

На правах рукописи



**КАЩЕЕВ ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К  
ОЦЕНКЕ, МОДЕЛИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность 2.6.16. Технология производства изделий  
текстильной и легкой промышленности**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

**Москва – 2025**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» (ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина») на кафедре Материаловедения и товарной экспертизы.

Научный консультант: **Шустов Юрий Степанович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Материаловедения и товарной экспертизы ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»

Официальные оппоненты: **Киселев Михаил Владимирович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Автоматики, микропроцессорной техники и технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет»

**Трещалин Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Семиотики и общей теории искусства ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (факультет искусств)

**Азанова Альбина Альбертовна** – доктор технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой Материалов и технологий легкой промышленности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново

Защита состоится «17» декабря 2025 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.368.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» по адресу: 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и на официальном сайте университета [www.rguk.ru](http://www.rguk.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.368.02

Мезенцева Татьяна Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современное развитие науки и техники, переход к Индустрии 4.0 предполагают существенное усложнение задач проектирования и изготовления изделий с высокими показателями эксплуатационных свойств, сжатыми сроками их проектирования, производства и внедрения, отвечает задачам циркулярной экономики.

Именно с этих позиций следует рассматривать развитие отечественной текстильной промышленности, которая в условиях серьезных санкций и ухода зарубежных компаний, имеет огромный потенциал для роста, развития и импортозамещения, оцениваемый Министерством промышленности и торговли Российской Федерации в 1,5 трлн. рублей.

К особой категории текстильных изделий, которая согласно сводной Стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2035 года, является приоритетной, относится технический текстиль, на долю которого в будущем должно приходиться более 50% от всего объема производства текстильных материалов.

Производство технического текстиля, как наиболее наукоемкого ассортимента текстильных материалов, аккумулирует в себе необходимость решения целого комплекса задач, таких как: обоснованный выбор исходного волокнистого сырья; реализация технологических способов и различных технических приемов его переработки и структурообразования в текстильные полотна; выбор критериев оценки качества готовой продукции с учетом ее назначения и условий эксплуатации; возможность вторичной переработки и утилизации отходов производства. Производство материалов с заданными свойствами – драйвер развития текстильной промышленности.

Разработка технологий создания новых материалов с заданными свойствами и цифровизация всех этапов их проектирования соответствует положениям Указов Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. №145 и от 18 июня 2024 г. № 529.

Применение системно-функционального подхода к прогнозированию свойств текстильных материалов и их проектированию обеспечит решение задачи по созданию «умного текстиля», материалов с заданными свойствами.

«Smart textile» – тренд развития технического текстиля, включающее в себя не только цифровые технологии, но и «управляемые» технологии, «послушные», многофункциональные универсальные саморегулируемые материалы, способные к адаптивному функционированию при изменении внешней и внутренней среды, обеспечивающие термостабилизационный эффект в условиях интервальных нагрузок.

Решение такого спектра задач, рассматривающего во взаимосвязи все стадии переработки исходного волокнистого сырья в готовую продукцию с заранее прогнозируемой структурой и комплексом потребительских свойств, сопряжено с привлечением математического аппарата, современных средств вычисления, методов моделирования для совершенствования функциональных свойств текстильных изделий.

Цифровизация производства, «гибкие» промышленные системы, ключевую роль в архитектуре которых играют цифровые двойники, позволяют управлять характеристиками моделируемых продуктов, заменяют реальный эксперимент в проектировании изделий, расширяют возможности прогнозирования и оценки качества разрабатываемых изделий.

Все это позволяет утверждать, что диссертационная работа по разработке комплексного научно-методологического подхода к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемами развития и совершенствования проектирования и оценкой свойств текстильных материалов занимались Кукин Г.Н., Севостьянов А.Г., Соловьев А.Н., Кобляков А.И., Перепелкин К.Е., Куличенко А.В., Коган А.Г., Гусев Б.Н., Матрохин А.Ю., Смирнова Н.А., Плеханов А.Ф., Разумеев К.Э., Юхин С.С., Шустов Ю.С., Трещалин М.Ю., Трещалин Ю.М., Щербаков В.П., Рыклин Д.Б., Кирсанова Е.А., Бешапошникова В.И. и др.

Значительный вклад в области прогнозирования свойств текстильных материалов внесли российские и зарубежные ученые: Киселев М.В., Лапшин В.В., Саркисов В.Ш., Николаев С.Д., Москин И.В., Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М., Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Севостьянов П.А., Хейфиц Л.И., Милашнос В-М.М., Кузнецов А.А., Алексеева Л.В., Foster G.A.R., Wirtindale J., Cox D., Brag X.L., Gatling X.H., Acar M., Krenzer E., Bosch F.Elsner J.B., Tsonis A.A., No Kong Myung, Hearle I.W.S., Winkler F., Elsner J.B. и др.

Несмотря на многочисленные исследования, в современных условиях глобализации и цифровизации мировой экономики, особую значимость приобретают решения, связанные с прогнозированием и управлением качеством изделий, разработкой новых современных компьютерных технологий и методов математического моделирования продуктов с заданными свойствами.

**Области исследования.** Работа выполнена в соответствии с п. 2. Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности; п. 7. Цифровое прогнозирование, математические методы, информационные технологии моделирования технологических процессов первичной обработки сырья, организации производства и изготовления волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности; п. 10. Развитие теоретических основ проектирования и технологий переработки волокон, производства нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности; паспорта научной специальности 2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности».

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационного исследования является научное обоснование и разработка методологии комплексной оценки, моделирования и прогнозирования функциональных свойств текстильных материалов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

– разработан комплексный научно-методологический подход к

определению совокупного влияния характеристик исходного волокнистого сырья и технологических параметров его переработки на качество проектируемой продукции;

- предложена концептуальная модель описания технологического процесса получения текстильного материала с заданными свойствами путем решения системы математических соотношений;

- проанализирована взаимосвязь структуры и свойств исходного волокнистого сырья, а также морфология их трансформации на всех этапах технологического процесса переработки;

- обосновано использование причинно-следственной теории информации, позволяющей установить факторы, оказывающие существенное воздействие на качество готовой продукции, автоматизировать трудоемкие методы расчета влияния исходных показателей сырья и полуфабрикатов на функциональные свойства готовой продукции;

- проанализированы зависимости физико-механических показателей текстильных материалов от их сырьевого состава, разработаны имитационные модели изменения их деформационных свойств;

- применен метод комплексной оценки качества текстильной продукции, как универсальный ее показатель;

- предложена методика обработки экспериментальных данных с использованием имитационного статистического моделирования для оценки свойств текстильных материалов;

- разработаны методики статистического моделирования и автоматизированной обработки данных для прогнозирования свойств текстильных материалов.

Исследования проводились на кафедре материаловедения и товарной экспертизы, в рамках плана научно-исследовательских работ РГУ им. А.Н. Косыгина 2019-2023 гг.: «Создание средств, методов оценки и прогнозирования качества материалов с заданными свойствами»; «Оценка и прогнозирование свойств текстильных материалов специального и бытового назначения»; «Методики оценки и прогнозирование свойств, математические модели для прогнозирования показателей качества тканей специального и бытового назначения».

**Объектом исследования** является комплексный подход к оценке качества текстильных материалов с заданными функциональными свойствами.

**Предмет исследования:** методы и средства оценки, моделирования и прогнозирования свойств текстильных материалов.

**Методология, методы и средства исследований.** В работе использованы средства исследования свойств материалов, методы контроля качества текстильных материалов, систематизации и классификации. При выполнении работы использованы теоретические и научно-практические основы моделирования свойств текстильных материалов, положения теоретической метрологии, теории оптимизации, принятия решений и алгоритмизации, методы прикладной логики, визуализации информации, моделирования, экспертных оценок, статистического, факторного, корреляционного и регрессионного анализа,

системно-аналитический подход, применены модели Максвелла, Кельвина-Фойгта, Сан-Венана. Информационно-теоретической базой диссертации послужили труды отечественных и зарубежных ученых в исследуемых и смежных областях, справочная литература. Обработка экспериментальных данных проводилась с привлечением методов имитационного статистического моделирования, бутстреп-метода; методик статистического моделирования и автоматизированной обработки данных. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях. В работе использованы разнообразные стандартные лицензионные программные продукты.

