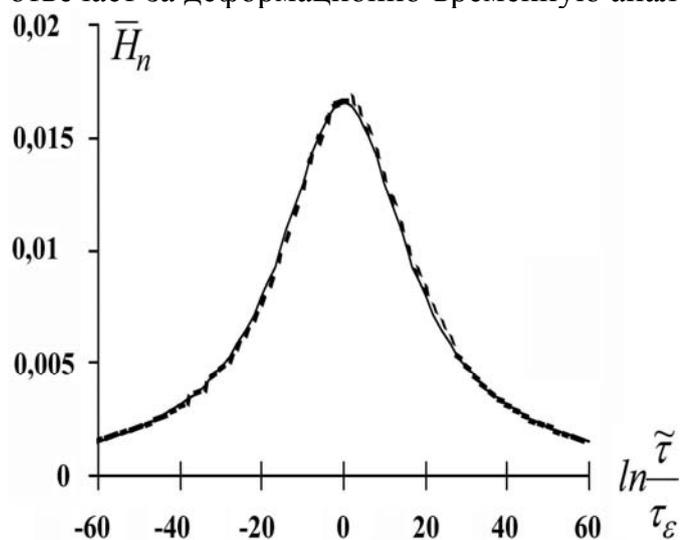


Рисунок 3 - Графическая форма приближений релаксационного спектра текстильной полиэфирной нити 83 текс (первое приближение H_1 - сплошная линия, десятое приближение H_{10} - пунктир)

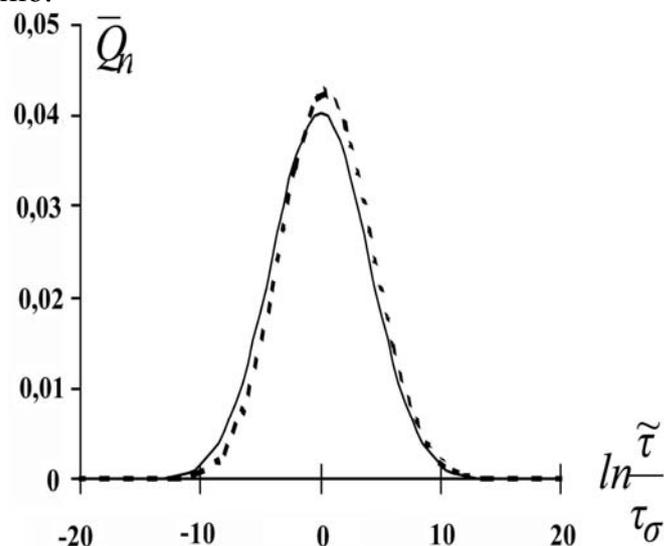


Рисунок 4 - Графическая форма приближений деформационного спектра текстильной полиэфирной нити 83 текс (первое приближение Q_1 - сплошная линия, десятое приближение Q_{10} - пунктир)

В силу сказанного, можно считать, что релаксационные спектры являются обобщенными, то есть соответствуют всему начальному диапазону действия неразрушающего деформирования, на котором при математическом моделировании релаксационных процессов применялась деформационно-временная аналогия.

Релаксационные спектры с большой точностью описываются своими первыми приближениями, в силу того, что все их следующие приближения достаточно быстро сходятся к предельному значению релаксационного спектра, что упрощает задачу.

Таким образом, релаксационные спектры зависят от одного единственного параметра математической модели релаксации - структурного коэффициента интенсивности релаксации $b_{n\varepsilon}$, который вместе с выбранной нормированной релаксационной функцией $\varphi_{\varepsilon t}$ полностью задают их распределение.

Структурный коэффициент $b_{n\varepsilon}$, в свою очередь, численно равен логарифму нормированного времени полурелаксации, то есть временному периоду релаксации половины частиц материала. Другими словами, половина релаксационного процесса с деформацией ε , осуществляется за время $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_\varepsilon) = -b_{n\varepsilon}$, $\ln(t''/\tau_\varepsilon) = b_{n\varepsilon}$.

Функционально-деформационные свойства материалов и изделий ТЛП отражаются интегральным ядром запаздывания $r_{\sigma t}$, связь которого со спектром запаздывания $\bar{Q}_{\sigma \tilde{\tau}}$ может быть выражена формулой:

$$\int_0^\infty \bar{Q}_{\sigma \tilde{\tau}} \cdot e^{-t\tilde{\tau}} \cdot d\tilde{\tau} = \frac{d\varphi_{\sigma t}}{dt} = r_{\sigma t}, \quad (45)$$

которая соответствует преобразованию Лапласа, где спектр запаздывания $\bar{Q}_{\sigma \tilde{\tau}}$ выступает в роли оригинала, а ядро запаздывания $r_{\sigma t}$ выступает в роли изображения.

