

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)»

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**

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Научный консультант –
доктор технических наук,
профессор Ю.С. Шустов**

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ И МОДЕЛИ- РОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	17
1.1. Методы оценки и прогнозирования свойств текстильных материалов.....	17
1.2. Современные подходы к оценке деформационных свойств текстильных материалов.....	24
1.3. Многофункциональный подход к определению свойств тек- стильных материалов.....	44
Выводы по главе 1.....	49
ГЛАВА 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ПРО- ГНОЗИРОВАНИЮ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИА- ЛОВ.....	51
2.1. Комплексный подход к определению функциональных свойств текстильных материалов.....	56
2.2. Причинно-следственные связи между показателями исходного сырья и технологическими параметрами производства пряжи... Выводы по главе 2.....	68 74
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСХОДНЫХ ВОЛО- КОН НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ.....	76
3.1. Применение теории подобия и анализа размерностей при про- гнозировании свойств текстильных материалов.....	78
3.2. Функциональный подход к анализу и прогнозированию разрыв- ной нагрузки тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка.....	83
3.3. Анализ влияния многократного растяжения на остаточную цик- лическую деформацию волокон хлопка.....	93

	Выводы по главе 3.....	97
ГЛАВА 4.	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРЯЖИ И ТКАНЕЙ.....	99
4.1.	Установление взаимосвязей между показателями механических свойств пряжи от ее сырьевого состава	99
4.2.	Комплексная оценка качества хлопко-полиэфирной пряжи.....	110
4.3.	Зависимость величины деформации от одноцикловых характеристик хлопчатобумажной пряжи.....	113
4.4.	Функциональная зависимость показателей физико-механических характеристик тканей от их сырьевого состава..	119
4.5.	Прогнозирование разрывной нагрузки хлопко-полиэфирной ткани	131
	Выводы по главе 4.....	133
ГЛАВА 5.	НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	135
5.1.	Виды моделей деформации.....	135
5.2.	Особенности использования классических моделей деформации для описания свойств волокнистых материалов.....	144
5.3.	Многозвенные модели и их статистические аспекты применения.....	165
5.4.	Модели с переменными параметрами.....	171
5.5.	Модели с ограниченными случайными вариациями параметров.....	178
	Выводы по главе 5.....	183
ГЛАВА 6.	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛУЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	184

6.1.	Методика обработки полученных результатов статистическими методами	185
6.2.	Статистическое моделирование экспериментальных данных..	189
6.3.	Апробация и оценка адекватности предложенной математической методики обработки результатов полуцикловых испытаний на различных текстильных материалах.....	206
6.4.	Концептуальный подход к моделированию процессов получения текстильных материалов с заданными свойствами.....	233
	Выводы по главе 6.....	236
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	238
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	241
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения и апробации.....	262
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Показатели механических свойств нетканого материала	281
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты исследования корреляционных зависимостей основных показателей нетканого материала в процессе его деформации	288
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты исследования корреляционных зависимостей основных показателей полиамидной ткани в процессе ее деформации.....	302
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Результаты исследования корреляционных зависимостей основных показателей смесовой ткани в процессе ее деформации.....	311

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

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 [2].

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 [3, 4].

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 [2, 5].

Решение такого спектра задач, рассматривающего во взаимосвязи все стадии переработки исходного волокнистого сырья в готовую продукцию с заранее прогнозируемой структурой и комплексом потребительских свойств, невозможно без привлечения 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.

Существующие сегодня методы оценки и контроля качества текстильных изделий оказываются часто неэффективными.

Разработка комплексного научно-обоснованного метода моделирования и прогнозирования на базе системно-функционального подхода, с использованием математического аппарата и современных средств вычисления для оценки свойств текстильных материалов, является актуальной задачей.

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., Бесшапошникова 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., Милашюс 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 FElsner 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 деформационных свойств этих материалов;
- 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 приемы теоретической метрологии, 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 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 натурных 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 при применении их к волокнистым материалам (модели Максвелла, Кельвина-Фойгта, Сен-Венана и др.);

- предложена новая экспериментальная методика, позволяющая повысить точность определения изменения деформационных свойств текстильных материалов под воздействием внешних сил, включая эффекты 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 натурных 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 натурных испытаний текстильных материалов с применением 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;
- применением системно-функционального подхода к текстильным изделиям и способам их производства;
- систематизацией базы знаний о влиянии различных факторов на функциональные свойства готовой продукции, моделировании взаимосвязей между параметрами проектируемого изделия в зависимости от его целевого назначения, прогнозированию их свойств на всех этапах производства;
- формулировке теоретических представлений об изменении физико-механических свойств от случайных вариаций различных параметров, приводящих к асимметричным распределениям величин деформации исследуемых образцов, представлены компьютерные статистические модели имитации результатов научных исследований.

Практическая значимость:

- разработаны методики обработки результатов натурных испытаний различных текстильных материалов, основанных на использовании математических уравнений и имитационного моделирования, описывающего технологические процессы и функциональные зависимости их свойств;
- представлены 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;
- получены функциональные и математические зависимости физико-механических характеристик текстильных материалов от процентного содержания различных видов волокон, геометрических, структурных и физико-механических их характеристик с целью 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 натурных 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 натурных 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.

ГЛАВА 1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Методы оценки и прогнозирования свойств текстильных материалов

Выбор научного направления исследования имеет как научное, так и прикладное обоснование. Связан не только с необходимостью решения ряда проблем прогнозирования и проектирования новых текстильных материалов, но и с развитием самой науки, созданием теоретических и экспериментальных заделов, проведением поисковых работ, развитием новых направлений текстильного материаловедения [6].

Одним из наиболее важных классификационных признаков методов прогнозирования является степень формализации, которая достаточно полно их охватывает. Вторым классификационным признаком можно назвать общий принцип действия методов прогнозирования, третьим – способ получения прогнозной информации [7-9].

Но прежде, чем перейти к детальному рассмотрению классификационных групп методов прогнозирования, необходимо определить понятие метода или методов прогнозирования.

Метод прогнозирования – это способ исследования объекта, направленный на разработку прогноза, и представляет собой последовательность действий, которые нужно совершить для получения адекватной модели.

Модель прогнозирования – это функциональное представление, адекватно описывающее исследуемый процесс и являющееся основой для получения его будущих значений [7].

Под ней следует понимать совокупность приемов и способов мышления, позволяющих на основе анализа внешних и внутренних связей объекта прогнозирования, а также их измерений в рамках рассматриваемого явления или процесса вынести суждение определенной достоверности относительно его будущего развития.

Само понятие «метод прогнозирования» гораздо шире понятия «модель прогнозирования». В связи с этим на первом этапе классификации обычно все методы делят на две группы: интуитивные и формализованные [7].

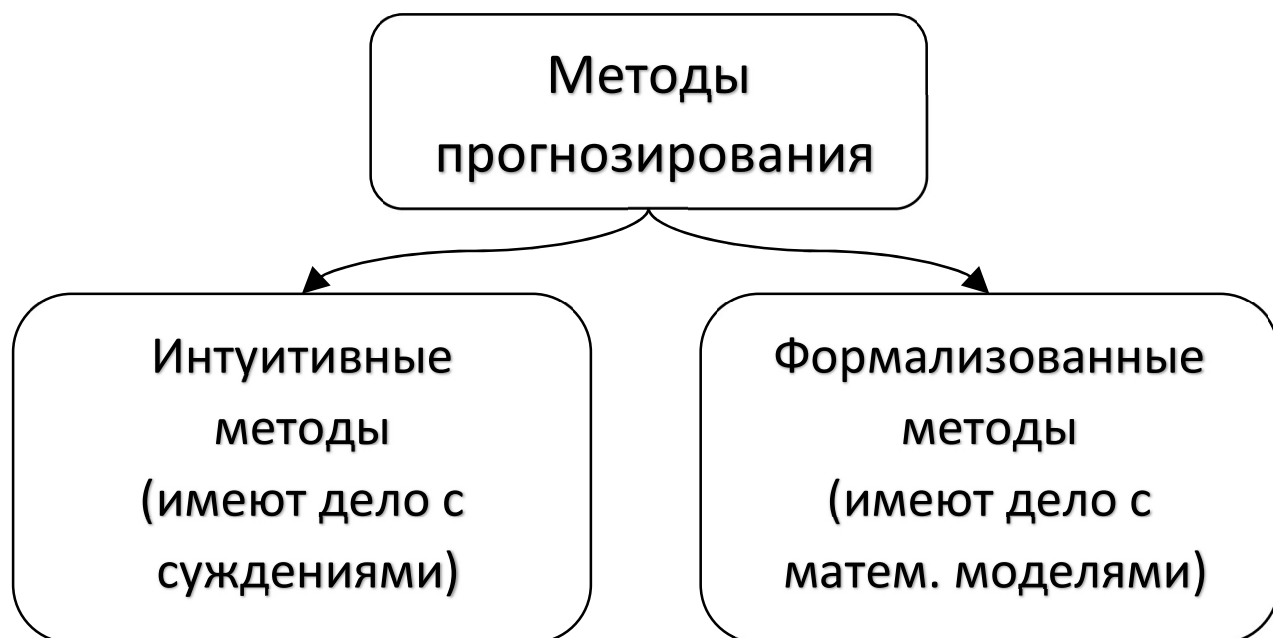


Рисунок 1.1. Исходная схема методов прогнозирования

Интуитивные методы прогнозирования имеют дело с суждениями и оценками экспертов. На сегодняшний день они часто применяются в маркетинге, экономике, так как система, поведение которой необходимо спрогнозировать, или очень сложна и не поддается математическому описанию [8].