#### **Научная новизна исследования:**

– разработан комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию свойств текстильных материалов, включающий взаимосвязь структурных и физико-механических характеристик исходного волокнистого сырья, технологических параметров его переработки в полуфабрикаты и готовые изделия, направленный на достижение требуемых функциональных характеристик и улучшение качества готовой продукции;

– сформулирован концептуальный подход к моделированию процессов получения текстильных материалов с заданными свойствами;

– с использованием методов математического анализа и компьютерного моделирования выявлено влияние рецептурно-технологических факторов на поведение сложных систем создания текстильных материалов, как независимо друг от друга, так и в различном их сочетании, и на прогнозируемые показатели готовой продукции;

– предложена концепция оценки трансформации структуры и свойств текстильных материалов на всем протяжении их производства от исходных волокон до готовых изделий, позволяющая прогнозировать их поведение в различных условиях эксплуатации;

– проанализированы классические одно- и многозвенные математические модели деформации материалов на предмет их применимости к волокнистым материалам, отличающимся большим статистическим разбросом параметров, входящих в модели. Установлено, что статистический разброс значений основных характеристик функциональных свойств текстильных материалов приводит к асимметричным распределениям величин деформации образцов и неопределенности их значений;

– предложена методика и осуществлена оценка динамики изменения деформационных свойств различных текстильных материалов, включающая не только зависимость от их усредненных показателей, но и от формы распределения результатов измерений;

– разработана комплексная методика компьютерного имитационного моделирования зависимости функциональных свойств текстильных материалов от случайных вариаций их характеристик по всем стадиям технологических переходов. Рекомендовано вместо традиционно используемых средних значений применять медианные оценки и интердециальный размах, использовать метод размножения выборок – бутстреп-метод, который позволяет оценивать готовую продукцию при малом, ограниченном числе исходных образцов;

- разработана методика обработки результатов натуральных испытаний с помощью имитационного моделирования и автоматизированной обработки данных, позволяющая оценить динамику изменения деформации материала под воздействием различных факторов, включая эффекты упругой, эластической и пластической деформации материала;

- предложена методика и разработаны компьютерные статистические модели имитации прогнозируемых свойств различных текстильных материалов в цифровой среде, что позволяет создать виртуальный испытательный полигон для комплексной оценки качества текстильных материалов и перейти в цифровой формат.

**При этом впервые получены следующие научные результаты:**

- описана морфология влияния свойств исходных материалов на всем протяжении технологического процесса на качество готовой продукции, позволяющая оптимизировать процесс формирования текстильных материалов с высокими показателями эксплуатационных свойств;

- предложен комплексный подход к определению свойств, оказывающих существенное влияние на качество готовой продукции на протяжении всего производственного цикла;

- установлены причинно-следственные связи для определения функциональных свойств прогнозируемых параметров, исследуемых материалов, выявлены их наиболее значимые показатели, использованы современные компьютерные системы для осуществления трудоемких методов расчета;

- осуществлен анализ применения традиционных одно- и многозвенных моделей деформационных свойств волокнистых материалов, предложена методика оценивания ее динамики и воздействие на ряд показателей текстильных материалов;

- установлены отклонения в поведении различных классических стандартных моделей деформации применительно к волокнистым материалам (модели Максвелла, Кельвина-Фойгта, Сен-Венана и др.);

- предложена новая экспериментальная методика, позволяющая повысить точность идентификации изменений деформационных свойств текстильных материалов под воздействием внешних сил, включая проявления упругой, эластической, пластической деформаций материала;

- рекомендовано применять метод размножения выборок – бутстреп-метод для определения усредненных значений коэффициентов регрессии при малом, ограниченном, числе исходных образцов текстильных материалов;

- разработаны компьютерные статистические модели, имитирующие результаты натуральных исследований механических свойств полиамидных и смесовых тканей, нетканых волокнистых материалов.

**Экспериментально установлены:**

- зависимости физико-механических свойств хлопчатобумажной пряжи от волокнистого состава хлопка при ее производстве, выявлены наиболее значимые показатели, оказывающие существенное влияние на качество готовой продукции;

- закономерности, позволяющие прогнозировать разрывную нагрузку тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка с использованием теории

подобия и анализа размерностей для исследования поведения исходных волокон в готовой продукции;

- зависимости влияния процентного содержания натуральных и химических волокон на физико-механические показатели текстильной продукции;

- статистический разброс значений ряда механических показателей, исследуемых моделей приводит к асимметричным распределениям величин деформации образцов. Предложено при обработке результатов экспериментов, вместо традиционно используемых средних значений, применять их медианные оценки, а вместо среднеквадратических оценок рассеивания использовать робастные методы оценки интердецильного размаха;

- целесообразность применения методики обработки результатов натуральных испытаний текстильных материалов с использованием численных методов нелинейного регрессионного анализа, альтернативных критериев оценивания коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована решением научной проблемы разработки комплексного научно-методологического подхода к оценке качества текстильных материалов на основе систематизации знаний, включающая:

- применение системно-функционального подхода к свойствам текстильных изделий в зависимости от способов их производства;

- структурирование базы знаний о влиянии различных факторов на функциональные свойства готовой продукции, моделированием взаимосвязей между параметрами проектируемого изделия в зависимости от его целевого назначения и прогнозированием их свойств по всем технологическим переходам;

- формулировку теоретических представлений об изменении физико-механических свойств от случайных вариаций различных параметров, приводящих к асимметричным распределениям величин деформации исследуемых образцов и компьютерные статистические модели имитации результатов научных исследований.

**Практическую значимость** составляют:

- методики обработки результатов натуральных испытаний различных текстильных материалов, основанных на использовании математических уравнений и имитационного моделирования, описывающего технологические процессы и функциональные зависимости их свойств;

- компьютерные модели, позволяющие исследовать поведение сложных систем и происходящих в них процессов, выявлять влияние различных факторов на прогнозируемые показатели как независимо друг от друга, так и в их сочетании;

- функциональные и математические зависимости физико-механических характеристик текстильных материалов от процентного содержания различных видов волокон, геометрических, структурных и физико-механических их характеристик для определения оптимальных условий их получения и переработки.

Теоретические и методологические положения работы использованы на ряде текстильных предприятий Российской Федерации. Результаты диссертационной работы внедрены на ООО «Термопол», ООО «Синтекс», АО КШФ «Передовая текстильщица», АО «Лента», ООО «Ишимбайский трикотаж», что свидетельствует о

состоятельности предлагаемых в диссертации решений; применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» по направлениям подготовки кафедры материаловедения и товарной экспертизы.

**Положения, выносимые на защиту:**

– научно-обоснованный комплексный подход к оценке и моделированию свойств текстильных материалов, применение которого позволяет всесторонне оценивать и прогнозировать качество получаемого продукта при сокращении материалоемкости, трудоемкости и времени на проведение испытаний за счет использования современных математических методов моделирования и высокопроизводительных вычислительных систем;

– методика обработки результатов натуральных испытаний с применением численных методов нелинейного регрессионного анализа, имитационного моделирования и программных средств автоматической обработки данных, что позволяет создавать виртуальный полигон для комплексной оценки текстильных материалов;

– концепция проектирования функциональных свойств текстильных материалов различного волокнистого состава;

– методика анализа одно- и многозвенных математических моделей деформации текстильных материалов, отличающихся большим разбросом параметров, входящих в модели;

– компьютерное моделирование результатов натуральных испытаний механических и эксплуатационных свойств для различных текстильных материалов на основе статистических данных, что позволяет осуществлять решение многокритериальной задачи повышения качества текстильных материалов.

**Достоверность** научных положений базируется на общенаучных подходах системного и концептуального анализа, сравнения, группировки и классификации рассматриваемых объектов. При выполнении исследований использованы основные положения теории подобия и анализа размерностей, теории оптимизации, стандартные методы и средства исследования материалов. Полученные результаты обрабатывались с применением методов автоматизированного проектирования, визуализации полученной информации. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях.

Достоверность полученных выводов подтверждается согласованностью аналитических и экспериментальных результатов, применением современных методов исследований, апробацией основных положений диссертации в научной периодической печати и на конференциях, актами внедрения на ряде предприятий.

**Апробация и внедрение результатов работы.**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены в 2014-2024 гг. на следующих конференциях:

Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения проф. А.И. Коблякова (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024), Международной научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения проф. А.П. Жихарева. (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023), Международной научно-технической

конференции «Инновации 2022» (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023), «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)» (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2016), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и технологии текстильной и легкой промышленности» (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2016), Международной научно-технической конференции Витебского государственного технологического университета «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности» (ВГТУ, 2014), Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2022, 2015, 2014 (РГУ им. А.Н. Косыгина), Международного научно-технического форума «Косыгинские чтения» (РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024) и других.

Диссертация обобщает результаты исследований, которые проведены непосредственно при участии автора на кафедре материаловедения и товарной экспертизы ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина.

**Личный вклад соискателя** состоит в общей постановке задачи, выборе методов и направления исследования, выполнении научных экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных. При непосредственном участии соискателя и под его руководством выполнены все исследования в лабораторных и промышленных условиях, получены рекомендации о внедрении разработанных методик, подготовлены публикации по результатам исследований.

Перспективы дальнейшей разработки темы сводятся к внедрению в реальный сектор экономики методов имитационного моделирования для прогнозирования свойств текстильных материалов под воздействием различных факторов, создание материалов с заданными свойствами.

**Публикации.** Основные положения и результаты научного исследования изложены в 42 публикациях, в том числе в 21 работе в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, библиографии, приложений. Работа изложена на 347 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков, 50 таблиц (без учета приложений). Список литературы включает 228 библиографических и электронных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, направленной на решение научной проблемы разработки научно-методологических подходов к определению функциональных свойств текстильных материалов, сформулированы цели и задачи исследования, указаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов работы.

**В первой главе** дан системный анализ способов влияния исходных свойств сырья и полуфабрикатов на качество текстильных материалов. В системном анализе наибольшее значение имеет моделирование, особенно имитационное, т.е. формирование предложенной модели с помощью вычислительной техники или

проведение по предложенной модели экспериментов с целью выявления свойств этой системы и путей ее создания.