Приближения нормированного деформационного спектра получаются по формулам:

$$\bar{Q}_1 = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial \ln t} = \varphi'_{\sigma t} = \bar{r}_{\sigma t} \Big|_{t=\tilde{\tau}}, \quad (46)$$

при $k = 1$ и

$$\bar{Q}_k = \bar{Q}_{k-1} - \frac{1}{k-1} \cdot \frac{d\bar{Q}_{k-1}}{d \ln \tilde{\tau}} \Big|_{t=(k-1)\tilde{\tau}}, \quad (47)$$

при $k \geq 2$.

Графическая форма приближений деформационного спектра текстильной полиэфирной нити 83 текс приведена на рис. 4, на котором видно, что графики деформационного спектра в первом и в десятом приближениях достаточно близки.

Это происходит ввиду того, что приближения деформационных спектров Q_k достаточно быстро сходятся к своим предельным значениям $\bar{Q}_{\varepsilon \tilde{\tau}}$, которые и являются искомыми деформационными спектрами.

На рис. 4 использована логарифмическая обобщенная шкала нормированного времени

$$\ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} = \ln \frac{t}{t_1} + f_{\sigma_1 \sigma}, \quad (48)$$

которая в неявном виде содержит силовую функцию $f_{\sigma_1 \sigma} = \ln(t_1/\tau_{\sigma})$, отвечающую за сило-временную аналогию.

В силу сказанного, можно считать, что деформационные спектры являются обобщенными, то есть соответствуют всему начальному диапазону действия неразрушающего напряжения, на котором при математическом моделировании деформационных процессов применялась сило-временная аналогия.

Деформационные спектры с большой точностью могут быть описаны найденными первыми приближениями, в силу того, что все их следующие приближения достаточно быстро сходятся к предельному значению деформационного спектра. Так как первые приближения деформационных спектров определяются значениями структурных коэффициентов интенсивности ползучести $b_{n\sigma}$, то это упрощает решение задачи.

Структурный коэффициент $b_{n\sigma}$, в свою очередь, численно равен логарифму нормированного времени полудеформирования, то есть времени, за которое деформируют половина частиц материала. Другими словами, половина деформационного процесса с нагрузкой σ , осуществляется за время $t \in [t', t'']$, где $\ln(t'/\tau_{\sigma}) = -b_{n\sigma}$, $\ln(t''/\tau_{\sigma}) = b_{n\sigma}$.

В **восьмой главе** описываются разрабатываемые методы проведения системного анализа функционально-релаксационных и функционально-деформационных свойств материалов и изделий ТЛП.

Качественно оценить функционально-релаксационные свойства материалов и изделий ТЛП можно только с применением современных информационных технологий с позиций системного анализа указанных свойств. На функционально-релаксационные свойства изучаемых материалов и изделий ТЛП оказывают влияние множество различных факторов, вклад которых и необходимо оценивать с системных позиций.

Знание функционально-релаксационных свойств материалов и изделий ТЛП помогает провести целенаправленный сравнительный отбор образцов указанных материалов, обладающих требуемыми функциональными характеристиками.

Главными характеристиками релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП являются параметры математических моделей релаксационных процессов этих материалов, среди которых три константы: модуль упругости E_0 , модуль

вязкоупругости E_∞ , параметр интенсивности релаксации $b_{n\varepsilon}$, а также одна функция

$$- f_{\varepsilon_1\varepsilon} = \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon}, \quad (49)$$

задающая распределение времен релаксации $\{\tau_\varepsilon\}$, или их среднее значение:

$$\bar{\tau}_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon \cdot d\varepsilon. \quad (50)$$

Здесь: ε_1 и ε_2 - нижняя и верхняя границы интервала исследуемых деформаций.

При проведении качественной оценки функционально-релаксационных свойств материалов и изделий ТЛП методами системного анализа, по сравнению значений параметров интенсивностей релаксационных процессов этих материалов, можно выяснить насколько быстро могут проходить указанные процессы у разных материалов.

Ответ на вопрос о степени полноты прохождения релаксационных процессов у материалов и изделий ТЛП можно получить, определив асимптотические значения для релаксационного модуля E_0 и E_∞ и используя формулу для определения коэффициента степени релаксации:

$$k_{рел.} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} \cdot 100\%. \quad (51)$$

Большее значение коэффициента степени релаксации соответствует более полной способности материала к релаксации.