Формализованные методы — строятся на базе математических зависимостей, которые позволяют вычислить будущее значение процесса, то есть сделать прогноз.

Для нас представляет интерес именно формализованные методы, так как они используются в конкретной предметной группе.

Наиболее обоснованной можно считать классификацию методов прогнозирования построенной на базе иерархической системы [7-9].

Формализованные методы делятся на три подгруппы — статистические методы оценки, методы аналогии, факторные методы.

Статистический метод основан на анализе временных рядов построенных по значениям характеристик объектов прогнозирования, при этом их можно представить в виде прогнозирования экстраполяции или регрессионного анализа. Метод прогнозирования экстраполяции подразумевает использование функций, позволяющих описывать поведение рассматриваемого объекта с учетом предложенных условий и ограничений. Тогда как при регрессионном анализе, как правило, учитываются также и случайные отклонения.

Методы аналогии подразумевают сравнение имеющихся результатов с ранее полученными данными в той или иной области.

Факторные (компонентные) методы прогнозирования представляют собой статистический метод анализа компонентов, который позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения малозначимые факторы, тем самым уменьшить число показателей [7, 10].

Факторный анализ – (от лат. faktor – действующий, производящий и греч. analysis – разложение, расчленение) – метод многомерной математической статистики, применяемый при исследовании статистически связанных признаков с целью выявления определенного числа скрытых от непосредственного наблюдения факторов [10].

С его помощью не просто устанавливается связь изменения одной переменной с изменением другой, но и определяется мера этой связи, обнаруживаются основные факторы, лежащие в основе указанных изменений. Факторный анализ особенно производителен на начальных этапах исследований, когда необходимо выявить какие-либо предварительные закономерности в исследуемой области. Это позволяет последующий эксперимент сделать более совершенным по сравнению с экспериментом на переменных, выбранных произвольно или случайно [10].

Метод математической аналогии предполагает использование известных математических зависимостей для описания предложенных моделей. Однако в большинстве случаев они могут быть использованы в качестве исходных простейших моделей.

Исторические аналогии заключаются в использовании ранее имеющихся подобных аналогов при создании новых методов прогнозирования.

Опережающие методы основаны на анализе научно-технической информации с целью дальнейшего прогнозирования показателей качества с учетом современных достижений науки и техники.

Еще одним широко использованным являются *экспертные методы* прогнозирования, которые подразделяются на индивидуальные и коллективные, отличающиеся количеством экспертов, принимающих участие в опросе.

Применение решения – это процесс, в результате которого из большого числа проведенных вариантов, выбирается один, как правило, наилучший. Для объективной оценки сравниваемых вариантов необходим системный подход к решению поставленной задачи.

Важнейшим элементом системного подхода является *системный анализ*.

Существуют следующие основные методы системного анализа:

- эвристическое программирование;
- методы аналогии;
- аналитические методы;
- имитационное моделирование [7].

Классификация простых (сингулярных) методов прогнозирования представлена на рисунке 1.2 [10].

Остановимся более подробно на двух последних. Аналитические методы системного анализа весьма разнообразны. Это теория принятия решений, теория графов, метод «черного ящика» и другие. В системном анализе наибольшее значение имеет моделирование, особенно имитационное, т.е. формирование предложенной модели с помощью ЭВМ или проведение на 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.



Рисунок 1.2. Классификация простых (сингулярных) методов прогнозирования

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 [10]. Общая схема прогнозирования показана на рисунке 1.3.

В общем случае последовательность действий при прогнозировании состоит из следующего:

- сбор и анализ информации о поведении объекта исследования в прошлом и настоящем, а также о поведении подобных ему объектов;
- создание модели объекта прогнозирования на базе распознавания и изучения закономерностей, модель может быть физической, математической и т.п.;
- определение неизвестных параметров модели, для чего необходимо выбрать соответствующий математический аппарат;
- формирование прогноза и оценка его точности [6].

Информация об объекте прогнозирования должна соответствовать целям и задачам прогнозирования и обладать необходимой точностью.

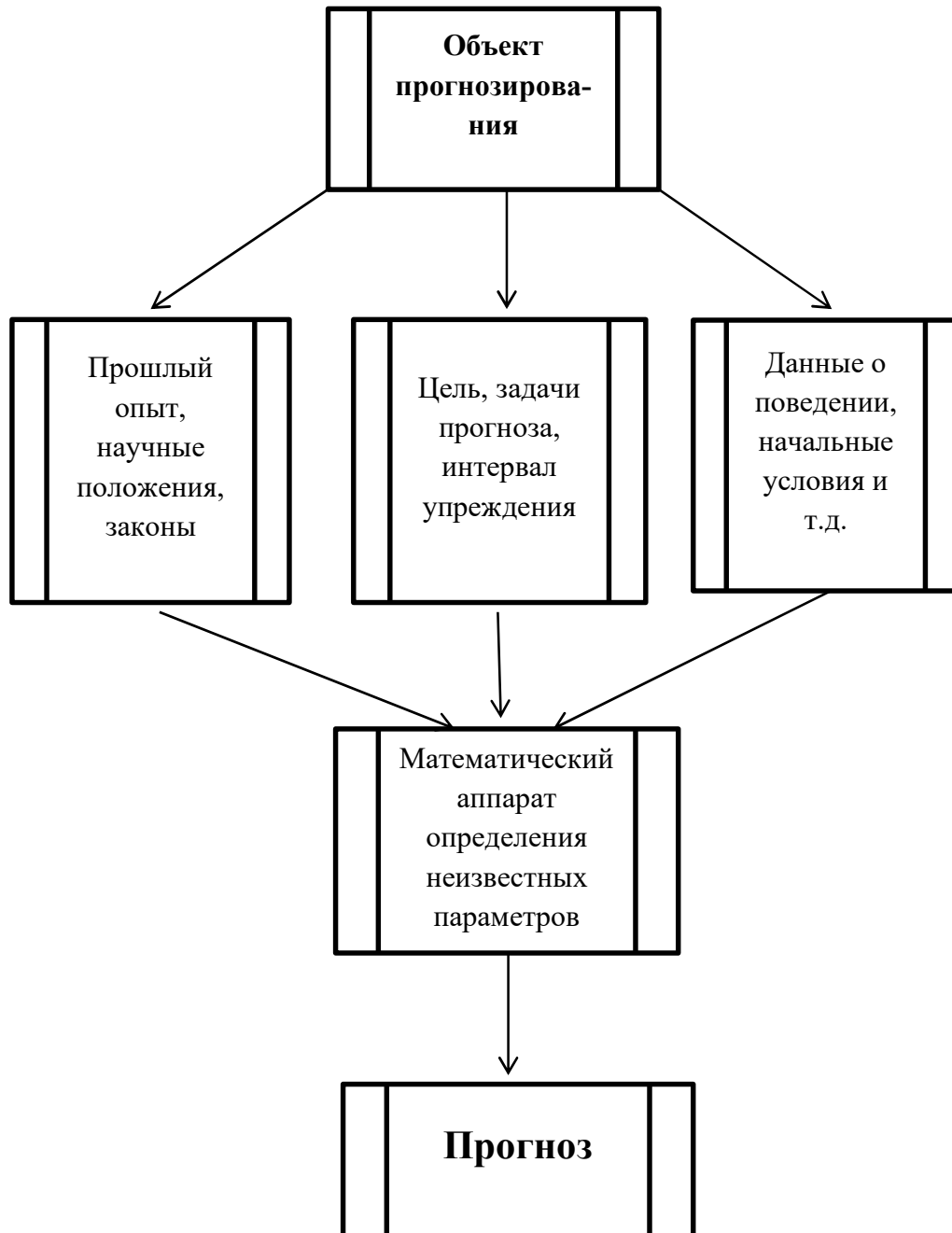


Рисунок 1.3. Схема прогнозирующей системы

Развивающаяся в настоящий момент промышленная революция связана с коренным изменением процесса производства различной продукции, при этом клю-

чевую роль начинают играть именно информационные системы, которые позволяют получать информацию на всем пути производства продукции, начиная от стадии разработки до готовой продукции. Причем процесс моделирования изделия основывается на использовании цифровых двойников, т.е. виртуального продукта, как результат моделирования готового объекта. Это позволяет уже на начальных стадиях выявить особенности поведения объекта в тех или других случаях, и соответственно внести коррективы.

Такой подход значительно сокращает затраты времени и ресурсов на принятие решения по конкретной продукции, а также, в случае необходимости, расширить область возможного применения в соответствии с требуемыми условиями.

Исходя из вышеизложенного, целью работы является научное обоснование и разработка методологических основ для комплексного определения свойств текстильных материалов, позволяющих расширить информативность измерений, цифровизовать процесс моделирования и прогнозирования их функциональных свойств при проектировании, изготовлении и эксплуатации, а также разработка методов, позволяющих получить информацию об исходных свойствах текстильных материалов, определяющих качество готовой продукции и обеспечение возможности ее обработки с помощью современных информационно-компьютерных средств на основе опережающей информации управления. В противном случае управление осуществляется как бы «вдогонку», что неминуемо приводит к отставанию технико-экономических показателей продукции от лучших мировых образцов. На это, в первую очередь, должно быть нацелено совершенствование системы многовариантного прогнозного обеспечения характеристик изделий.