Имитационные модели позволяют заменить эксперименты в реальных условиях экспериментами в искусственной среде, наглядно представить воспроизводимые ранее процессы. Имитирующая модель – это система, включающая в себя математические, логические, эвристические элементы и позволяющая на основании имеющейся информации об объекте получить данные о будущем состоянии объекта.

На основании литературного обзора сделан вывод о том, что для описания функциональных свойств различных текстильных материалов применяются различные методы оценки и контроля качества изделия. Однако, результаты испытаний оказываются часто неэффективными в условиях детерминированного эксперимента или имеющейся разнородной, ограниченной по объему статистической информации и испытания небольшого числа образцов.

Между реальными возможностями современного математического аппарата и теми требованиями, которые к нему фактически предъявляются, существует глубокий разрыв, а полнота знаний для любых теоретических исследований достигается только в том случае, если каждая величина, существенная для данного процесса, определяется как функция аргументов, соответствующая конкретным условиям задачи и выражена в форме количественного соотношения.

Использование цифровых двойников и имитационных моделей, представляющих собой динамическую копию изучаемого объекта или протекающих в нем процессов, позволяет при проведении вычислительного эксперимента прогнозировать будущие состояния объекта в различных эксплуатационных условиях. Появляется возможность управлять точностью и количеством воспроизведения моделируемого объекта, начальными условиями моделирования. Цифровые двойники не просто заменяют собой реальный эксперимент в определенных аспектах проектирования изделий, а расширяют возможности прогнозирования при оценке качества разрабатываемых объектов. Виртуализация эксперимента позволяет сократить время на отработку объекта, его подготовку к производству.

**Во второй главе** рассмотрен функциональный подход к определению свойств текстильных материалов.

Согласно представленной классификация существующих систем можно констатировать, что текстильные материалы – это сложные многоуровневые, слабо организованные (из-за характерной для волокнистых материалов неоднородности структуры и большого статистического разброса их характеристик), закрытые системы, а текстильное производство – сложная многоуровневая, хорошо организованная, открытая система.

Системно-функциональный подход позволяет рассматривать текстильные материалы, как объект, функция которого реализуется, как его элементами (сырьевой состав), так и отношениями между ними (конструкцией, способом соединения между собой волокнистых материалов) в заданном промежутке времени.

Сформулирован общий вид функциональной системы производства

текстильных материалов, которая состоит из следующих функциональных подсистем:

- исходных материалов;
- промежуточной и готовой продукции;
- обеспечения качества получаемой продукции.

При создании того или иного вида текстильных материалов, особенно если это касается изделий технического и специального назначения, необходимо учитывать весьма разнообразные свойства исходных материалов, процессы производства и их эксплуатации. Измерение начальных свойств и сопоставление результатов этих измерений с требованиями, предъявляемыми к материалу, является необходимым, но в некоторых случаях недостаточным условием для оценки качества.

Комплексная оценка качества позволяет в большем объеме определять взаимовлияние разных факторов. Функциональные свойства готовой продукции в целом зависят от свойств каждого показателя на протяжении заданного промежутка времени в определенных условиях применения.

В работе предложена концепция научно-методического подхода к определению функциональных свойств текстильных материалов (рисунок 1).



Рисунок 1. Концепция научно-методического подхода к определению функциональных свойств текстильных материалов

Каждая из представленных подсистем решает определенные задачи для конкретного вида готовой продукции, которые вытекают из ее функционального назначения.

В работе рассмотрено влияние ряда факторов на прочностные

характеристики готовой пряжи с использованием бинарной причинно-следственной теории. Построен граф причинно-следственных связей между технологическими параметрами, произведены соответствующие расчеты и выявлены наиболее значимые показатели, оказывающие наиболее существенное влияние на качество готовой продукции (рисунок 2).

К этим показателям относятся: разрывная нагрузка волокна, линейная плотность волокна, штапельная длина волокна, число волокон в сечении к пряже, крутка пряжи, показатель технологического процесса, разрывная нагрузка пряжи.



Рисунок 2. Граф причинно-следственных связей между технологическими параметрами при производстве пряжи

**В третьей главе** рассмотрено влияние исходных показателей волокон на качество получаемой продукции.

При прогнозировании поведения текстильных материалов необходимым условием является использование достаточно большого числа показателей, оказывающих влияние на качество готовой продукции. Однако, чем больше факторов, тем сложнее вывести функциональную зависимость воздействия этих факторов на качество готового продукта.

Одним из способов решения данной задачи является применение теории подобия и анализа размерностей.

Предложена следующая функциональная зависимость:

$$P_{\text{вол}} = f(T_{\text{вол}}, L_{\text{шт}}, W, n) \quad (1),$$

позволяющая прогнозировать разрывную нагрузку  $P_{\text{вол}}$  (сН) тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка. Исходными факторами, влияющими на разрывную

нагрузку волокон, являются: линейная плотность  $T$  (мтекс), штапельная длина  $L$  (мм), содержание пороков и сорных примесей  $n$  (%), влажность исходных волокон  $W$  (%), т.е. те параметры, которые заложены в оценку селекционных сортов хлопкового волокна.

Для определения разрывной нагрузки тонковолокнистого хлопка были взяты несколько селекционных сортов. В результате использования теории подобия получено уравнение:

$$P_{\text{рас}} = 0,7 \left\{ \frac{T \times L}{1000} \right\} \times \frac{\frac{W}{n}}{0,8638 \frac{W}{n} - 0,0067} \quad (2),$$

позволяющее прогнозировать разрывную нагрузку исходных волокон ручной сборки. Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 14%.

Также получено уравнение расчета разрывной нагрузки волокон средневолокнистых сортов хлопка:

$$P_{\text{рас}} = 0,6 \left\{ \frac{T \times L}{1000} \right\} \times \frac{\frac{W}{n}}{0,7565 \frac{W}{n} - 0,1311} \quad (3).$$

Отклонение расчетных значений не превышает 11% от экспериментальных.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на разрывную нагрузку пряжи оказывают разрывная нагрузка волокна, его линейная плотность и крутка пряжи;
- разрывная нагрузка в значительной степени предопределяется также штапельной длиной волокна.

Предложенный метод позволяет выбрать наиболее важные факторы, которыми целесообразно варьировать при установлении взаимосвязи с целью получения наилучших результатов.

**В четвертой главе** выявлена взаимосвязь между показателями механических характеристик текстильных материалов от их сырьевого состава. Проанализированы и установлены зависимости влияния процентного содержания натуральных и химических волокон на такие показатели как разрывная нагрузка, разрывное удлинение, изгибоустойчивость, число циклов до разрушения, стойкость рассматриваемых материалов к многократным деформациям растяжения.

Изучены образцы хлопковой, полиэфирной, вискозной, хлопко-вискозной и хлопко-полиэфирной пряжи различного процентного содержания натуральных и химических волокон. Проведен системно-функциональный анализ влияния различных факторов на физико-механические свойства этих пряж. Обработка результатов натурных испытаний выполнена с применением кодирования и масштабирования информации, численных методов регрессионного анализа, использования альтернативных критериев оценивания коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов. Установлено, что разрывная нагрузка хлопко-вискозной и хлопко-полиэфирной пряжи функционально зависит от процентного соотношения натуральных и химических волокон в ее составе; изгибоустойчивость хлопко-полиэфирной пряжи выше, чем хлопко-вискозной. Изучено влияние

начальной нагрузки, коэффициента крутки и влажности материала на деформационные свойства хлопчатобумажной пряжи.

Проведенные исследования показывают, что рассмотренные факторы по-разному влияют на конечный продукт, поэтому предложено использовать комплексную оценку качества пряжи. В качестве примера приведена диаграмма относительных показателей качества однородной и смешанной хлопко-полиэфирной пряжи различного волокнистого состава: образец 1 – 100% полиэфир, 2 – 87% полиэфира/13% хлопка, 3 – 67% полиэфира/33% хлопка, 4 – 57% полиэфира/43% хлопка, 5 – 33% полиэфира/67% хлопка, 6 – 100% хлопка (рисунок 3).

Комплексная оценка проводилась путем сравнения площадей многоугольников, образованных относительными показателями характеристик свойств для разных образцов пряжи.