Главными характеристиками деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП являются параметры математических моделей деформационных процессов этих материалов, среди которых три константы: начальная податливость D_0 , квазиравновесная податливость D_∞ , параметр интенсивности ползучести $b_{n\varepsilon}$, а также одна функция

$$- f_{\sigma_1\sigma} = \ln \frac{t_1}{\tau_\sigma}, \quad (52)$$

задающая распределение времен запаздывания $\{\tau_\sigma\}$, или их среднее значение:

$$\bar{\tau}_\sigma = \frac{\sigma_0}{\sigma_2 - \sigma_1} \cdot \int_{\sigma_1/\sigma_0}^{\sigma_2/\sigma_0} \tau_\sigma \cdot d\frac{\sigma}{\sigma_0}. \quad (53)$$

Здесь: σ_1 и σ_2 - нижняя и верхняя граница интервала исследуемых напряжений.

При проведении качественной оценки функционально-деформационных свойств материалов и изделий ТЛП методами системного анализа, по сравнению значений параметров интенсивностей деформационных процессов этих материалов, можно выяснить насколько быстро могут проходить указанные процессы у разных материалов.

Ответ на вопрос о степени полноты прохождения деформационных процессов у материалов и изделий ТЛП можно получить, определив асимптотические значения для податливости D_0 и D_∞ и используя формулу для определения коэффициента степени деформирования:

$$k_{деф.} = \frac{D_\infty - D_0}{D_\infty} \cdot 100\%. \quad (53)$$

Большее значение коэффициента степени деформирования соответствует более полной способности материала к деформированию.

При проведении системного анализа деформационно-эксплуатационных свойств

материалов и изделий ТЛП можно проанализировать разложение полной деформации на составляющие ее упругие, вязкоупругие и пластические компоненты.

Указанное разложение можно получить как экспериментально - на основе системного анализа диаграмм растяжения, так и с использованием компьютерного прогнозирования диаграмм растяжения - на основе численных методов.

Системный анализ соотношения компонент упругой, вязкоупругой и пластической деформации позволяет получить представления о внутренних механизмах деформирования материалов.

Проведение системного анализа в части соотношений компонент упругой, вязкоупругой и пластической деформации является необходимым на стадии технологического отбора образцов материалов, обладающих заданными функциональными свойствами, и на стадии производства - с целью недопущения выпуска обладающих нежелательными структурными изменениями материалов.

При проведении экспериментов в режиме деформационно-восстановительных процессов, было установлено, что у материалов и изделий ТЛП в начале этого процесса преобладают вязкоупруго-пластические свойства, значимость которых снижается с увеличением деформирования материалов, когда они уступают свое место упругим свойствам.

Объяснить это можно тем, что в начале деформирования материала в этот процесс включаются геометрические факторы в виде постепенного структурного растягивания решетки. И только, когда геометрические факторы в виде изменения макроструктуры материалов исчерпываются - в деформационный процесс подключаются сами макромолекулы материалов.

Разработанные методы системного анализа релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, а также методы системного анализа для качественной оценки функционально-восстановительных свойств этих материалов и соответствующие компьютерные программы для ЭВМ позволяют решать широкий класс задач по определению эксплуатационных свойств указанных материалов, а также по качественной оценке их функциональности.

В **девятой главе** описано практическое применение разработанных в диссертации методов цифровой экономики по повышению конкурентоспособности материалов и изделий ТЛП.

Проанализированы релаксационно-эксплуатационные и деформационно-эксплуатационные свойства материалов и изделий ТЛП, в частности: различных текстильных нитей, текстильных лент, текстильных тканей, текстильных шнуров и текстильных канатов, отличающихся друг от друга компонентным составом, структурой, линейной плотностью и разрывными характеристиками.

Приведены примеры практического применения разработанных в диссертации методов расчета релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик указанных выше материалов.

В главе также приводятся примеры качественной оценки функциональных свойств материалов и изделий ТЛП, а также варианты использования на практике критериев качественной оценки их релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств.

Для текстильных нитей, технические характеристики которых приведены в табл. 1, были определены релаксационно-эксплуатационные параметры-характеристики (табл. 2) и деформационно-релаксационные параметры характеристики (табл. 3).

Результаты расчета величин $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ для текстильных нитей приведены в табл. 4.