К числу важнейших свойств, характеризующих текстильные материалы, является влияние различных деформационных свойств на качество рассматриваемых материалов, на всем протяжении, от исходного сырья до готового продукта.

1.2. Современные подходы к оценке деформационных свойств текстильных материалов

В процессе эксплуатации текстильные материалы постоянно испытывают различные физико-механические воздействия, в результате чего изделия подвергаются многократным деформационным процессам, поэтому более подробно остановимся на данном вопросе.

Под механической деформацией материала обычно понимают изменение геометрических размеров физически малых элементов его составляющих под действием внешних факторов или внутренних структурных изменений.

Физически малым считается элемент материала, размеры которого значительно меньше того изделия, которое сделано из этого материала, и в то же время, содержащий достаточно много атомов, молекул и более крупных образований надмолекулярной структуры, чтобы этот элемент сохранял физико-механические свойства материала.

Деформации могут быть вызваны механическими силовыми воздействиями других материальных тел или энергетическим обменом с окружающими телами: нагревом, охлаждением, облучением и др.

К внутренним факторам, приводящим к деформациям материала, можно отнести изменение связей в структуре элементов, которые перераспределяют напряжение внутри него и ведут к изменению его геометрии в новом равновесном состоянии.

Деформация представляет собой изменение расстояний и взаимного расположения составных частей материала вследствие действия различных факторов. Такое представление природы деформации объясняет разнообразие видов деформации [11].

Поскольку поведение материала при деформации весьма разнообразно, существует большое количество терминов и понятий, связанных с этим явлением.

Перечислим некоторые из них: упругость, хрупкость, эластичность, пластичность, текучесть, ползучесть, вязкость, старение, деградация, релаксация, анизотропия [12]. Изучению и разработке моделей явлений, связанных с этими понятиями, посвящены целые науки и теории: механика сплошной среды, механика деформируемой сплошной среды, мезо механика, сопротивление материалов, теория упругости, теория пластичности, реология, теория текучести, теория ползучести, теория старения и другие.

Многообразие поведения материалов под действием нагрузки и после нее обусловлено множественностью вариантов их строения. Любой материал можно рассматривать как систему, состоящую из большого количества элементов. В качестве элементов могут быть отдельные атомы или агрегаты из атомов – молекулярные и надмолекулярные структуры. Из них образуются упорядоченные структуры. Это моно- или поликристаллы, полимерные молекулы, аморфные образования разных уровней.

К числу важнейших факторов, влияющих на качество получаемой продукции, является зависимость между деформацией ϵ и напряжением σ , которая устанавливается экспериментальным путем. Долгое время для инженерных расчетов любого материала применялся закон Гука [11], установленный еще в XVII веке. В дальнейшем, ввиду явного несоответствия расчетов экспериментальным данным, проведенного на основе закона Гука, было признано необходимым определение функциональной зависимости σ от ϵ в виде так называемой диаграммы работы материала. Однако и эта диаграмма получала вполне определенный вид лишь при соблюдении заданной методики испытаний, особенно в части скорости приложения нагрузки и времени замера деформаций. Переход к расчету по фактической или условной (приближенной) диаграмме работы материала явился существенным шагом вперед в теории расчета и послужил основой для возникновения теории пластичности [13-19].

Теория ползучести является следующим этапом пути приближения расчетов

конструкций к действительным условиям их работы, устанавливающим зависимость между деформациями и напряжениями с фактором времени.

В настоящее время имеется огромное количество исследований, относящихся к оценке деформационных свойств готовой продукции во времени, и выполненных применительно к требованиям расчета различного вида изделий и из различных материалов. Для всех этих материалов существует много общих закономерностей, позволяющих строить абстрактную теорию ползучести, пригодную к соответствующим количественным изменениям характеристик, входящих в основные уравнения, или с частными упрощениями этих уравнений [11-19].

Как инженерная наука теория ползучести сформировалась лишь в середине двадцатого столетия, хотя многие закономерности теории ползучести были установлены экспериментально более чем 100 лет тому назад и довольно обстоятельно были обоснованы теоретически. Максвелл [11] впервые представил закон деформирования во времени в виде дифференциального уравнения, которое для ряда материалов применяется и в настоящее время. Позднее Больцман [12] создал достаточно общий математический аппарат для описания явлений линейной ползучести. Параллельно развивалось направление, в котором действительные свойства материалов уподоблялись свойствам различных упрощенных моделей.

Первой моделью такого рода была модель Максвелла, иллюстрирующая упомянутую выше дифференциальную зависимость Максвелла. Несколько иные достаточно простые модели предложены Кельвином, Томсоном [13], Фойгтом [15], Шведовым и др. На рисунке 1.4 приведены наиболее распространенные механические модели [15, 25, 152].

Модель Максвелла (рисунок 1.4, а) является наиболее простейшей моделью, состоящей из последовательно соединенных: идеальной пружины и демпфера. Однако механическая модель Максвелла не учитывает наличие в вязкоупругом материале обратимой высокоэластической и остаточной деформации [15]. Дальнейшее

развитие механического моделирования нашло свое отражение в моделях Кельвина-Фойгта (рисунок 1.4, б), высокоэластического элемента Догаткина, Бартенёва, Резниковского (рисунок 1.4, в), однако в этих моделях отсутствует компонента остаточной деформации при растяжении. Объединенная модель (рисунок 1.4, г) лишена этого недостатка, т.к. полная деформация складывается из трех составляющих. В тоже время данная модель работает только в области малых напряжений [15].

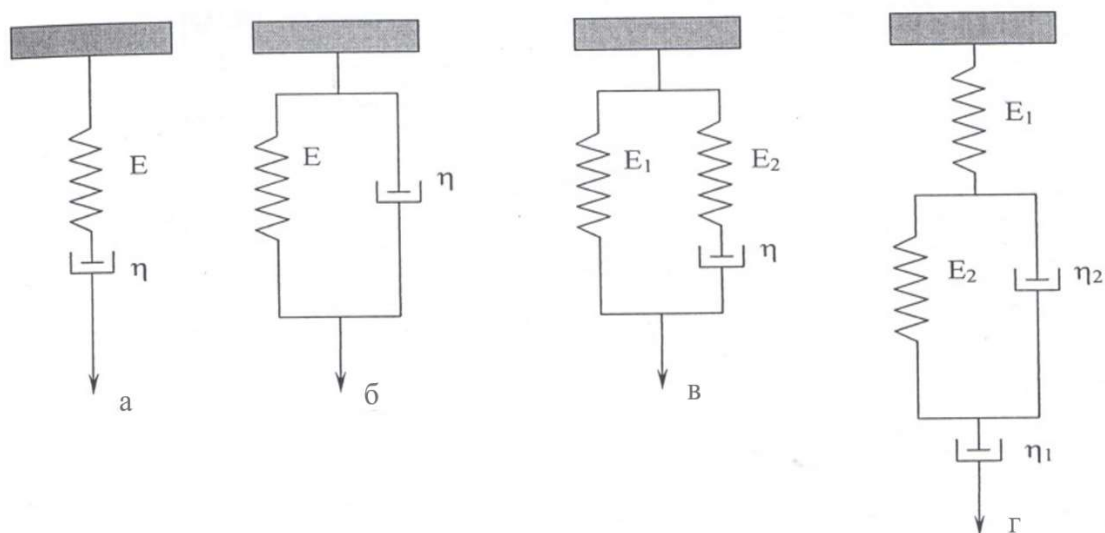


Рисунок 1.4. Механические модели, для определения деформационных свойств текстильных материалов: а – Максвелла; б – Кельвина-Фойгта, в – высокоэластического элемента Догаткина, Бартенёва, Резниковского, г – объединенная модель, используемая для определения релаксационных процессов в текстильных материалах [15]

Первые практические методы расчета на ползучесть, появившиеся в 20-х годах XX века. Тогда были предложены физические зависимости между деформациями ϵ и напряжениями σ , выражаемые следующими формулами:

– функциональная связь между напряжениями и деформациями, включающая в себя время t :

$$F(\varepsilon, \sigma, t) = 0 \quad (1.1),$$

(так называемая теория старения);

– такая же зависимость, но с заменой деформации на их скорости $\dot{\varepsilon}$:

$$\Phi(\dot{\varepsilon}, \sigma, t) = 0 \quad (1.2),$$

отражает, так называемая, теория течения. В этой зависимости мы наблюдаем операцию дифференцирования по времени t над переменной ε .

Эти функциональные зависимости легко находятся из экспериментов по нагружению образцов постоянными во времени напряжениями $\sigma = \text{const}$.

Однако на основе уравнений теорий старения и течения были решены многие задачи с переменными во времени напряжениями. Например, задача о релаксации, т.е. уменьшении напряжений во времени при постоянной деформации, или задачи о распределении напряжений в статически неопределимых системах и сплошных телах, когда даже при постоянной внешней нагрузке внутренние напряжения с течением времени изменяют свою величину. Несмотря на явную неправомерность таких решений, они получили широкое распространение в литературе и им посвящены монографии [17-19].

Более приемлемая форма зависимости между напряжениями и деформациями была предложена впервые Надаи [20] и Дэйвенпортом [21]:

$$\dot{\varepsilon}_n = \phi(\varepsilon_n, \sigma); \quad \varepsilon_n = \varepsilon - \sigma/E \quad (1.3),$$

где E – модуль упругости материала.