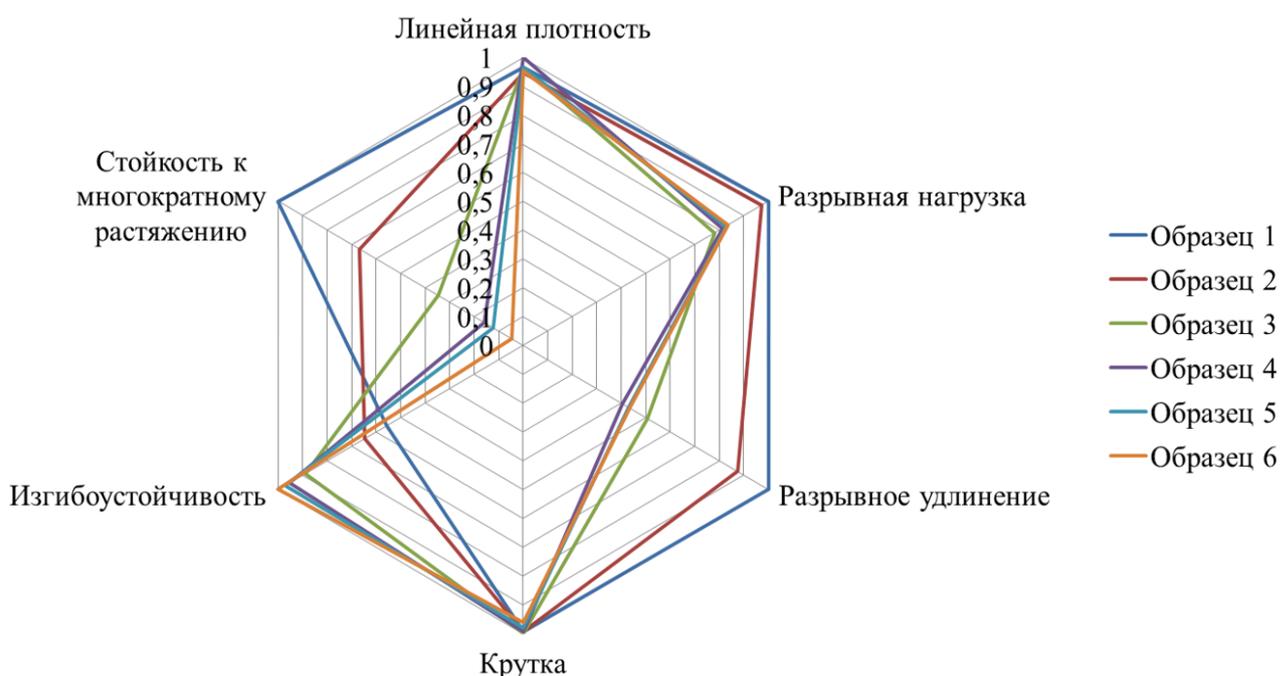


Рисунок 3. Комплексная оценка качества пряжи

Полученные в ходе исследования результаты позволяют определить наиболее благоприятные условия переработки волокнистых материалов. При этом данные о состоянии рассматриваемых материалов могут быть переданы цифровому двойнику в качестве исходных параметров для моделирования будущего состояния объекта.

Выявлены функциональные зависимости основных физико-механических характеристик тканей от содержания натуральных и химических волокон в их строении.

Объектами исследования выступили: хлопковые, вискозные, полиэфирные, хлопко-вискозные и хлопко-полиэфирные ткани полотняного переплетения (таблица 1).

Таблица 1. Влияние сырьевого состава на физическо-механические свойства тканей

Образец №	Сырьевой состав	Система нитей	Изгибостойкость, тыс. циклов	Несминаемость, %	Стойкость к истиранию	
					Число циклов	Коэффициент истирания
Состав ткани с разным соотношением хлопковых и вискозных волокон						
1	100% хлопка	основа уток	12,5 16,5	33,9	2713	0,46
2	87,5% хлопка + 12,5% вискозного волокна	основа уток	10,9 15,1	32,5	2770	0,54
3	67% хлопка + 33% вискозного волокна	основа уток	9,8 12,8	32,1	2920	0,56
4	100% вискозного волокна	основа уток	9,3 11,9	31,7	2990	0,59
Состав ткани с разным соотношением хлопковых и полиэфирных волокон						
5	100% хлопка	основа уток	13,5 13,2	31,7	2587	0,43
6	67% хлопка + 33% полиэфирного волокна	основа уток	14,2 16,0	34,2	3619	0,82
7	43% хлопка + 57% полиэфирного волокна	основа уток	18,4 19,7	35,7	4642	0,87
8	33% хлопка + 67% полиэфирного волокна	основа уток	19,6 20,9	37,0	5369	1,21
9	18% хлопка + 82% полиэфирного волокна	основа уток	24,3 23,4	39,2	7178	1,23
10	100% полиэфирного волокна	основа уток	27,0 25,9	44,7	7793	1,28

Увеличение содержания полиэфирных волокон в ткани ведет к повышению механических характеристик рассматриваемых материалов, в отличие от вискозных.

Задача определения функциональной зависимости разрывной нагрузки смесовой ткани от ряда факторов решена с применением теории подобия и анализа размерностей.

Функциональная зависимость (4) отражает влияние различных факторов на разрывную нагрузку по основе хлопко-полиэфирной ткани полотняного переплетения:

$$Q_o = P_o \Pi_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x}{A+B [(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x]} \quad (4),$$

где  $Q_o$  – разрывная нагрузка полоски ткани, Н;

$P_o$  – разрывная нагрузка пряжи, Н;

$\Pi_o$  – плотность нитей по основе, нитей на 10 см;

$B$  – ширина полоски ткани, 5 см;

$\rho_x, \rho_n$  – плотность хлопковых и полиэфирных волокон;

$n_x, n_n$  – процентное содержание натуральных и полиэфирных волокон.

Именно эти факторы являются управляющими по отношению к строению ткани, определяют все ее параметры и являются объектами проектирования.

Сравнительные результаты эмпирических испытаний и их расчетные значения, согласно функциональной зависимости (4), представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эмпирические и расчетные значения разрывной нагрузки по основе моноволокнистой и хлопко-полиэфирной ткани полотняного переплетения

Процентное содержание полиэфира	Разрывная нагрузка ткани $Q_o, Н$	Разрывная нагрузка пряжи $P_o, Н$	Поверхностная плотность, $P_o, н/1 см$	$P_o P_o B$	$(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x$	Расчетная разрывная нагрузка ткани $Q_p, Н$	Отклонение, %
0	45,6	2,03	33,6	341,04	1,000	43,30	4,0
82	47,7	2,15	33,9	364,43	0,969	44,68	2,0
67	49,1	2,23	34,3	400,76	0,946	45,13	6,0
57	50,2	2,30	33,7	387,55	0,937	48,97	2,4
33	53,2	2,34	33,7	394,29	0,923	53,89	1,2
100	56,1	2,80	33,3	462,20	0,907	60,32	5,5

Исходя из предложенной функциональной зависимости (4) и расчетных значений, приведенных в таблице 2, получена функциональная зависимость (5) разрывной нагрузки ткани от ряда показателей на нее влияющих:

$$Q_o = P_o P_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x}{54,86 \cdot [(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x] - 43,88} \quad (5).$$

Сравнительный анализ показал, что погрешность между расчетными результатами разрывной нагрузкой ткани и ее фактическими (экспериментальными) значениям не превышает 6%, что является вполне достаточной для прогнозирования строения и поведения рассматриваемых текстильных материалов.

**В главе 5** проанализированы различные модели для описания деформационных свойств текстильных материалов.

Специфика волокнистых материалов, применяемых для производства различных изделий, заключается в особенностях их свойств – широком статистическом разбросе практически всех их характеристик: длины, тонины, формы поперечного сечения, разрывной нагрузки и разрывного удлинения, состояния поверхности и, как следствие, показателей адгезии и трения, извитости, упругости, и др. Эти вариации характеристик волокон и нитей не могут быть нивелированы какими-либо методами статистической обработки, и их величина существенно превышает аналогичные показатели вариаций у других (не текстильных) материалов. Поэтому одной из целей работы явилось исследование особенностей применения некоторых классических моделей деформации по

отношению к этим материалам. В частности, весьма важно установить пределы робастности моделей к вариациям разнообразных параметров.

Изучены статистические аспекты моделей Сен-Венана, Кельвина-Фойгта, Максвелла, их применимость и адекватность для описания процесса эксплуатации различных текстильных материалов, влияние различных факторов на взаимосвязь между напряжением ( $\sigma$ ) и деформацией ( $\epsilon$ ), временем достижения предельной деформации ( $\epsilon_m$ ).

Взаимодействие по касательным поверхностям с прижатием поверхностей друг к другу означает, что в каждом участке такого соприкосновения волокна образуют пару, которая ведет себя как элемент Сен-Венана, т.е. взаимодействие поверхностей волокон осуществляется силами и по законам сухого трения. Очевидно, что количество таких участков неисчислимо велико. Направления действия и величины сил по касательным поверхностям соприкосновения принимают непредсказуемые, случайные значения, а в целом в материале проявляется некоторый интегральный эффект этих взаимодействий. Проведенное в работе статистическое моделирование деформации с помощью модели Сен-Венана показало, что при малых значениях коэффициента вариации скорости наступления предельного удлинения  $CV_{sm}$  (от 0 до 25%) зависимость взаимосвязи между напряжением ( $\sigma$ ) и деформацией ( $\epsilon$ ) во времени ( $t$ ) сохраняет «ступенчатую» форму, которая, с ростом  $CV_{sm}$  сглаживается. При  $CV_{sm} > 30\%$  «ступенчатая» часть кривой практически исчезает, и эта зависимость превращается в монотонно нарастающую, гладкую кривую, не отличающуюся от зависимости между напряжением и скоростью деформации для вязких материалов, которые описываются моделью Ньютоновской жидкости.

Это позволяет заменить в моделях волокнистых материалов нелинейную модель Сен-Венана на линейную модель Ньютона, что упрощает исследование процесса деформации материала.