Таблица 1 - Текстильные нити и их технические характеристики

Условное обозначение	Компонентный состав	Линейная плотность, Текс	Разрывная деформация, %	Разрывное напряжение, ГПа
Л-19	Лавсан	19	9,8	0,56
Л-57	Лавсан	57	9,6	0,69
Л-114	Лавсан	114	9,5	0,81
Н-17	Нитрон	17	13,1	0,78
Н-34	Нитрон	34	12,8	0,92
Н-51	Нитрон	51	12,3	1,04
К-91	Капрон	91	13,2	0,98
К-149	Капрон	149	13,1	1,07
К-187	Капрон	187	12,7	1,12
С-32	СВМ	32	2,6	3,21
С-56	СВМ	56	2,5	3,34
С-98	СВМ	98	2,3	3,41

Таблица 2 - Текстильные нити и их релаксационно-эксплуатационные параметры-характеристики

Условное обозначение	E_0 , ГПа	E_∞ , ГПа	$1/b_{n\varepsilon}$	$\bar{\tau}_\varepsilon$, с
Л-19	13,7	4,6	0,13	138
Л-57	13,9	4,3	0,11	135
Л-114	14,2	4,1	0,10	131
Н-17	7,0	2,4	0,34	108
Н-34	7,2	2,3	0,31	104
Н-51	7,5	2,1	0,29	101
К-91	3,9	1,5	0,42	193
К-149	4,1	1,4	0,41	178
К-187	4,2	1,2	0,39	162
С-32	1,7	0,6	0,72	418
С-56	1,6	0,7	0,70	407
С-98	1,4	0,8	0,67	395

Таблица 3 - Текстильные нити и их деформационно-эксплуатационные параметры-характеристики

Условное обозначение	D_0 , ГПа ⁻¹	D_∞ , ГПа ⁻¹	$1/b_{n\sigma}$	$\bar{\tau}_\sigma$, с
Л-19	0,074	0,22	0,17	178
Л-57	0,072	0,23	0,14	174
Л-114	0,071	0,24	0,13	169
Н-17	0,15	0,42	0,44	139
Н-34	0,14	0,43	0,40	134
Н-51	0,13	0,48	0,37	130
К-91	0,26	0,67	0,54	249
К-149	0,24	0,71	0,53	230
К-187	0,23	0,83	0,50	209
С-32	0,59	1,67	0,93	539
С-56	0,63	1,43	0,90	525
С-98	0,71	1,25	0,86	510

Таблица 4 - Величины $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ для текстильных нитей

Условное обозначение	$\alpha_1 = b_{n\varepsilon}$	$\alpha_2 = \frac{E_\infty}{E_0 + E_\infty}$	$\alpha_3 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_p}$	$\alpha_4 = \frac{\bar{\tau}\varepsilon}{t_1}$	$\alpha_5 = \frac{E_\infty}{E_0 - E_\infty}$	$A_p = \sum_{i=1}^5 \alpha_i$
Л-19	7,69	0,25	1,02	0,23	0,51	9,70
Л-57	9,09	0,24	1,04	0,23	0,45	11,0
Л-114	10,0	0,22	1,05	0,22	0,41	11,9
Н-17	2,94	0,26	0,76	0,18	0,52	4,66
Н-34	3,23	0,24	0,78	0,17	0,47	4,89
Н-51	3,45	0,22	0,81	0,17	0,39	5,04
К-91	2,38	0,28	0,76	0,32	0,63	4,36
К-149	2,44	0,25	0,76	0,30	0,52	4,27
К-187	2,56	0,22	0,79	0,27	0,40	4,24
С-32	1,39	0,26	3,85	0,70	0,55	6,74
С-56	1,43	0,30	4,00	0,68	0,78	7,19
С-98	1,49	0,36	4,35	0,66	1,33	8,20

На основе применения критериев R1-R5 качественной оценки релаксационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП к текстильным нитям (табл. 4), можно сделать следующие выводы.

1. Наилучшей интенсивностью восстановления материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации обладает текстильная нить С-32, у которой минимальное значение величины α_1 : $\alpha_1 = 1,39$. Наихудшей - текстильная нить Л-114, у которой максимальное значение $\alpha_1 = 10,00$.

2. Наилучшей степенью восстанавливаемости материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации обладают сразу три объекта: текстильная нить Л-114, текстильная нить Н-51 и текстильная нить К-187, у которых минимальное значение величины α_2 : $\alpha_2 = 0,22$. Наихудшей - текстильная нить С-98, у которой максимальное значение $\alpha_2 = 0,36$.

3. Наилучшей возможностью многократного восстановления материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации обладают сразу три объекта: текстильная нить Н-17, текстильная нить К-91 и текстильная нить К-187, у которых минимальное значение величины α_3 : $\alpha_3 = 0,76$. Наихудшей - текстильная нить С-98, у которой максимальное значение $\alpha_3 = 4,35$.

4. Наилучшим временным восстановлением функционально-потребительских свойств материалов и изделий ТЛП после их эксплуатации обладают сразу два объекта: текстильная нить Н-34 и текстильная нить К-5, у которых минимальное значение величины α_4 : $\alpha_4 = 0,17$. Наихудшим - текстильная нить С-32, у которой максимальное значение $\alpha_4 = 0,70$.