Эта форма имеет то преимущество, что в нее не входит время, и, следовательно, закон деформирования не зависит от начала отсчета времени, как и должно быть, для материалов с постоянными физико-механическими свойствами. Методы расчета, основанные на данной зависимости, получили название теории упрочнения. Эта теория наравне с другими и сейчас широко применяется на практике [19].

Проф. Гуль В.Е. в своей работе [22] указывает на невозможность в общем виде представить соотношение между напряжением, временем его действия и деформацией для вязкоупругих материалов. Однако возможно решение этих задач с использованием дифференциальных уравнений на основании изучения механических и физических свойств текстильных материалов [15].

В 40-х годах XX века получили распространение схематические представления структуры материала в виде моделей, приведенных в работах Максвелла, Кельвина, Фойгта [23]. Для таких моделей соотношения между напряжениями и деформациями представляются в виде дифференциальных уравнений, включающих в себя производные от напряжений и деформаций по времени первого и более высоких порядков. На основе этих зависимостей был решен большой круг задач, представленных в монографиях [24-35]. Предложенные теории ползучести, представленные в этих монографиях, в дальнейшем развивались по пути усложнения свойств отдельных элементов моделей; при рассмотрении свойств учитывалась переменность во времени, нелинейность и т.д. [36-42].

Дифференциальные соотношения, получаемые в этих моделях, не позволяли описывать поведение образцов в первые моменты времени после мгновенного приложения нагрузки. Поэтому вскоре на первое место в линейной ползучести выдвинулись более общие интегральные, так называемые наследственные, соотношения, теория которых была разработана Больцманом и Вольтерра. Развитие этой теории шло по линии связи ее с экспериментами, уточнения ядер интегральных зависимостей и применения к различным задачам практики. Здесь следует отметить работы Ю.Н. Работнова [29, 30], М.И. Розовского [34-36] и др.

Ю.Н. Работновым и М.И. Розовским были предложены формы наследственных зависимостей, пригодные для описания нелинейных процессов ползучести. В последнее время появились более общие нелинейные интегральные представления зависимостей напряжений от деформаций, связанных с использованием разнообразных материалов [37-41].

Необходимо отметить вклад таких ученых, как Н.А. Буданов, И.И. Улицкий, Бартенев Г.М. [37]. При этом были выдвинуты некоторые принципы, позволяющие правильно применять эту теорию к переменным во времени нагрузкам.

На основе этих принципов теория старения в ползучести может быть сведена к варианту наследственной теории ползучести.

Общая линейная наследственная теория ползучести была предложена с инвариантными во времени ядрами интегральных зависимостей Ржаницыным [24]. Учет переменности свойств требовал перехода к более общим неинвариантным ядрам. В этом направлении надо отметить работы Г. Н. Маслова [42]. На основе принципа наложения была разработана нелинейная наследственная теория ползучести, пригодная для больших напряжений. Эта теория соответствует нелинейно наследственному соотношению, предложенному М. И. Розовским [34, 35], а еще ранее Лидерманом [43] для других полимерных материалов. Теория ползучести разрабатывалась также применительно к расчетам грунтовых оснований, мерзлых грунтов, каменных конструкций, деревянных конструкций и т.д.

Среди свойств текстильных материалов большое значение имеют механические, поскольку текстильные изделия в эксплуатации постоянно подвергаются нагрузкам, вызывающим деформации растяжения.

В настоящее время многие исследователи [44-48] считают наиболее объективной оценкой качества текстильных материалов – выносливость, т.е. способность выдерживать без разрушения большое число повторяющихся переменных деформирующих и истирающих усилий. Постепенное расшатывание структуры текстильных материалов, нарушение связей между элементами структуры, характеризующие усталостью, внешне проявляются в образовании необратимых деформаций нитей и ткани, придающие отдельным участкам всякого рода мешковатость, обвислость и т.п.

Всестороннее, комплексное исследование механических свойств текстильных материалов и прогнозирование деформационных процессов возможно только

на основе системного анализа его вязкоупругих свойств, включающего в себя:

- экспериментальные исследования;
- построение математической модели вязкоупругости, наиболее адекватно отражающей деформационные свойства текстильного материала;
- определение вязкоупругих параметров текстильного материала;
- моделирование деформационных процессов [46].

Важными механическими характеристиками текстильных материалов являются его упругие и деформационные свойства, определяющие их способность изменять форму под воздействием нагрузки и восстанавливаться после ее снятия.

Установление взаимосвязи между деформацией, напряжением, скоростями их изменения и временем является важной задачей для разработки научно-методических подходов к определению надежности текстильных материалов.

В настоящее время предложены различные модели и теории для описания поведения материалов под действием различных факторов и в разных условиях эксплуатации. Это и наследственные теории, технические теории ползучести, включающие в себя теорию старения, упругости и др.

Основой наследственных теорий является линейная теория наследственности, предложенная Больцманом, которую впоследствии развил Вольтерра. Значительный вклад в этом направлении исследований внесли такие ученые как Г.Л. Смолинский, В.А. Каргин, Ю.Н. Работнов, М.И. Розовский, Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев, А.Г. Макаров, А.М. Сталевич и др. [44 -58].

Большой вклад в изучение и оценивание деформационных свойств текстильных материалов оказали работы таких авторов как Г.Н. Кукин, Hearle I.W.S., К.Е. Перепелкин, В.П. Щербаков, В.Ш. Саркисов, А.М. Сталевич, А.Г. Макаров, Ф.В. Демидов, Н.Н. Труевцев и др. [59-65].

Для определения механических характеристик необходимо построение математической модели, отражающей физический смысл и концептуальные закономерности механического поведения текстильных материалов.

Проф. Кукиным Г.Н., и проф. Соловьевым А.Н. [66] предложены 3 класса кривых растяжения, описанных уравнениями:

$$P = AL^k, P = B\varepsilon^k, \sigma = C\varepsilon^k \quad (1.4),$$

где A, B, C, k – постоянные коэффициенты, зависящие от вида волокон и нитей, и принятых характеристик.

Типовые кривые растяжения волокон и нитей [66] представлены на рисунке 1.5.

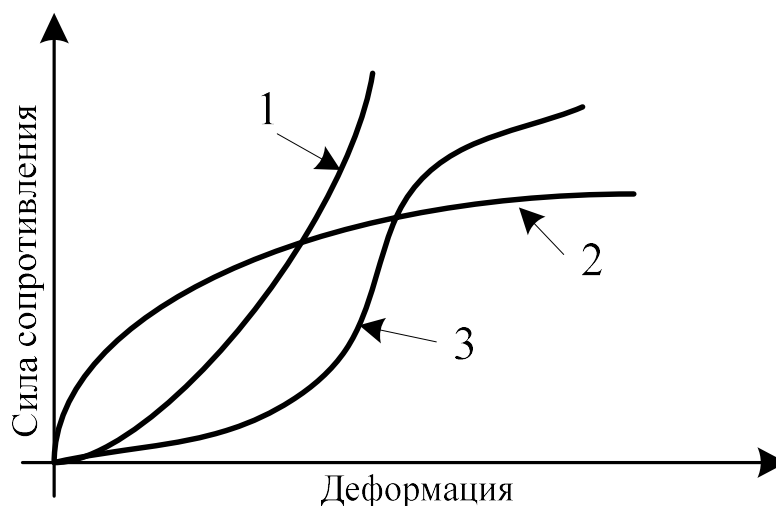


Рисунок 1.5. Типовые кривые растяжения волокон и нитей [64]

При $k > 1$ модель отвечает кривой 1-го типа, при $k < 1$ соответствует кривой 2-го типа, кривые 3-го типа разбиваются на несколько зон [15].

Однако проф. Соловьев А.Н. отмечает, что предложенные уравнения не позволяют получить достаточную точность описания полученных результатов, т.к. отсутствуют способы определения приведенных коэффициентов.

В работе [67] говорится о том, что фрикционные свойства текстильных материалов существенно влияют на технологический процесс. К таким свойствам относятся коэффициенты трения, жесткость волокон на изгиб. В работе разработана ме-

тодика оценки жесткости различных волокон с использованием разрывной машины, сопряженной с ЭВМ.

В статье [69] приведены экспериментальные исследования напряженно-деформационного состояния материалов посредством использования стробоскопического эффекта, позволяющего с достаточной точностью решать вопросы измерения их деформации в лабораторных и производственных условиях.

В работах [69-71] предложена методика построения математической модели, которая позволяла с достаточной степенью точности определять механические характеристики материалов. Основными механическими характеристиками текстильных материалов, подлежащими определению, являются параметры процессов релаксации и ползучести [72, 73]. К параметрам релаксации относятся: модуль релаксации $E(\varepsilon, t)$, зависящий от деформации ε и от времени t , со своими асимптотическими значениями – модулем упругости E_0 и модулем вязкоупругости E_∞ , времена релаксации $\tau_\varepsilon = \tau(\varepsilon)$, представляющие некоторую функцию деформации, и коэффициент интенсивности процесса релаксации b .