Модель Максвелла, описывающая вязкоупругие свойства материалов и его пластическую деформацию может быть использована для описания эффектов текучести материала и его ползучести. В диссертации реализован компьютерный эксперимент распределения времени развития деформации до достижения ее предельного значения при случайных вариациях параметров (модуля упругости материала, механического напряжения, относительной деформации, времени достижения разрывного удлинения). Показано, что вид распределения зависимости времени достижения предельной деформации ( $T_m$ ) зависит не только от числовых значений, но и от формы распределения деформации ( $\epsilon$ ). В разработанной программе равномерное распределение ( $\epsilon$ ) меняли на какое-либо другое подходящее распределение, например, на усеченное экспоненциальное распределения. Выявлено, что форма развития деформации до достижения своего предельного значения при случайных вариациях параметров зависит не только от числовых значений случайных вариаций этих параметров, но и от формы их распределения. Представленная модель исследования в виде разработанной программы, дает возможность изучить эту зависимость и прогнозировать поведение материала, пластическую деформацию которого можно описать моделью Максвелла.

Для модели Кельвина-Фойгта при случайных значениях модуля упругости  $E$  и постоянной времени достижения разрывного удлинения  $T_m$  приведены примеры четырех реализаций ( $m = 1 - 4$ ) - достижения максимальной (предельной) деформации ( $\varepsilon_m$ ) и соответствующие изменения относительной деформации во времени  $\varepsilon(t)$  при ступенчатом нарастании напряжения ( $\sigma$ ) (рисунок 4), причем значения генерировались как нормально распределенные числа. На рисунке видно, что различные реализации (образцы) имеют существенно отличные значения времени достижения разрыва и, соответственно, заметно разные кривые деформации. Следовательно, они могут быть описаны при помощи распределения вариаций коэффициента вязкости  $b$  (с учетом:  $T_m = b/E$ ) и вызванных ими вариаций времени достижения разрывного удлинения  $T_m$ . Проведенный автоматизированный расчет вариаций зависимости распределения случаев наступления  $T_m$  вследствие вариаций модуля упругости  $E$  имеет не симметричную форму распределения. Это означает, что для оценки числовых параметров случайных вариаций  $T_m$  необходимо использовать не такие классические числовые характеристики, как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение, а робастные – медиану и интердецильный размах.

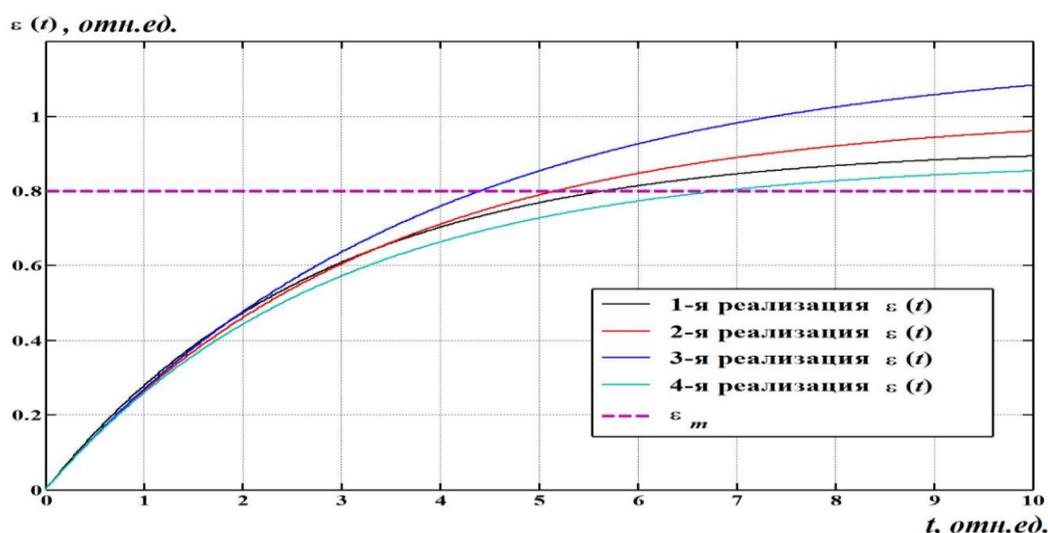


Рисунок 4. Динамика развития деформации при ступенчатом воздействии напряжения и случайных вариациях параметров модели Кельвина-Фойгта

Анализ классических и современных многопараметрических моделей связи между нагрузкой и деформацией различных материалов и возможности их применения для описания механических свойств волокнистых материалов при одномерных деформациях и нагрузках, показал, что при проведении исследований следует учитывать влияние случайных вариаций параметров волокнистых материалов на сопротивление механическому напряжению.

Доказана возможность с помощью компьютерного моделирования исследовать зависимости механических характеристик материала от их случайных вариаций, описываемых разными моделями.

Установлено, что статистический разброс значений параметров моделей: коэффициентов упругости, вязкости, времени релаксации, и др. приводит к

асимметричным распределениям величин деформации образцов, а результаты деформации материала зависят не только от усредненных показателей, но и формы распределения. Целесообразно при проведении исследований и обработке результатов экспериментов вместо традиционных средних значений использовать медианные оценки, а вместо среднеквадратических оценок рассеяния - более робастные оценки интердецильного размаха.

В главе 6 представлена методика прогнозирования механических характеристик текстильных материалов на основе математической обработки результатов их полуцикловых испытаний. Исследована зависимость деформации от прикладываемого напряжения во времени с учетом существенного статистического разброса в значениях прочностных механических характеристик материала в пределах одного и того же исследуемого образца. Проведен имитационный компьютерный эксперимент распределения времени развития деформации до достижения предельного значения при случайных вариациях параметров, проанализирована зависимость силы сопротивления удлинению от абсолютного удлинения. Приведены конкретные примеры исследования и прогнозирования механических свойств таких текстильных материалов как полиамидная и смесовая ткани, нетканые текстильные полотна.

Типичной моделью результатов полуцикловых испытаний являются парные выборки, например, относительного удлинения и относительного сопротивления образца этому удлинению. Их можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_1 \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_2 \quad \dots \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{n_j} \right\}, j = 1, \dots, N \quad (6).$$

В этом выражении «х» и «у» – парные значения двух переменных, зависимость между которыми исследуется; N – количество испытанных образцов;  $n_j$  – количество пар значений, полученных при испытании j – го образца.

Предлагается следующая методика обработки результатов испытаний:

- для каждой парной выборки методами регрессионного анализа подбирается наиболее близкая эмпирическая модель с минимальным числом неизвестных коэффициентов регрессии;
- найденные точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии усредняют по образцам и получают усредненную регрессионную модель;
- для обеспечения большей близости данных, результаты испытаний подвергают кодированию и масштабированию. Кодирование предполагает переход к безразмерным переменным, а масштабирование - перевод экспериментальных значений в диапазон от 0 до 1.

Описанная методика может быть формализована следующим образом:

$Y_p = \Phi(x, C_1, \dots, C_k)$  – регрессионная модель зависимости «у» от «х» с неизвестными коэффициентами регрессии  $C_1, \dots, C_k$ .

В соответствии с методом наименьших квадратов получаем точечные оценки этих коэффициентов:

$$Wq_i(C_{1i}, \dots, C_{ki}) = \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \Phi(x_{ij}, C_{1i}, \dots, C_{ki}))^2 \rightarrow \min_{C_{1i}, \dots, C_{ki}} \quad (7).$$

Критерий наименьших квадратов оптимален в случае чисто случайных и нормально распределенных ошибок наблюдения. В условиях реальных экспериментов вместо критерия наименьших квадратов рекомендуется использовать альтернативные робастные критерии: критерий наименьших абсолютных разностей или минимаксный критерий. Оба эти критерия менее чувствительны к «выбросам» отдельных значений переменной «у».

Как показало проведенное исследование (особенно если разброс оценок коэффициентов регрессии большой или асимметричный) для вычисления усредненной оценки более целесообразно использовать не среднее арифметическое оценок, а их медианное значение:

$$C_{1,\dots,k} = \underset{i=1,\dots,N}{\text{median}}(C_{(1,\dots,k)i}) \quad (8).$$

В связи с тем, что количество испытываемых образцов, как правило, незначительно, то полученных оценок недостаточно для надежного усредненного оценивания. В этих случаях рекомендуется применять метод размножения выборок – бутстреп-метод. Его суть заключается в увеличении объема выборки за счет размножения значений исходной выборки и получения по ним уточненных оценок.

Примером применения описанной методики явились результаты полуцикловых испытаний на прочность до разрыва при одномерном растяжении прямоугольных образцов нетканого материала «Слайтекс», имеющего следующие показатели:

- состав: окисленное полиакрилонитрильное волокно – 78.8%, ПЭ – 21.2%;
- поверхностная плотность, г/м<sup>2</sup>: 200;
- разрывная нагрузка, Н: по длине – 26,5, по ширине – 8,3;

На рисунке (5) приведены диаграммы испытаний 10 образцов данного нетканого материала. Образцы Д1-Д4 испытывались в долевом направлении, образцы Ш1-Ш6 испытывались в поперечном направлении.

Осуществлен переход к кодированным и масштабированным модельным значениям. Масштабирование показало, что все реализации описываются одинаковыми функциональными зависимостями, а влияние рандомизации может быть, если не исключено, то, по крайней мере, ослаблено.

По результатам компьютерного имитационного эксперимента в исходном и кодированном виде для реализации «n» численными методами подобраны соответствующие регрессионные модели. Подбор нелинейной регрессии реализован с помощью процедуры «cftool» системы Matlab.