5. Наилучшей устойчивостью материалов и изделий ТЛП к многократному восстановлению своих функционально-потребительских свойств после их эксплуатации обладает текстильная нить Н-51, у которой минимальное значение величины α_5 : $\alpha_5 = 0,39$. Наихудшей - текстильная нить С-98, у которой максимальное значение $\alpha_5 = 1,33$.

Результаты расчета величин $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ для текстильных нитей приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Величины $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ для текстильных нитей

Условное обозначение	$\beta_1 = b_{n\sigma}$	$\beta_2 = \frac{D_o}{D_o + D_\infty}$	$\beta_3 = \frac{\sigma_0}{\sigma_p}$	$\beta_4 = \frac{\tau_\sigma}{t_1}$	$\beta_5 = \frac{D_o}{D_\infty - D_o}$	$B_d = \sum_{i=1}^5 \beta_i$
Л-19	5,88	0,25	1,79	0,30	0,51	8,72
Л-57	7,14	0,24	1,45	0,29	0,46	9,58
Л-114	7,69	0,23	1,23	0,28	0,42	9,86
Н-17	2,27	0,26	1,28	0,23	0,56	4,61
Н-34	2,50	0,25	1,09	0,22	0,48	4,54
Н-51	2,70	0,21	0,96	0,22	0,37	4,47
К-91	1,85	0,28	1,02	0,42	0,63	4,20
К-149	1,89	0,25	0,93	0,38	0,51	3,97
К-187	2,00	0,22	0,89	0,35	0,38	3,84
С-32	1,08	0,26	0,31	0,90	0,55	3,09
С-56	1,11	0,31	0,30	0,88	0,79	3,38
С-98	1,16	0,36	0,29	0,85	1,31	3,98

На основе применения критериев D1-D5 качественной оценки деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП к текстильным нитям (табл. 5), можно сделать следующие выводы.

1. Наилучшей интенсивностью деформирования материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации обладает текстильная нить С-32, у которой минимальное значение величины β_1 : $\beta_1 = 1,08$. Наихудшей - текстильная нить Л-114, у которой максимальное значение $\beta_1 = 7,69$.

2. Наилучшей степенью деформируемости материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации обладает текстильная нить Н-51, у которой минимальное значение величины β_2 : $\beta_2 = 0,21$. Наихудшей - текстильная нить С-98, у которой максимальное значение $\beta_2 = 0,36$.

3. Наилучшей возможностью многократного деформирования материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации обладает текстильная нить С-98, у которой минимальное значение величины β_3 : $\beta_3 = 0,29$. Наихудшей - текстильная нить Л-19, у которой максимальное значение $\beta_3 = 1,79$.

4. Наилучшим временным деформационным воздействием на материалы и изделия ТЛП в процессе их эксплуатации обладают сразу два объекта: текстильная нить Н-34 и текстильная нить Н-51, у которых минимальное значение величины β_4 : $\beta_4 = 0,22$. Наихудшим - текстильная нить С-32, у которой максимальное значение $\beta_4 = 0,90$.

5. Наилучшей устойчивостью материалов и изделий ТЛП к многократному деформированию материалов и изделий ТЛП в процессе их эксплуатации обладает текстильная нить Н-51, у которой минимальное значение величины β_5 : $\beta_5 = 0,37$. Наихудшей - текстильная нить С-98, у которой максимальное значение $\beta_5 = 1,31$.

При этом, надо иметь в виду, что анализируемые релаксационно-эксплуатационные и деформационно-эксплуатационные свойства материалов и изделий ТЛП, наилучшие по одному критерию, могут получить худшую оценку по другому критерию.

В силу этого, целесообразно применять комплексные критерии оценки релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, которые учитывают качественную оценку этих свойств указанных материалов по нескольким имеющимся критериям одновременно.

ВЫВОДЫ

1. Параметры-характеристики предложенных математических моделей релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП, как количественные характеристики этих свойств, являются основой для разработки критериев их качественной оценки.

2. Методы численного прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП служат основой для перехода к цифровому компьютерному формату динамической (во времени) оценки эксплуатационных свойств указанных материалов.

3. Разработанные интегральные критерии точности математического моделирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов материалов и изделий ТЛП позволяют определить степень адекватности такого моделирования и оптимизировать выбор самих математических моделей с целью достижения наибольшей точности такого моделирования.

4. Для качественной оценки релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП предложено десять локальных критериев и четыре интегрированных критерия комплексной оценки указанных свойств этих материалов.

5. Предлагаемые методы определения спектров времен релаксации и времен запаздывания материалов и изделий ТЛП позволяют прояснить внутренние временные механизмы релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов указанных материалов, знание которых является особенно важным при проектировании текстильных изделий, подвергающимся быстромменяющимся во времени силовым и деформационным воздействиям.