Учитывая убывающий характер модуля релаксации, простейшую математическую модель релаксации можно описать следующим уравнением [74]:

$$E(\varepsilon, t) = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi(\varepsilon, t) \quad (1.5),$$

где в качестве $\varphi(\varepsilon, t)$ выбирается некоторая нормированная возрастающая функция, включающая в неявном виде времена релаксации τ_ε и коэффициент интенсивности процесса $1/b_\varepsilon$.

Авторами предложен вариант функции $\varphi(\varepsilon, t)$ в виде нормированного арктангенса логарифма приведенного времени и показаны преимущества ее применения для моделирования свойств текстильных материалов сложной макроструктуры (пряжи, тканей, лент и т.п.).

В работе [75] представлена методика разделения механической работы де-

формирования на составные части: упругую и рассеивающуюся, которую, в частности, рекомендуется использовать при расчетах сопротивления синтетических тканей к ударной нагрузке. Для повышения надежности математического моделирования предлагается использовать компьютерно-интегральный критерий при выборе варианта нормированных функций релаксации и запаздывания, что повышает достоверность решений технологических и механических задач.

Проф. Мигушовым И.И. [76] изложены теоретические основы нелинейной механики жесткости нити пространственной конфигурации, теоретические основы нелинейной механики на основании использования элементов теории идеально гибкой нити, теории изгиба и кручения. При изучении процессов, происходящих во время производства текстильных нитей, широко применяются элементы нелинейной теории упруговязкой пластической деформации.

В работе [77] дан анализ компьютерных методов разделения полной механической работы и соответствующей ей деформации на упруго обратимые и вязко- и упругопластические компоненты, которые предполагается использовать при расчетах сопротивления текстильных материалов как в динамических режимах деформирования, так и для оценки их способности сопротивляться механическим воздействиям и восстанавливать первоначальную форму в процессе эксплуатации.

В работе [78] рассмотрено применение теории нелинейно-наследственной вязко упругости для уточнения среднестатистического времени релаксации и запаздывания других вязкоупругих характеристик.

В настоящее время общепризнанным в теории нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров считается физический подход, основанный на идее Александрова-Гуревича [79], где учитывается влияние приложенного напряжения или деформации на ускорение деформационных процессов. Основой для построения математических моделей нелинейно-наследственной теории является принцип Больцмана [80] суперпозиции откликов на предысторию деформирования, аналитически выраженный в интегральных соотношениях Больцмана-Вольтерра [81, 82,

86].

В работе [83] говорится о преимуществе применения для моделирования деформационного процесса, основанного на интегральных соотношениях Больцмана-Вольтерра с интегральными ядрами релаксации и запаздывания. Применение указанных интегральных ядер обеспечивает возможность расширения области доверительного прогнозирования, как в сторону длительных процессов, так и в сторону кратковременных процессов с уменьшением погрешности прогноза за счет снижения влияния квазимгновенного фактора деформирования. В работе разработаны компьютерные методы определения вязкоупругих характеристик по результатам кратковременных испытаний на простых режимах релаксации и ползучести в сочетании с диаграммами растяжения.

В работе [84] приводятся упрощенные математические модели вязкоупругости за счет учета нелинейности в интегральных ядрах релаксации и запаздывания в виде учета функций времен релаксации и запаздывания. Следует заметить, что изучение проявляющихся в условиях эксплуатации механических свойств, гораздо сложнее, чем измерение только лишь разрывных характеристик, по которым нельзя получить полноценную объективную оценку свойств материалов.

Проф. Тиранов В.Г. [85] предлагает описывать нелинейную зависимость между напряжением и деформацией комплексных химических нитей с использованием интегральных уравнений наследственного типа в виде логарифмического нормального распределения, полученных по семейству кривых релаксации напряжения.

Наличие нескольких математических моделей, использующих разные функции релаксации и запаздывания, позволяет получать не зависящие друг от друга результаты прогнозирования деформационных процессов. Вязкоупругие характеристики, полученные усреднением деформационных характеристик, определенных с помощью различных методов, обладают большей степенью достоверности, чем

характеристики, полученные по одному методу. При аппроксимации процессов релаксации и ползучести нормированными функциями возникает вопрос о правомерности такого подхода. Ответ на данный вопрос дают критерии правдоподобия [86], применение которых позволяет оценить значение относительной погрешности такой аппроксимации. Компьютеризация указанных критериев позволяет получить наглядное средство подтверждения достоверности рассчитанных вязкоупругих характеристик. В работе получен метод численного решения задачи о резольвенте определяющих интегральных уравнений релаксации и ползучести для случая нелинейности вязкоупругих свойств текстильных материалов. Численное обращение интегральных ядер релаксации и запаздывания, а также соответствующих им нормированных функций в виде нормированного арктангенса логарифма приведенного времени для многокомпонентной пряжи позволяет сделать вывод о правильности выбора данной функции в качестве основы модели вязкоупругих свойств [86].

В работе [87] предложен вариант приближенного аналитического решения задачи и резольвенты (от лат. *resolvere* – здесь: решать, используется в математике в различных значениях. Объединяет их все основное свойство резольвенты: решение резольвенты уравнения позволяет решить и само уравнение), определяющих интегральных уравнений процессов релаксации и ползучести текстильных материалов, полученный при условии линейности вязкоупругих свойств. Полученный результат позволяет рассчитать параметры процесса релаксации по параметрам процесса ползучести и наоборот [70].

В широко известных моделях Максвелла, Фойгта, Кельвина и др. [88] сделано допущение о постоянстве физико-механических характеристик волокон или нитей на всей протяженности их длины. Такое допущение приводит к существенным погрешностям при решении реальных задач. По данным механические свойства химических волокон при одних и тех же условиях испытаний отличаются до 2...5 раз, для натуральных волокон – до 10 и более раз.

В работе [89] рассмотрен конечно-элементный подход для описания поведения волокон и нитей с произвольными вероятностными механическими характеристиками по длине. Предложен алгоритм определения матриц жесткости конечных элементов – аналогов механических моделей произвольной сложности. Задача в общем виде формулируется так: составить аналитическое выражение матрицы жесткости нити, имеющей длину L и N участков длиной ℓ . Каждый из участков имеет свои физико-механические характеристики и поведение материала описывается различными механическими моделями. Из рассмотрения механических моделей вязкоупругого материала видно, что для его описания при нагружении необходимо использовать два или более элементов, имитирующих упругие и вязкие свойства. Поэтому логично предположить описывать механические свойства подобных материалов с помощью комбинации конечных элементов с аналогичными свойствами. В работе предложен алгоритм, который позволяет вычислить матрицу жесткости комбинированного конечного элемента, эквивалентного по своим свойствам произвольной механической модели поведения материала при одноосной нагрузке.

В работе [15] разработана модель влияния масштабного фактора на прочностные характеристики текстильных нитей; обоснован ряд дополнительных показателей, характеризующих неравномерность прочностных характеристик по длине нити, и разработана методика их оценки по результатам полуциклового испытания на растяжение. Применение данной методики не только повышает информативность полуциклового испытания на растяжение, но и позволяет всесторонне оценить качество нитей с учетом ее дальнейшего использования [15].

В работе [90] предложена методика исследования напряженно-деформационного состояния волокнистых материалов с использованием метода конечных элементов, которая позволяет сократить процедуру поиска рациональных технологических и технических решений, обеспечивающих требуемую точность воспроизведения заданной функции.

В работе [91] рассмотрены модели стандартного вязкоупругого тела с переменной во времени вязкостью. В результате при описании деформационных свойств текстильных материалов с использованием рассматриваемой модели имеет место резольвентное ядро, которое более удобное для практических расчетов, чем полученное через преобразование Лапласа.

На изменение упруго релаксационных характеристик нити преобладающую роль оказывают такие показатели как нагрузка, влажность. В работе [92] установлено, что при взаимодействии влаги и напряжения происходит протекание в образцах двух параллельных процессов пластификации, что приводит к возрастанию жесткости образцов при больших напряжениях независимо от влагосодержания.

В работах [70, 93] рассмотрена методика решения задач нелинейно-наследственной вязкоупругости, разработанной для текстильных материалов сложного строения применяемая к швейным нитям с целью определения характеристик релаксации и ползучести. Установлено, что с увеличением степени крутки происходит ускорение процессов релаксации и ползучести. Кроме того, выявлено, что с ростом крутки функции среднестатистического времени релаксации и запаздывания сдвигаются в сторону малых деформаций и напряжений.

При исследовании процессов релаксации или ползучести текстильных материалов с учетом влияния температуры обычно прибегают к температурно-временной аналогии [70, 94], заключающейся в том, что кривые "семейства" модуля релаксации E_{Tt} , соответствующие некоторому значению деформации ε_0 , или кривые "семейства" податливости D_{Tt} , соответствующие некоторому значению напряжения σ_0 , полученные при разных значениях температуры, путем сдвига трансформируются в обобщенные кривые релаксации или ползучести. Сдвиги кривых указанных "семейств" определяют температурно-временную функцию $f_{IT} = \ln(T_I / \tau_I)$, где t_I – значение внешнего базового времени; τ_I – значение внутреннего времени эксперимента, зависящее от температуры T . Недостатком указанных методик является то, что вязкоупругие характеристики определяются для фиксированных значений

деформации ε_0 (в случае релаксации) или напряжения σ_0 (в случае ползучести) и, таким образом, не могут быть распространены на другие значения деформации ε и напряжения σ . Установлено, что асимптотические значения модуля релаксации и податливости, а также структурные параметры интенсивности процессов релаксации и ползучести в первом приближении линейно зависят от температуры [70, 94]. Приведенные методики определения механических характеристик текстильных материалов при переменной температуре позволяют прогнозировать термовязкоупругие процессы.