На основании результатов имитационного эксперимента построена регрессионная модель для каждой реализации, а также верхняя и нижняя границы – 95%-е доверительные области каждой модели.

Качество подбора модели оценивалось по квадрату коэффициента детерминации. Применение в качестве оценки вариабельности данных показателя остаточной дисперсии позволяет получить не только точечные, но и интервальные оценки этих коэффициентов.

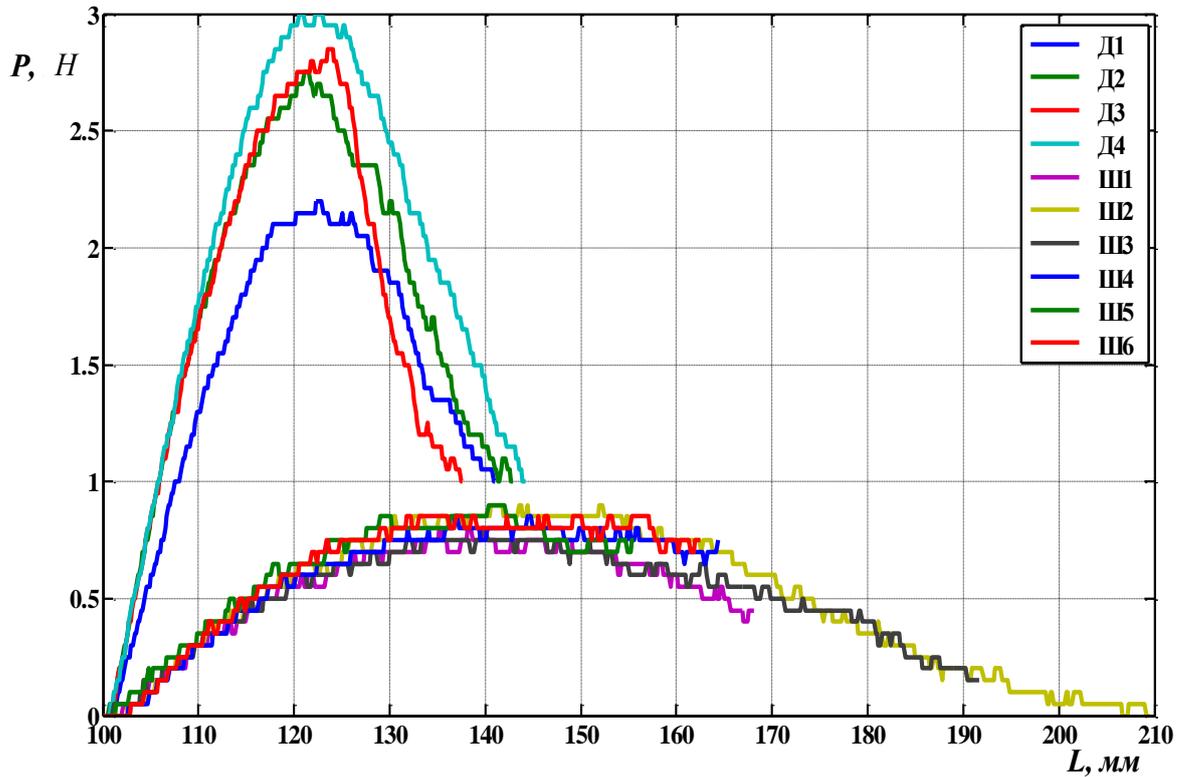


Рисунок 5. Диаграммы испытаний 10 образцов нетканого материала

Анализ полученных результатов показал, что оценки усредненных коэффициентов регрессии, полученные разными способами, близки друг к другу. Это позволяет построить усредненную модельную кривую зависимости силы сопротивления удлинению  $Pd$  от абсолютного удлинения  $S$ :  $Pd_{cm}(S_{cm})$ , используя для этого бутстреп-оценки:

$$Pd_{cm} = 2.561 \frac{S_{cm}}{1+6.246 \cdot S_{cm}^{4.281}} \quad (9).$$

На рисунке 6 показаны экспериментальные значения в кодированной форме, кривые регрессии для каждого из образцов (обозначены fit1 – fit4) и усредненная регрессионная модель (дана красным цветом).

Достоинством предложенного метода прогнозирования является возможность описания экспериментальных данных одним аналитическим выражением на всем протяжении эксперимента. Результаты испытаний образца нетканого материала оказались близки к заявленным характеристикам. Поведение его достаточно предсказуемо и прогнозируемо при помощи предложенного метода.

Используя представленную методику предложены модели имитации результатов натуральных исследований механических свойств полиамидных и смесовых тканей. Применение данного подхода позволяет перейти в цифровой формат и создать виртуальный испытательный полигон для комплексной оценки качества текстильных продуктов.

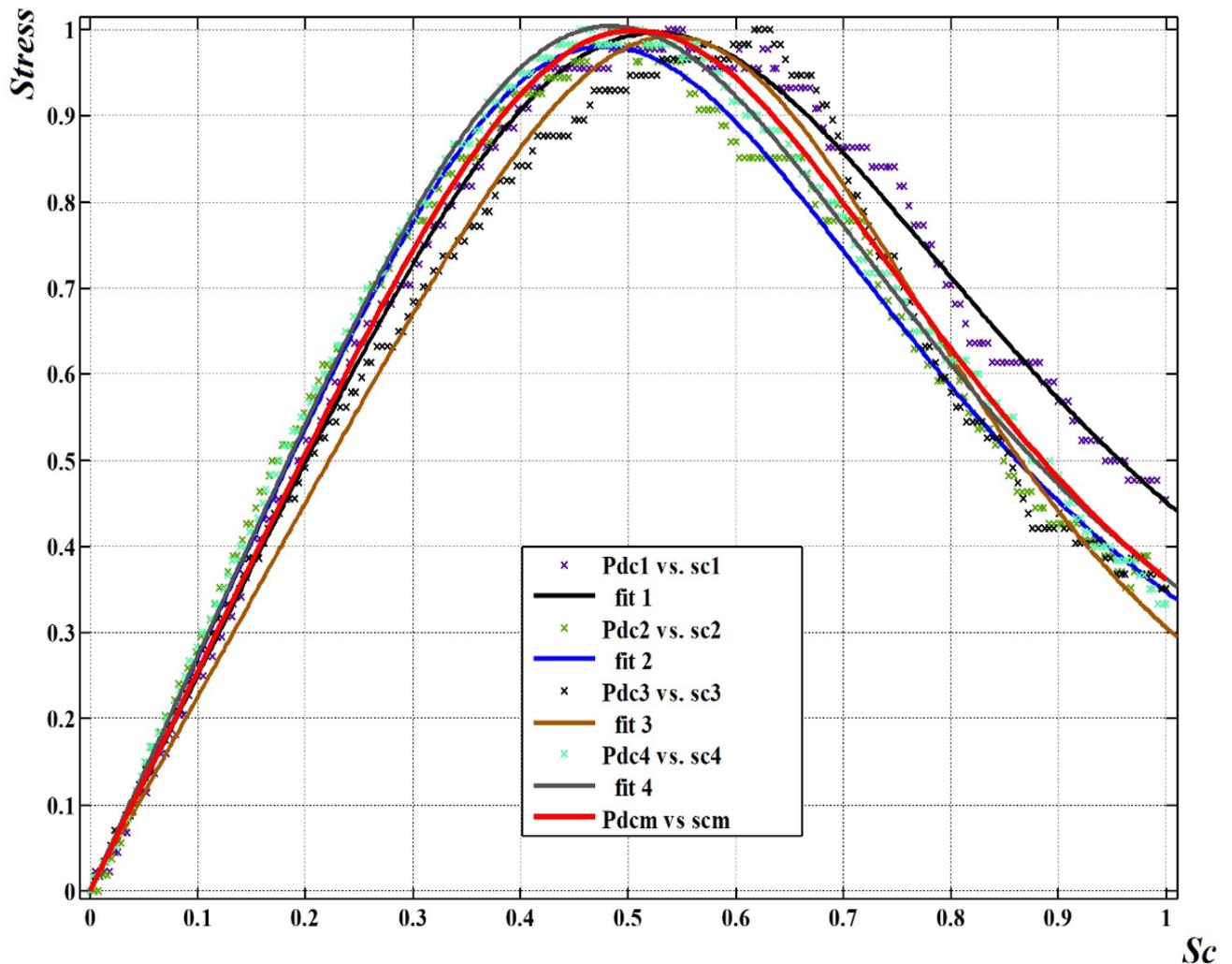


Рисунок 6. Экспериментальные значения в кодированной форме, кривые регрессии для каждого из образцов и усредненная регрессионная модель (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Усложнение технологических процессов, увеличение числа параметров, значимых при их построении, сокращение сроков моделирования, необходимость экономии материальных и финансовых средств, затрудняют реализацию предметного моделирования, а, следовательно, и его целесообразность. Математическое моделирование технологических процессов с использованием современных компьютерных технологий позволяет избежать этих проблем.

Имитационное моделирование технологических процессов ведет к их упрощению, схематизации, представлению системами разнообразных уравнений, воспроизводящими процесс функционирования во времени.

Концептуальная модель описания процесса получения текстильного изделия с заданными свойствами и последовательность его проектирования, начиная от выбора исходного материала, учета различных параметров, влияющих на данный продукт, функциональных требований к нему приведена на рисунке 7.