6. Переход от количественной оценки эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП к качественной оценке функциональности этих материалов осуществляется посредством предложенного изоморфизма (взаимно-однозначного соответствия) между количественными параметрами указанных математических моделей и качественными характеристиками функциональности этих материалов.

7. Предложенные методы вычисления релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП целесообразно применять на стадии их проектирования и организации их производства с целью повышения конкурентоспособности проектируемой текстильной продукции и контролем за ее производством.

8. Разработанные математические модели эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП и предложенный изоморфизм этих свойств с функциональными характеристиками указанных материалов позволяют проводить качественную оценку функциональности виртуальных цифровых образцов проектируемых материалов, не прибегая к дорогостоящему выпуску опытных партий продукции и к натурному эксперименту.

9. Разработанные цифровые методы количественной оценки эксплуатационных свойств проектируемых материалов и изделий ТЛП, так же как и методы качественной оценки их функциональности, позволяют осуществлять системный контроль за качеством самих проектируемых изделий и за выпуском готовой продукции заданной функциональности.

10. Практическое применение разработанных в диссертации методов цифровой экономики по повышению конкурентоспособности материалов и изделий ТЛП является основой для проектирования и организации производства инновационной продукции с заданными функциональными характеристиками и с заданными эксплуатационными свойствами.

11. Разработанные в диссертации методы количественной оценки эксплуатационных свойств материалов и изделий ТЛП и качественные методы оценки их функциональности были успешно апробированы на ведущих отраслевых предприятиях России и показали свою перспективность.

Статьи в Web of Science и Scopus, входящие в "Перечень ВАК" по специальности 05.02.22

1. Макаров, А.Г. Разработка методов математического моделирования процессов релаксации и ползучести полимерных нитей на основе их спектральной интерпретации / Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. // Химические волокна - 2017 - № 1 - С. 69-73.
англ. версия.: Makarov, A.G. Development of methods of mathematical modeling of processes of relaxation and creep of polymer filaments based on a spectral interpretation / Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. // Fibre Chemistry - 2017 - Vol. 49 - No. 1 - P. 70-75.
2. Макаров, А.Г. Разработка критериев достоверности прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных материалов / Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. // Химические волокна - 2017 - № 2 - С. 59-63.
англ. версия.: Makarov, A.G. Development of criteria for reliability of the prediction of the deformation and relaxation processes of polymeric materials / Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. // Fibre Chemistry - 2017 - Vol. 49 - No. 2 - P. 137-141.
3. Демидов, А.В. Варианты математического моделирования и системного анализа механической релаксации и ползучести полимерных материалов / Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А. // Химические волокна - 2017 - № 4 - С. 46-51.
англ. версия.: Demidov, A.V. Variants of mathematical simulation and systems analysis of mechanical relaxation and creep of polymer materials / Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. // Fibre Chemistry - 2017 - Vol. 49 - No. 4 - P. 275-280.
4. Demidov, A.V. Forecasting of deformation-relaxation properties of poly amide fabric used to make the canopy / Demidov A.V., Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2017 - № 1 - P. 250-258.
5. Makarov, A.G. Quality analysis of deformation-relaxation properties of aramid cords mountain rescue appointments / Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2017 - №2 - P. 309-313.
6. Makarov, A.G. Mathematical modeling of deformation-relaxation processes polymeric materials in conditions of variable temperatures / Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Egorov I.M. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2017 - №4 - P. 287-292
7. Pereborova, N.V. Methods of mathematical modeling and qualitative analysis of relaxation-deformation processes of aramide textile materials / Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S., Vasileva E.K. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2018 - № 2 - P. 251-255.
8. Pereborova, N.V. Methods of increasing the competitiveness of domestic aramid textile materials based on complex analysis of their functional properties / Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2018 - № 6 - с. 267-272.
9. Переборова, Н.В. Моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов - основа анализа их эксплуатационных свойств / Переборова Н.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С. // Химические волокна - 2018 - № 2 - С. 36-39.
англ. вариант: Pereborova, N.V. Modeling of Deformation-Relaxation Processes of Aramid Textile Materials - the Foundation for Analyzing Their Operational Properties / Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. // Fibre Chemistry - 2018 - Vol. 50 - No. 2 - P. 104-107.
10. Макаров, А.Г. Компьютерное прогнозирование и качественный анализ полимерных парашютных строп / Макаров А.Г., Переборова Н.В., Козлов А.А., Шванкин А.М. // Химические волокна - 2018 - № 3 - С. 94-97.
англ. вар.: Makarov, A.G. Computer-Assisted Prediction and Qualitative Analysis for Polymer Parachute Cords / Makarov A.G., Pereborova N.V., Kozlov A.A., Shvankin A.M. // Fibre Chemistry - 2018 - Vol. 50 - No. 3 - P. 239-242.
11. Переборова, Н.В. Разработка интегральных критериев оптимальности математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Козлов А.А., Васильева Е.К. // Химические волокна - 2018 - № 4 - С. 54-56.
англ. вар.: Pereborova, N.V. Development of Integral Optimality Criteria for Mathematical Modeling of Relaxation/Recovery Processes in Polymer Textile Materials / Pereborova N.V., Makarov