В работе [95] показано, что моделям стандартного вязкоупругого тела с переменной во времени вязкостью соответствуют ядра Слонимского-Бронского, а также уравнение Кольрауша. При описании деформационных свойств текстильных материалов с использованием приведенных моделей имеют резольвентное ядро, более удобное для практических расчетов, чем полученное через преобразование Лапласа.

В работе [96] на основе анализа зависимостей $E(\varepsilon)$, полученных на основе обработки экспериментальных диаграмм $F(\varepsilon)$, предложены ряд эмпирических формул для определения модуля деформации хлопковой пряжи в процессе ее растяжения в зависимости от параметра, характеризующего ее структурные изменения при деформировании. Предложена нелинейная упруго-вязкопластическая модель деформирования хлопковой пряжи, разработанная на основе механической модели стандартно-линейного тела.

В работе [97] проводились исследования диаметра классической хлопковой пряжи и нити. Установлено, что при одинаковой номинальной линейной плотности значения видимых диаметров в свободном и растянутом состояниях для нитей с ядром на 4...6% больше, чем у классических праж.

В работе Налетова В.В. [98] установлено, что в условиях кратковременного напряжения при малых амплитудах относительной деформации менее 0,1% для хлопчатобумажной пряжи, поведение текстильных материалов характеризуется

упругим состоянием. Если же амплитуда выше, целесообразно использовать модель Кельвина-Фойгта.

В нелинейной теории ползучести следует отметить еще направление, связанное с использованием кусочно-линейных зависимостей для различных участков процесса деформирования. Это направление, имеющее целью упрощение методов решения задач, пока еще не получило большого развития.

В работе [15] предложена модель влияния масштабного фактора на прочностные характеристики текстильных нитей, обоснован ряд дополнительных показателей, характеризующих их неравномерность по длине нити и разработана методика их оценки по результатам полуциклового испытания на растяжение. Представленные математические модели прогноза долей полной деформации текстильных нитей в зависимости от введенных безразмерных показателей упругости и пластичности, определяемые по результатам полуцикловых испытаний на растяжение [15].

В работе [99] на основании современных представлений о реологическом строении полимеров разработана математическая модель, описывающая вязкоупруго-деформационные свойства одноосно-ориентированных полимерных текстильных материалов в широком диапазоне значений напряжений, деформации. Дана методика математического моделирования и расчетного прогнозирования релаксационных и деформационных процессов в различных эксплуатационных режимах.

В монографии [100] излагаются основы деформирования и прочности текстильных нитей и полотен, рассматриваемых с применением современных теорий. Приводятся аналитические методы расчета на базе теории упругости анизотропного тела, реологические модели.

Одномерные уравнения ползучести обычно обобщаются на двух- и трехмерные задачи с использованием соотношений, применяемых в теории упругости и теории пластичности. Для расчета систем, составленных из одного материала, задачи линейной ползучести обычно сводятся к задачам теории упругости. Более

сложными являются случаи расчета систем, состоящих из различных материалов. Также сложным является расчет систем при наличии нелинейной ползучести, и здесь имеются решения лишь для ограниченного числа задач при частных видах нелинейных зависимостей деформаций от напряжений.

Многие исследователи, занимающиеся проблемами механики нитей и тканей, отмечают сложность моделирования реальных технологических процессов с учетом реального строения нити и ее вероятностных физико-механических и геометрических свойств. Для исследования поведения таких сложных систем и процессов хорошие результаты дает применение математического анализа и компьютерного моделирования, которое позволяет исследовать влияние различных факторов как независимо друг от друга, так и в сложном их сочетании [101]. Полученная в работе конечно-элементная модель нити учитывает геометрическую неоднородность (неровнота, колебания размеров и формы поперечного сечения) и неоднородность механических свойств, присущих реальным текстильным материалам. Это дает возможность моделировать вероятностные физико-механические и геометрические свойства нити. Наличие объемных КЭ SOLID в комбинированной структуре модели нити дает возможность создать на ее основе трехмерную конечно-элементную модель ткани, тем самым становится возможным учитывать объемное контактное взаимодействие нитей основы и утка. Использование принципа гомогенизации дает возможность перехода к псевдоплоской геометрии текстильного материала, что значительно сокращает время расчетов и способствует увеличению масштабов проектирования.

В работе [102] получены модели, позволяющие вычислять вероятность недоработки, получения длинного волокна и волокнистых отходов на основе теории Марковских процессов, а также оценивать интенсивности перехода волокон по этим состояниям.

В работе [103] в результате пассивного эксперимента по установлению причинно-следственной (корреляционной) связи между группами факторов и каждым

проектируемым показателем качества пряжи получены линейные математические модели. Количество влияющих факторов в каждом уравнении колеблется от одного до шести, что позволяет не только расширить общий перечень учитываемых факторов (их общее количество составляет 20), но и получить взвешенную оценку значения проектируемого показателя в различных аспектах. Эффективная реализация такой многофакторной методики возможна в условиях искусственной нейронной сети с обратной связью (рекуррентная нейронная сеть) (рисунок 1.6). Именно этот инструментарий позволяет применять полученные математические модели в режиме конкуренции, когда вклад (весомость) уравнений и даже их структура могут меняться под влиянием результатов мониторинга фактических значений проектируемых показателей качества. В ней определены номинальные значения по таким показателям качества пряжи, как удельная разрывная нагрузка, коэффициент вариации по разрывной нагрузке, коэффициент вариации по линейной плотности, число пороков на 1000 м, коэффициент использования прочности волокон в пряже. Сформулирован единый подход и разработана методика проектирования номинальных значений определяющих показателей качества текстильных изделий на основе методологии рекуррентных искусственных нейроновых сетей.

В работе [104] разработана методика определения вязкоупругих характеристик, входящих в уравнение ползучести с функцией арктангенс от степенного аргумента с применением принципов напряженно-временной и температурно-временной аналогий. Разработаны принципы и представлена модель, описывающая изменения крученной нити под нагрузкой, в которой поведение компонентов отображается трехэлементной механической моделью. На основании ее анализа установлено, что время релаксации компонентов нитей увеличивается с ростом угла крутки, в то время как релаксация самой нити и коэффициент вязкости уменьшаются.

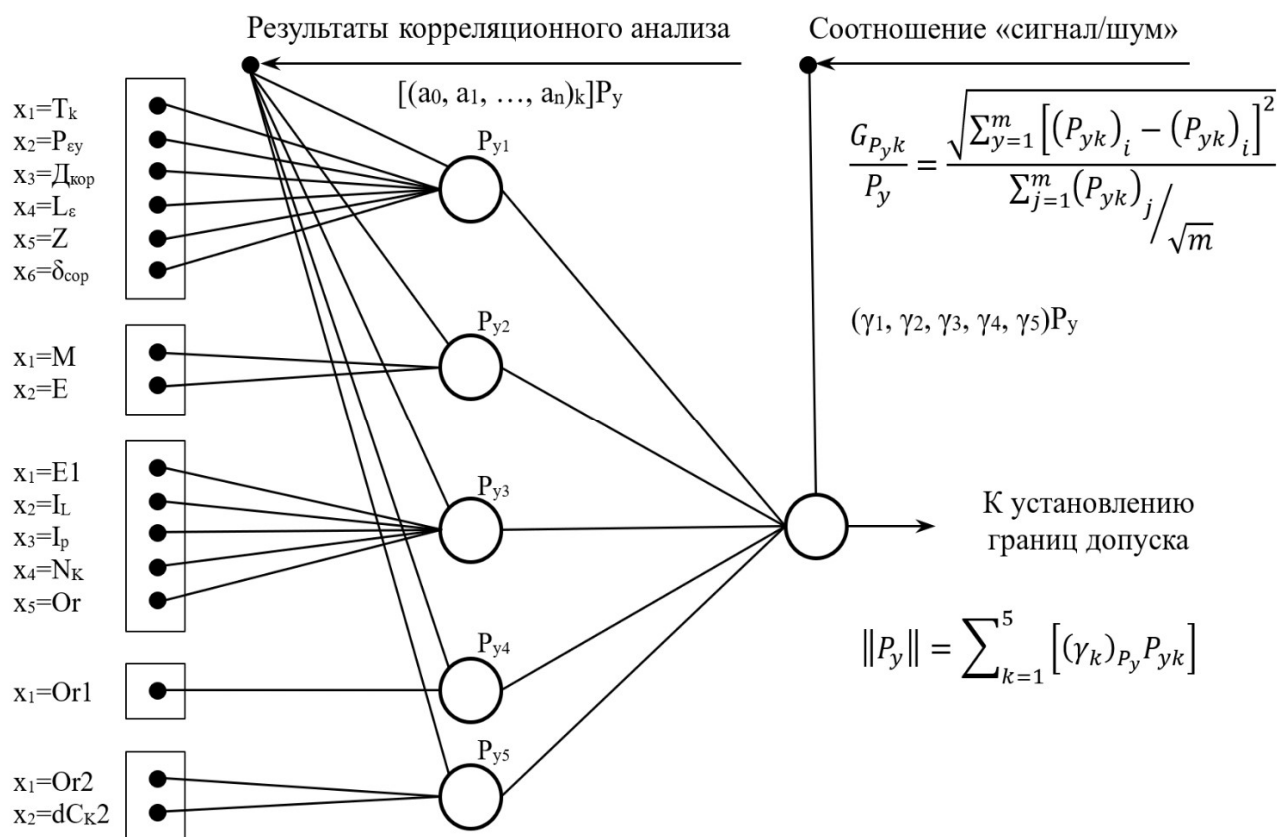


Рисунок 1.6. Искусственная нейронная сеть

В статье [105] рассматриваются вопросы проведения сравнительного анализа деформационных и релаксационных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе. Показано, что разработанные методики разделения деформационных процессов арамидных текстильных материалов на упругие и вязкоупруго-пластические составляющие позволяют решать задачи по качественному отбору материалов, обладающих определенными упруго-механическими свойствами. Сравнительный анализ вязкоупругих характеристик арамидных текстильных материалов и образующих их нитей проясняет внутренний характер релаксации и ползучести арамидных тканей и шнуров – деформирование в первую очередь происходит за счет конформационно-структурных перестроек геометрического характера. Изменение геометрической структуры арамидных тканей существенно влияет на перераспределение упругих и вязко-упругопластических свойств и явля-

ется основой для решения технологических задач проектирования и отбора материалов, обладающих заданными упругими и вязко-упругопластическими свойствами [105].