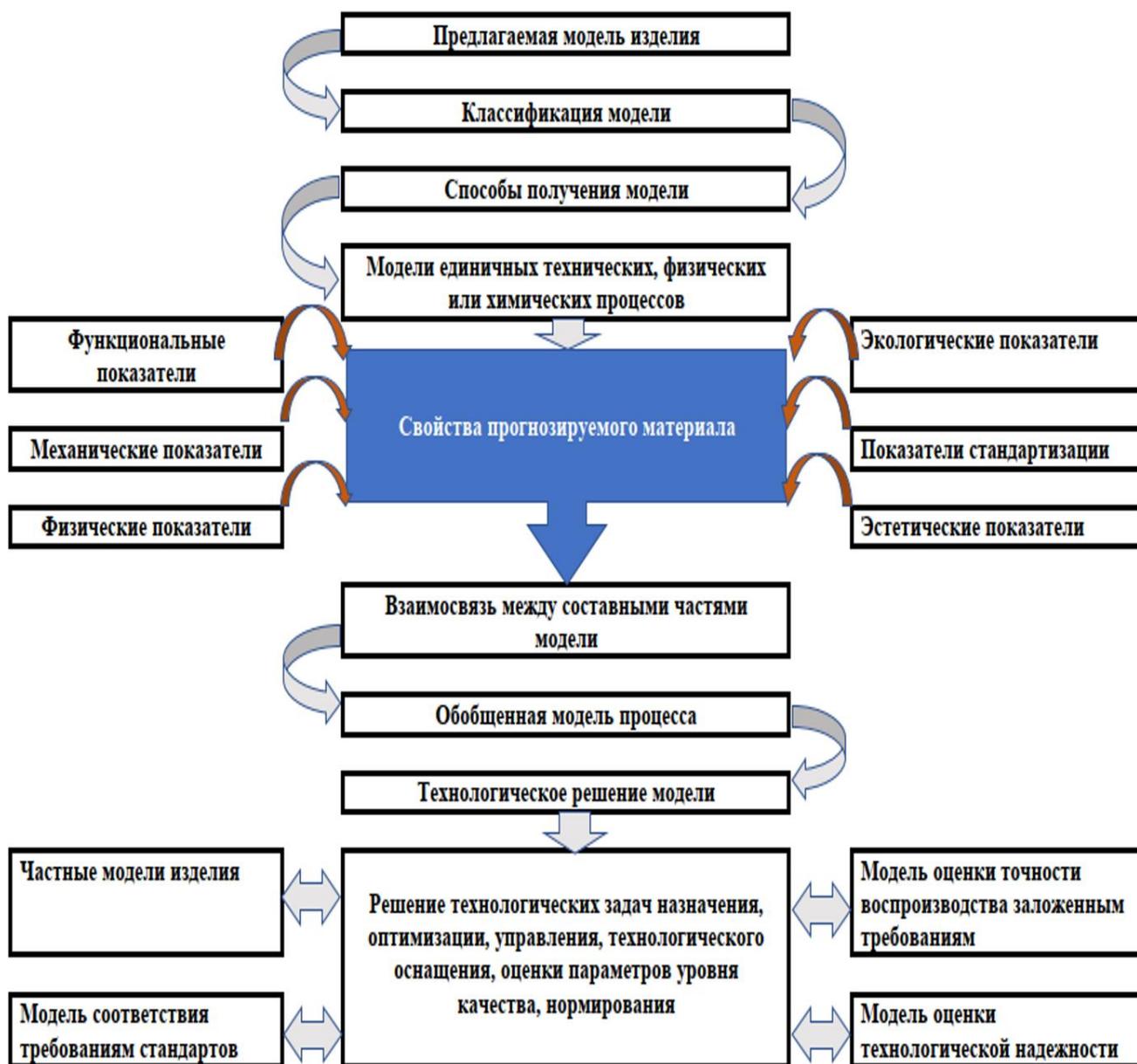


Рисунок 7. Концептуальная модель описания процесса получения текстильного изделия с заданными свойствами

### Основные выводы и результаты работы

1. Разработан комплексный научно-методологический подход оценки свойств текстильных материалов, включающий определение их структурных и физико-механических характеристик, на основе существующих и разработанных методов. Предложенный подход предусматривает переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанный на применении интеллектуальных производственных решений, высокопроизводительных вычислительных систем, результатов обработки больших объемов данных и искусственного интеллекта.

2. Представлена концептуальная модель описания технологического процесса получения текстильного материала с заданными свойствами, имеющая

три этапа:

- создание математического описания процесса, и/или его этапов;
- построение алгоритма, описывающего технологические процессы и на его основе программы для получения количественных величин или соотношений;
- сопоставление полученной модели с оригиналом.

3. Предложена концепция взаимодействия различных элементов процесса создания текстильной продукции, учитывающая их функциональные свойства. Описана морфология влияния свойств исходных материалов на всем протяжении технологического процесса на качество готовой продукции.

4. Для определения числовых значений показателей функциональных свойств готовой продукции использована причинно-следственная теория информации, позволяющая идентифицировать факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на ее характеристики и автоматизировать трудоемкие методы расчета.

5. Математический анализ и компьютерное моделирование позволили исследовать поведения сложных систем и процессов в них происходящих. Полученные в работе конечно-элементные модели учитывают неоднородность рассматриваемых текстильных материалов и неоднозначность их свойств. Выявлено влияние различных факторов на прогнозируемые показатели, как независимо друг от друга, так и в сложном их сочетании. Это дает возможность моделировать вероятностные механические свойства проектируемых продуктов.

6. На основе методов теории подобия и анализа размерностей предложена методика, представлена функциональная зависимость, позволяющая прогнозировать разрывную нагрузку тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка в зависимости от различных исходных параметров

7. Проведены исследования хлопковой, вискозной, полиэфирной, хлопко-вискозной и хлопко-полиэфирной пряжи и тканей с различным процентным содержанием натуральных и химических волокон; выявлено влияние сырьевого состава и других различных факторов на физико-механические свойства проектируемых материалов. Оценена возможность их экстраполяции при проектировании продуктов с заданными свойствами. Приведенные исследования показали, что рассматриваемые факторы по-разному влияют на конечный продукт, поэтому в работе представлена комплексная оценка качества исследуемых продуктов.

8. Использована методика обработки результатов натуральных испытаний с применением кодирования и масштабирования информации, численных методов регрессионного анализа, альтернативных критериев оценивания коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов.

9. С использованием классических одно- и многозвенных математических моделей деформации применительно к текстильным волокнистым материалам установлены отклонения в поведении различных стандартных моделей деформации при описании этих процессов.

10. При статистическом моделировании зависимостей «нагрузка-деформация» установлено, что деформации зависят не только от усредненных показателей, но и формы распределения. Рекомендовано при изучении и оценке свойств текстильной продукции учитывать не только числовые характеристики, но и их распределения.

11. Предложена методика оценки динамики изменения деформации материала под воздействием механического напряжения с учетом упругой, эластической и пластической деформации материала. Рекомендовано при обработке результатов экспериментов, вместо традиционно используемых средних значений, применять медианные оценки, а вместо среднестатистических оценок рассеяния – робастные оценки интердецильного размаха.

12. Для моделирования и прогнозирования значений числовых характеристик свойств текстильных материалов предложено использовать метод размножения выборок – бутстреп-метод, позволяющий оценивать готовую продукцию при малом, ограниченном числе исходных образцов.

13. Заявлен новый подход и разработаны статистические модели имитации результатов натурных исследований механических свойств полиамидных, смесовых тканей, нетканых материалов в цифровой среде, что позволяет создать виртуальный испытательный полигон для комплексной оценки качества текстильных продуктов, перейти в цифровой формат.

14. Результаты диссертационной работы внедрены на ООО «Синтекс», ООО «Термопол», АО КШФ «Передовая текстильщица», АО «Лента», ООО «Ишимбайский трикотаж», которые свидетельствуют о состоятельности предлагаемых в диссертации решений и способствуют повышению качества выпускаемой продукции.

### **Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

#### **Статьи в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России и индексируемые в международных базах цитирования**

1. Кащеев, О.В. Концептуальный системно-функциональный подход к моделированию процессов получения текстильных материалов с заданными свойствами/ Кащеев О.В. // Костюмология. - 2025. - Т 10. - №2. - URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/27TLKL125.pdf>

2. Кащеев О.В. Прогнозирование свойств нетканых материалов на основе математической обработки результатов полуцикловых испытаний // Дизайн и технологии. 2024. № 100 (142). С. 88-94. - 0,45 п.л.

3. Кащеев О.В. Применение компьютерного моделирования деформационных свойств текстильных материалов с помощью модели Максвелла // Дизайн и технологии. 2024. № 99 (141). С.74-78. - 0,35 п.л.

4. Kashcheev O. V. Production of materials with target properties as a driver for the development of technical textile in Russia // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2023. № 4 (406). P. 128-134. - 0,43 п.л. (Scopus)

5. Kashcheev, O. V., Y.S., Shustov, Yu S. Effect of relative load and humidity on single cycle characteristics of cotton yarn // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2023. №1 (403) P.76-78. - 0,2 п.л./ 0,15 п.л. (Scopus)

6. Кащеев О.В., Самойлова Т.А., Севостьянов П.А., Шустов Ю.С. Особенности обработки результатов полуцикловых испытаний текстильных материалов при оценке их механических характеристик // *Дизайн и технологии*. 2023. №98 (140). С.58-63. - 0,4 п.л./ 0,25 п.л.

7. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Многозвенные модели описания деформационных свойств текстильных материалов // *Дизайн и технологии*. 2023. №94 (136). С.92-97. - 0,4 п.л./ 0,3 п.л.

8. Шустов Ю.С., Кащеев О.В. Определение функциональных связей между свойствами текстильных материалов // *Дизайн и технологии*. 2023. №93 (135). С.93-99. - 0,44 п.л./ 0,3 п.л.

9. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопколавсановой ткани различного процентного содержания // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. №6 (402) С. 60-62. -0,2 п.л./ 0,15 п.л. (Scopus)

10. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Анализ механических характеристик хлопколавсановой пряжи различного процентного содержания // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. №5 (401) С. 56-59. -0,25 п.л./ 0,15 п.л. (Scopus)

11. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопкового волокна тонковолокнистых сортов хлопчатника // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. №4 (400) С. 52-55. -0,25 п.л./ 0,15 п.л. (Scopus)

12. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопкового волокна средневолокнистых сортов хлопчатника // *Дизайн и технологии*. 2022, № 87 (129) С.64-68. - 0,33 п.л./ 0,25 п.л.

13. Севостьянов П.А., Шустов Ю.С., Кащеев О.В. Моделирование деформационных свойств текстильных материалов с помощью модели Сен-Венана // *Дизайн и технологии*. 2021, № 83-84 (125-126) С.162-167. - 0,4 п.л./ 0,25 п.л.

14. Каракова О.А., Кащеев О.В., Николаев С.Д. Влияние заправочных параметров структуры парашютных тканей на ее свойства // *Дизайн и технологии*. 2017. № 61 (103). С. 64-67. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

15. Николаев С.Д., Кащеев О.В., Поликарпов А.В., Матраков Р.Е. Определение параметров строения ткани по ее микросрезам // *Дизайн и технологии*. 2015. №49 (91). С.68-73. - 0,4 п.л./ 0,25 п.л.

16. Kashcheev O.V., Nikolaeva N.A., Panin M.I., Knyaz'kin S.V., Krotov S.Y. Calculation of the loads on composite materials formed by winding // *Fibre Chemistry*. 2014. T. 46. № 2. С. 122-125. - 0,25 п.л./ 0,125 п.л. (Scopus)

17. Кащеев О.В., Разумеев К.Э., Николаев С.Д. Разработка новых видов тканей для детской одежды // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. №2 (344) С. 67-74. - 0,5 п.л./ 0,35 п.л. (Scopus)

18. Щербаков В.П., Кащеев О.В. Проектирование шерстяной пряжи малых линейных плотностей для ткани Super 100 // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. №1 (337) С. 149-154. - 0,4 п.л./ 0,25 п.л. (Scopus)

19. Щербаков В.П., Кащеев О.В. Уточненный вариант проектирования шерстяной пряжи малых линейных плотностей для ткани Super 100. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. №2 (338) С. 147-152. - 0,3 п.л./ 0,2 п.л. (Scopus)

20. Кащеев О.В., Лунина Е.В., Андреева Е.Г. Применение триаксиальных переплетений для изготовления плетеных заготовок верха обуви//Кожевенно-обувная промышленность. 2011. № 4. С. 20-21. - 0,4 п.л./ 0,25 п.л.

21. Кащеев О.В. Российский рынок технического текстиля. Анализ, проблемы, тенденции и перспективы его развития // Текстильная промышленность. 2006. № 1-2. С. 64-68. - 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

#### **Патенты, свидетельства:**

22. Патент на полезную модель RU 128200 U1, 20.05.2013: Ткань. Заявка № 2013102569/12 от 22.01.2013 / Кулемкин Ю.В., Лабок В.Г., Ильин Л.С., Проталинский С.Е., Букина С.В., Кащеев О.В.

#### **Статьи в материалах конференций и других научных изданиях:**

23. Кащеев О.В. Причинно-следственные связи между исходными параметрами при производстве пряжи // Актуальные проблемы экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции текстильной и легкой промышленности: Сборник научных трудов по материалам 4-го Круглого стола с международным участием. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – С. 265 -271. – 0,65 п.л.

24 Кащеев О.В. Влияние волокнистого состава на механические свойства хлопко-вискозной пряжи // Промышленные процессы и технологии. 2024. Т. 4. № 4(14). С. 23-30. – 0,45 п.л.

25. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Методика обработка результатов испытаний полуцикловых разрывных характеристик с помощью бутстреп-метода // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления» IV Международного Косыгинского Форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета» (20-22 февраля 2024 года). - М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. - С.20-24. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

26. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Применение динамической модели деформации волокнистых материалах с переменными параметрами // Сборник научных трудов. «Международная научная конференция, посвященная 100-летию

со дня рождения проф. А.И. Коблякова» – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024 – С. 82-85. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

27. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопколавсановой ткани с использованием теории подобия и анализа размерностей // Сборник научных трудов. «Международная научная конференция, посвященная 75-летию со дня рождения проф. А.П. Жихарева» – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023 – С. 82-85. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

28. Севостьянов П.А., Шустов Ю.С., Кащеев О.В. Применение модели Кельвина-Фойгта для описания деформационных свойств текстильных материалов // Дизайн и технологии. 2022. №90 (132). С.83-88. – 0,4 п.л./ 0,25 п.л.

29. Кащеев О.В. Комплексная оценка качества хлопколавсановой пряжи // Сборник статей «Теория и практика экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции» М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2022. С.34-37. – 0,25 п.л.

30. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Влияние нагрузки и коэффициента крутки на деформационные свойства хлопчатобумажной пряжи // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Инновации 2022» М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2022. С. 37-40. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

31. Кащеев О.В. Шустов Ю.С. Влияние многократного растяжения на остаточную циклическую деформацию волокон хлопка // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Инновации 2022» М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2022. С. 41-43. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

32. Кащеев О.В. Оценка качества хлопко-вискозной пряжи различного процентного содержания // Сборник статей «Актуальные вопросы экономики, коммерции и сервиса». М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2022. С. 61-64. – 0,25 п.л.

33. Поликарпов А.В., Данилов А.В., Кащеев О.В., Николаев С.Д. Анализ параметров структуры арамидных тканей различного переплетения // Сборник статей «Современные задачи инженерных наук». Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума. 2017. С. 197-201. – 0,33 п.л./ 0,2 п.л.

34. Кащеев О.В., Кащеева М.М. Оценка напряженности изготовления углеродной ткани "Урал" на бесчелночном ткацком станке СТБ // Сборник трудов «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)». 2017. № 1. С. 256-261. – 0,33 п.л./ 0,25 п.л.

35. Поликарпов А.В., Кащеев О.В., Николаев С.Д. Исследование натяжения основных нитей при изготовлении арамидных тканей // Сборник статей «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации-2016)». Сборник материалов международной научно-технической конференции. 2016. С. 89-92. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

36. Кащеев О.В., Николаева Н.А. Оптимизация технологического процесса изготовления тканей бельевого назначения // Сборник трудов «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)». 2016. №1 -1 С.188-191. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

37. Николаев С.Д., Кащеев О.В., Поликарпов А.В., Николаева Н.А., Рыбаулина И.В. Причинно-следственные связи при исследовании арамидных

тканей // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и технологии текстильной и легкой промышленности». 2016. С.91-94. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

38. Кащеев О.В., Кан Э.М., Маштраков Р.Е., Поликарпов А.В., Кожевникова А.Ю. Проектирование тканей по заданным поверхностной плотности и фазы строения // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ -2015)». 2015. С.15-17. – 0,2 п.л./ 0,1 п.л.

39. Кащеев О.В., Сильченко Е.В., Маштраков Р.Е. Проектирование хлопчатобумажных тканей по заданному порядку фазы строения // Материалы докладов международной научно-технической конференции Витебского государственного технологического университета «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности». 2014. С.41-44. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

40. Николаев С.Д., Кащеев О.В., Ковалева О.В. Исследование напряженно-деформированного состояния нитей при прибое с использованием тепловидения // Сборник научных статей и воспоминаний «Памяти В.А. Фукина посвящается» Москва, 2014. С. 145-156. – 0,75 п.л./ 0,45 п.л.

41. Гаврилова И.М., Евсюкова Е.В., Карева Т.Ю., Кащеев О.В., Николаев С.Д., Панин И.Н., Павлихина И.Ю., Сергеев В.Т., Сумарукова Р.И., Фомин Б.М. Разработка новых текстильных материалов специального назначения. Монография // Под редакцией С.Д. Николаева. - М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012. - 110 с.

42. Щербаков В.П., Панин А.И., Кащеев О.В. Основы теории проектирования ткани // Сборник научных трудов «Инновационные технологии и материалы» Вестник Московского государственного текстильного университета. М.: 2012. С.28-32. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

КАЩЕЕВ ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К  
ОЦЕНКЕ, МОДЕЛИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Усл. -печ. 2 п.л. Тираж 100 экз. Заказ №.....**

Редакционно-издательский отдел  
ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»  
119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1.  
Отпечатано в РИО ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»