/ Pereborova N.V., Makarov A.G., Kozlov A.A., Vasil'eva E.K. // Fibre Chemistry - 2018 - Vol. 50 - No. 4 - P. 306-309.

12. Макаров, А.Г. Спектральный анализ вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов / Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Егорова М.А., Климова Н.С. // Химические волокна - 2018 - № 4 - С. 117-120.

англ. вариант: Makarov, A.G. Spectral Analysis of Viscoelastic Creep of Nonwoven Geotextiles / Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova, N.S. // Fibre Chemistry - 2018 - Vol. 50 - No. 4 - P. 378-382.

13. Переборова, Н.В. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформационно-восстановительных свойств и усадки арамидных текстильных материалов / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Козлов А.А. // Химические волокна - 2018 - № 5 - С. 89-92.

англ. вар.: Pereborova, N.V. Mathematical Modeling and Comparative Analysis of Deformation/Recovery Properties and Shrinkage of Aramid Textile Materials / Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A. // Fibre Chemistry - 2019 - Vol. 50 - No. 5 - P. 468-472.

14. Переборова, Н.В. Математическое моделирование и компьютерное прогнозирование вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Васильева Е.К., Шванкин А.М., Егоров И.М. // Химические волокна - 2018 - № 6 - С. 3-6.

англ. вариант: Pereborova, N.V. Mathematical Modeling and Comparative Analysis of Deformation/Recovery Properties and Shrinkage of Aramid Textile Materials / Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A. // Fibre Chemistry - 2019 - Vol. 50 - No. 5 - P. 468-472.

15. Переборова, Н.В. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования и анализа их эксплуатационных свойств / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Климова Н.С. // Химические волокна - 2018 - № 6 - С. 87-90.

англ. вариант: Pereborova, N.V. Improving the Competitiveness of Aramid Textile Materials Based on Mathematical Modeling and Analysis of Their Performance Properties / Pereborova N.V. Makarov A.G. Egorova M.A. Klimova N.S. // Fibre Chemistry - 2019 - Vol. 50 - No. 6 - P. 569-572.

16. Pereborova, N.V. Spectral analysis of viscoelasticity of geotextile nonwave towels and its application for the estimation of their functionalit / Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2019 - № 2 - P. 192-198.

17. Pereborova, N.V. Increase of competitiveness of polymeric textile materials on the basis of application of integral criteria of reliability of mathematical modeling of viscoelastic elasticity at the stage of their design and organization of production / Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2019 - № 3 - P. 242-247.

18. Pereborova, N.V. Mathematical modeling and designed forecasting of viscole elasticity of geotextile nonwoven towels means of evaluating their functional-operational purpose / Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti - 2019 - № 4 - P. 229-234.

19. Переборова, Н.В. Моделирование и качественный анализ процессов ползучести геотекстильных нетканых материалов - основа повышения их конкурентоспособности / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Абрамова И.В. // Химические волокна - 2019 - № 5 - С. 68-70.

англ. вариант: Pereborova, N.V. Modeling and Qualitative Analysis of Creep Processes of Geotextile Nonwovens -A Foundation for Enhancing their Competitiveness / Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Abramova I.V. // Fibre Chemistry - 2020 - Vol. 51 - No. 5 - P. 397-400.

20. Переборова, Н.В. Прогнозирование ползучести, деформационных и восстановительных процессов геотекстильных нетканых материалов / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Шванкин А.М., Егорова М.А., Коробовцева А.А. // Химические волокна - 2019 - № 5 - С. 71-73

англ. вариант: Pereborova, N.V. Modeling and Qualitative Analysis of Creep Processes of Geotextile Nonwovens -A Foundation for Enhancing their Competitiveness / Pereborova N.V., Makarov A.G., Shvankin A.M., Egorova M.A., Abramova I.V. // Fibre Chemistry - 2020 - Vol. 51 - No. 5 - P. 397-400.

21. Переборова, Н.В. Методы моделирования и компьютерного прогнозирования релаксации текстильных эластомеров медицинского назначения / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егорова М.А., Егоров И.М. // Химические волокна - 2019 - № 6 - С. 57-59.