В работе [106] для установления влияния технологических параметров переработки сырья на физико-механические свойства тканей предложена бинарная теория информации, которая позволяет установить причинно-следственные связи между всеми исследуемыми факторами и количественно оценить их интенсивность.

Однако, несмотря на достаточно большое число исследований в области моделирования реакции материалов на воздействие различных физико-механических факторов, и большого числа предложенных моделей, комплексного описания поведения текстильных материалов под нагрузкой не представлено.

1.3. Многофункциональный подход к определению свойств текстильных материалов

Качество – это основное требование, которые предъявляет потребитель или заказчик к любой продукции. Повышение технического уровня, качества изготовления, а также обеспечение высоких эксплуатационных характеристик должно соответствовать стадиям жизненного цикла продукции. Необходимым элементом этого процесса является выработка научно-технических прогнозов, которые служат основой для разработки долгосрочных прогнозов [107-111].

Безусловной необходимостью использования системного подхода к решению поставленной задачи позволит осуществлять управление качеством рассматриваемых материалов.

Зависимость результатов испытаний текстильных материалов от большого количества параметров затрудняет создание общей классификации, поэтому многие авторы ограничиваются рассмотрением только ряда параметров, в тоже время

при использовании конкретного метода испытаний, встает вопрос применения дополнительных параметров испытаний. В настоящее время большое распространение получили классификации методов испытаний на основе механических характеристик усталости.

И.Х. Диллон и Ф. Винклер в своих классификациях рассматривают только параметры цикла и не учитывают другие факторы [108, 109].

Г.Н. Кукин и М.П. Носов для определения усталостных характеристик материалов разбили деформацию на четыре класса (рисунок 1.7) [110, 111]:

- а) многократное растяжение;
- б) многократный изгиб;
- в) многократное растяжение, чередующееся с продольным сжатием;
- г) многократное сжатие с одновременным изгибом.

Причем каждый из этих классов делится на подклассы и группы.



Рисунок 1.7. Классификация испытаний нитей на динамическую усталость по Кукину-Носову, [110, 111]

Как видно из приведенной классификации, она представляет собой иерархическую систему, где в основном все сосредоточено на 4 группах и условиях, при которых эти исследования могут быть проведены. Однако, в зависимости от вида исследуемого материала, эта классификация может изменяться, подстраиваясь под требования заказчика.

А.А. Янкунас и В.И. Юркевичус [112] предлагают классифицировать методы испытаний на многократное растяжение на 2 класса (рисунок 1.8). К первому классу относятся методы испытания, где постоянство условий испытания не сохраняется, ко второму – где сохраняются. Второй класс разбит на четыре подкласса. В первом подклассе поддерживается постоянство амплитуды заданной циклической нагрузки, а в остальных трех постоянство амплитуды заданной циклической деформации. Разница заключается в том, что в пульсаторах одного подкласса масса образца сохраняется постоянной в течение всего эксперимента, а в пульсаторах других подклассов они изменяются. Подклассы, в свою очередь, делятся на 14 групп.



Рисунок 1.8. Классификация методов испытаний нитей при многократном растяжении по Янкунасу-Юркевичусу

Как видно из приведенной классификации, имеет место многокомпонентная классификация оценки качества рассматриваемых материалов.

При классификации методов испытаний на усталость при многократном растяжении нити [113] всего получается три класса испытания, в которые входят семь подклассов (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9. Классификация методов испытания на усталость при многократном растяжении нити

При испытаниях на усталость большое влияние на результаты оказывает выбор параметров испытания. Испытания могут проходить с поддержанием и регистрацией абсолютного значения деформации Δl или относительного $\mathcal{E}$. В обоих случаях можно поддерживать и регистрировать значение абсолютных нагрузок P или относительных, т.е. напряжения σ . При поддержании относительного значения деформации $\mathcal{E}$ возможны методы испытания с сохранением постоянной массы образца или постоянной длины образца.

Испытание нитей различными методами многократного растяжения иногда дает несопоставимые результаты. Поэтому часто возникает вопрос, какие условия испытания следует выбрать, чтобы результаты оказались сопоставимыми, или какие существуют способы пересчета результатов испытания одного метода в результаты другого.

Отсутствие стандартных методов определения характеристик изгиба текстильных полотен в динамических условиях испытаний затрудняет обоснованный выбор материалов и не позволяет прогнозировать поведение изделий в эксплуатации. Стандартный метод (ГОСТ 10550-93) определения характеристик изгиба реализует статический характер испытаний. Для получения полной картины о деформационных процессах, происходящих в ткани при изгибе, необходимо изучать процесс восстановления ткани после изгиба [114]. Известный метод вынужденных резонансных изгибных колебаний консольно закрепленной пробы позволяет выявить характеристики изгиба материалов в динамическом режиме [100]. Однако недостатками резонансных испытаний является трудность определения амплитудно-частотной характеристики. Используемый микроскоп вносит субъективную составляющую в процесс измерений. Отсутствие автоматизированной записи и обработки результатов экспериментов (графики АЧХ строятся вручную) снижает информативность и достоверность полученных результатов.

Предлагаемые авторами классификации методы испытаний, охватывающие многократное растяжение, изгиб и ряд других показателей, делают эти модели трудоемкими и сложными в обработке. Поэтому необходимым условием является выбор наиболее оптимального типа и метода испытания для каждого конкретного рассматриваемого текстильного материала.

В этой связи, ключевая роль в процессе проектирования и оценки качества рассматриваемых материалов принадлежит цифровым двойникам, построенным при помощи современных компьютерных средств, которые представляют собой динамическую копию этих объектов и позволяющим прогнозировать поведение, рассматриваемых образцов в зависимости от их исходного состояния и условий эксплуатации.

Выводы по главе 1

1. К числу важнейших задач, определяющих экономическую и социальную значимость продукции текстильной промышленности, является разработка высокоэффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий с использованием отечественного сырья и отечественного технологического оборудования, повышения качественных показателей текстильных материалов различного назначения. Для ее решения необходимо проведение комплексного анализа свойств текстильных материалов.

2. В результате изучения работ российских и зарубежных ученых, выявлены основные направления повышения качества текстильных материалов. Анализ существующих методов и средств оценки показателей качества текстильных материалов позволил сформулировать современные тенденции развития текстильного материаловедения и подходов исследования жизненного цикла продукции легкой промышленности, начиная от исходного до готового продукта, зависимости ее от ряда факторов на всех этапах технологической переработки.

3. Установлено, что среди различных принципов обеспечения качества и конкурентоспособности продукции большое значение отводится использованию современной техники и технологии на этапах проектирования, управления, производства, измерения и контроля качества.

4. Как показал обзор литературных источников в практике текстильного материаловедения, несмотря на наличие достаточно большого числа работ, нет единого мнения об оценке влияния различных деформационных свойств на качество готовой продукции, что в первую очередь связано с необходимостью контроля продукции на всем протяжении ее получения, начиная от исходного волокна до готовой продукции.

5. Рассмотрены имитационные модели, включающие в себя математические, логические, эвристические элементы и позволяющие на основании имеющейся информации об объекте, получать данные о будущем состоянии рассматриваемого материала.

6. В настоящий момент разработан широкий спектр методов оценки качества текстильных материалов, а также протекающих в них процессах, которые могут быть использованы для предсказания поведения того или иного материала. Использование цифровых двойников позволяет сократить затраты времени и ресурсы на принятие решения о целесообразности использования данного объекта в тех или других условиях эксплуатации. Но для этого необходимо всестороннее рассмотрение исследуемого материала, начиная от исходного волокна и заканчивая готовой продукцией.

7. Исходя из вышеизложенного, в ходе исследования была поставлена и решена задача: провести анализ поведения исходных натуральных волокон, их совместной переработки с химическим волокнами, с последующим получением из них пряжи, тканей и текстильных полотен, при этом особое внимание уделить деформационным и релаксационным свойствам, предложить ряд методик обработки полученных данных с использованием современных компьютерных систем.