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

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

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

23. Макаров, А.Г. Математическое моделирование и методы определения функционально-потребительских релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов / Макаров А.Г., Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 3-7.

24. Переборова, Н.В. Методы численного прогнозирования релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Егоров И.М., Вагнер В.И. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 21-24.

25. Переборова, Н.В. Критерии качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 39-42.

26. Демидов, А.В. Методы системного анализа релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / Демидов А.В., Переборова Н.В., Макаров А.Г., Киселев С.В. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 28-31.

27. Егоров, И.М. Математическое моделирование и системный анализ вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов / Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 48-51.

28. Егорова, М.А. Разработка методов улучшения функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов / Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Демидов А.В. // Химические волокна - 2020 - № 3 - С. 64-67.

29. Макаров, А.Г. Математические модели и методы определения деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / Макаров А.Г., Переборова Н.В., Козлов А.А. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 3-7.

30. Переборова, Н.В. Компьютерное прогнозирование функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / Переборова Н.В., Макаров А.Г., Киселев С.В., Егоров И.М. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 20 -- 21.

31. Переборова, Н.В. Критерии качественной оценки деформационно-функциональных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения / Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 37 - 40.

32. Егоров, И.М. Оценка эксплуатационных свойств морских полимерных канатов на основе компьютерного прогнозирования их вязкоупруго-пластических свойств / Егоров И.М., Макаров А.Г., Егорова М.А., Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 63 - 67.

33. Егорова, М.А. Методы качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов / Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Макарова А.А. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 68-70.

34. Киселев, С.В. Оптимизация математического моделирования функционально-потребительских процессов полимерных материалов специального и двойного назначения / Киселев С.В., Переборова Н.В., Макаров А.Г. // Химические волокна, 2020, № 4, с. 71-73.

35. Макаров, А.Г. Применение спектрального моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов при исследовании их функциональности / Макаров А.Г., Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 74-77.

36. Чалова, Е.И. Учет влияния переменной температуры при математическом моделировании релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов / Чалова Е.И., Переборова Н.В. // Химические волокна - 2020 - № 4 - С. 54 - 56.

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

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

Статьи в изданиях, входящих в "Перечень ВАК" по специальности 05.02.22

39. Переборова, Н.В. Методология математического моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов / Переборова Н.В., Егорова М.А., Шванкин А.М. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 29 - № 1 - С. 20 - 28.

40. Переборова, Н.В. Прогнозирование сложных деформационных процессов полимерных материалов, используемых для производства обуви / Переборова Н.В., Шванкин А.М., Ковтун М.А. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 29 - № 1 - С. 38 - 46.

41. Переборова, Н.В. Методы моделирования вязкоупругости полимерных волокнистых материалов сложного строения / Переборова Н.В., Шванкин А.М., Козлов А.А. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 29 - № 1 - С. 51 - 59.

42. Переборова, Н.В. Методология компьютерного моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов / Переборова Н.В. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 30 - № 2 - С. 33 - 42.

43. Переборова, Н.В. Системный анализ деформационных свойств текстильных материалов сложной структуры / Переборова Н.В., Климова Н.С. [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 31 - № 3 - С. 87 - 94.

44. Егорова, М.А. Методы системного анализа вязкоупруго-пластических свойств морских полимерных канатов / Егорова М.А., Переборова Н.В. [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 31 - № 3 - С. 110 - 119.

45. Демидов, А.В. Прогнозирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов - основа качественного анализа их эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств / Демидов А.В., Переборова Н.В., Климова Н.С. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 32 - № 4 - С. 106 - 113.

46. Переборова, Н.В. Логистическая модель процесса организации склада готовых изделий текстильной и легкой промышленности / Переборова Н.В., Максимова Н.А. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 32 - № 4 - С. 114 - 117.

47. Переборова, Н.В. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе качественного анализа их эксплуатационно-деформационных свойств / Переборова Н.В. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 32 - № 4 - С. 123 - 132.

48. Переборова, Н.В. Прогнозирование усадочных и восстановительных свойств арамидных текстильных материалов / Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. - 2017 - т. 32 - № 4 - С. 142 - 150.

49. Переборова, Н.В. Моделирование сложных режимов деформирования полимерных текстильных материалов как инструмент оценки и улучшения их функционально-эксплуатационных свойств / Переборова Н.В., Климова Н.С. [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки - 2017 - № 5 - С. 85-92.

50. Переборова, Н.В. Исследование деформационных свойств арамидных текстильных материалов с целью улучшения их функционально-эксплуатационных характеристик / Переборова Н.В., Климова Н.С. [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки - 2017 - №5 - С. 118-126.