ГЛАВА 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Системно-функциональный подход, как целеполагающее направление в научных исследованиях исходит из приоритета системного анализа к организации живой и не живой материи, естественных, социальных и прочих явлений окружающей нас реальности. Предполагает изучение элементов, структуры и функциональных связей, составляющих эту систему.

Структура – определенный набор устойчивых связей между элементами, гарантирующий основные свойства, изучаемого объекта. Структурный подход направлен на изучение внутреннего устройства системы и взаимодействия ее элементов, факторов, влияющих на ее устойчивость и гармоничность функционирования.

Основная задача структуры – обеспечение прочности, устойчивости всех связей между элементами для стабильного и эффективного функционирования системы, для реализации ей своей функции в общем межсистемном взаимодействии. Она должна выражать всю полноту межкомпонентного взаимодействия.

Элементы, могут быть, как уникальны и присущи только какой-то конкретной системе, так и повторятся, входить в другие. Выполнять, как аналогичные, так и разные функции. В статических системах, элементами будут компоненты ее структуры, а в динамических, они будут находится в процессе функционирования, выступать фазами процесса [9].

Ее организация – всеобщая системная характеристика, выступающая в двух основных аспектах:

- свойство обеспечения ее функциональности (статический аспект);
- процесс, формирующий это свойство (динамический аспект).

Основными принципами системы являются: целостность, сложность и иерархичность ее организации.

Целостность – предполагает самостоятельное изучение конкретной системы,

обособленной от других объектов исследования, обладающей своими специфическими свойствами, принципами организации и законами функционирования.

Любая система имеет сложную, упорядоченную, иерархичную структуру организации и взаимосвязи элементов. Зависит от воздействия внешних факторов.

Функция – это целенаправленная деятельность элементов в активной системе в рамках их места в ее структуре. Результаты действия каждого из них суммируются и определяют функционирование всей системы в целом. Таким образом, функция – это отношение части к целому, при котором наличие того или иного частного, либо его отсутствие, выполнение/не выполнение им своих задач определяет поведение и форму проявления целого [9].

Каждый элемент выполняет свою функцию и зависит от других структурно с ним связанных. Их взаимосвязь обеспечивает определенная структура. Когда она находится в равновесии и каждый элемент выполняет свою задачу, то мы говорим о функциональности системы. В случае нарушения взаимосвязей или не выполнении ими своих функций – дисфункциональности, которая в конечном итоге может привести к ее разрушению.

Системно-функциональный подход включает в себя комплексный анализ, изучаемого предмета, объекта или явления с учетом особенностей элементов, его образующих и структуры их взаимосвязей, а также взаимодействия с внешней средой и динамики изменения его функциональных характеристик.

В отличие от традиционного подхода, при котором анализ осуществляется от простого к сложному, от частей к целому, в системно-функциональном исследовании, наоборот, изучение происходит от сложного к простому, от системы к ее элементам и взаимосвязям между ними.

Системы бывают: материальными и идеальными.

Материальные существуют в пространстве и времени. В процессе анализа целесообразно изучить в начале их пространственные характеристики, осуществить моделирование и представить полученные результаты в виде графиков и трехмерных моделей, сформировать ее архитектуру.

Характер и динамику функционирования систем наблюдают в диахронии.

Синхрония позволяет изучать их моментальные состояния на конкретном отрезке времени. Это дает возможность сформировать хроноструктуру, отражающую изменения в структуре и элементах. Хроноструктура линейна, не имеет пространственных характеристик.

К идеальным (духовным) системам относят: научно-теоретические, проектные, культурно-религиозные, политико-идеологические, художественные. Они существуют вне пространства и вне времени. Вместе с тем, идеальные структуры имеют материальное воплощение через художественные образы, тексты, термины, формулы и знаки, они организованы в определенные иерархические системы со своими, присущими только им элементами и связями [9]. Так, например, текстильное материаловедение, включает в себя свои научные понятия и термины, гипотезы, законы и теории. Имеет свою иерархию, внутреннюю организацию, методологию, структуру. Представлена на различных материальных носителях знаний.

Имитационное моделирование при помощи современных компьютерных средств позволяет прогнозировать с достаточной степенью достоверности архитекtonику и хроноструктуру на разных этапах проводимого эксперимента.

Системы классифицируют по следующим основаниям:

- по степени сложности структуры: простые (в которых отсутствуют подсистемы) и сложные, включающие в себя две и более подсистемы; одноуровневые и многоуровневые;
- по степени организованности: слабо организованные, хорошо организованные и самоорганизующиеся;
- по взаимодействию с внешней средой: открытые и закрытые.

Открытые – те функционирование которых не изменится, или не претерпит серьезных изменений в случае удаления/добавлении одного или нескольких элементов, или при частичном нарушении/изменении взаимосвязей между элементами.

Закрытые – изменение числа элементов или взаимосвязей между ними ведет к изменению самой системы или к ее разрушению.

Исходя из имеющейся классификации можно сделать вывод, что текстильные материалы – это сложные многоуровневые, слабо организованные (из-за характерной для волокнистых материалов неоднородности структуры и большого статистического разброса их характеристик), закрытые системы, текстильное производство – сложная многоуровневая, хорошо организованная, открытая система.

Функциональный подход к определению и прогнозированию свойств текстильных материалов направлен на выявление особенностей, законов и закономерностей функционирования текстильных систем.

Одной из первых попыток использования функционального подхода можно считать применение метода, известного под названием «черный ящик», где структура и ее элементы неизвестны или сложны. Абстрагируясь от самого «черного ящика» и знаний о нем, предпринимаются попытки определить функциональные зависимости между входными воздействиями и выходными характеристиками, получаемой продукции. Данный подход оправдан для простых, одноуровневых, закрытых систем. В более сложных вариантах велика погрешность и не предсказуемость получаемых результатов. Для прогнозирования свойств текстильных систем он может быть рекомендован с определенными оговорками.

Основными принципами функционального подхода к изучению и прогнозированию активных систем являются:

- единство объекта и среды;
- функциональной замкнутости;
- наличие обратной связи;
- иерархичность систем;
- целевого управления и др.

Соединение принципов системности и функциональности образовало универсальный метод, нашедший сегодня широкое применение в самых разнообразных направлениях научной деятельности, в том числе, и в техно сфере [9]. Целесообразно его применять и для проектирования текстильных материалов и изучения деятельности текстильных предприятий.

Системно-функциональный подход позволяет рассматривать текстильные

материалы, как объект, функция которого реализуется и его элементами (сырьевой состав) и отношениями между ними (конструкцией, способом соединения между собой волокнистых материалов). Их изучение происходит, как в статике, так и в динамике. Для решения этой задачи необходимо разработать концептуальные и формальные модели представления исследуемых текстильных материалов и способов их производства в виде систем.

На основании возможностей, которые предоставляет системно-функциональный подход представим методологический алгоритм проектирования текстильных материалов:

1. Формулируются в качестве цели исследования потребительские свойства, которыми должно обладать проектируемое изделие, как система.
2. Формируются критерии оценки достижения этой цели.
3. Исследуется внешняя (условия эксплуатации изделия) и внутренняя (показатели структуру, свойств и сырьевого состава) среды проектируемого текстильного материала. Осуществляется их локализация, задаются границы параметров с целью сокращения объемов исследования.
4. Определяются функциональные свойства системы, обеспечивающие достижение цели в заданных условиях среды, а также и дисфункции, препятствующие решению поставленной задачи. Определяются показатели и критерии оценивания функции и дисфункции.
5. Рассматриваются альтернативные варианты, оценивается их соответствие функциональным требованиям, предъявляемым к проектируемому изделию, строятся соответствующие модели.
6. Проектируется конструкция и способ производства текстильного изделия, указываются параметры и условия его функционирования.
7. Исследуется технологический процесс, обеспечивающий создание необходимого изделия как системы, динамики ее развития, выявляются факторы, определяющие ее функциональные свойства.

В кибернетических системах этот процесс реализуется путем синтеза материального и информационного обеспечения, имитационного моделирования

управленческих и технологических решений. На этом этапе важно оценить достоверность полученной модели, учесть влияние случайных факторов на планируемые результаты [9].

Прохождение этих основных этапов системно-функционального подхода позволяет получить адекватную модель проектируемого текстильного материала.

Не менее важным условием успешности проектирования и создания текстильных материалов является комплексный подход к определению свойств текстильных материалов.

2.1. Комплексный подход к определению функциональных свойств текстильных материалов

Измерение начальных свойств и сопоставление результатов этих измерений с требованиями, предъявляемыми к материалу, является необходимым, но в некоторых случаях недостаточным условием для оценки качества текстильных материалов.

Для оценки эффективности факторного подхода к оценке функциональных свойств материалов необходимо рассматривать все возможные варианты влияния различных факторов с целью подтверждения вероятности P^b_{sji} , которая интегрально характеризует свойства готового изделия в течение заданного периода функционирования или момента времени t и зависит от вероятностей P^b_{1mji} , P^b_{2mji} и P^b_{3mji} . При этом вероятности P^b_{1mji} , P^b_{2mji} и P^b_{3mji} определяют влияние различных факторов, привлекаемых для решения поставленной задачи i -го объекта j -го класса [129].

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.

Основными элементами системы являются следующие основные функциональные подсистемы:

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

Каждая из этих подсистем решает определенные задачи в интересах готовой продукции, которые вытекают из функционального назначения конкретной подсистемы [128, 129].

Модели, описывающие зависимость конечной продукции от ее подсистем формально можно представить, как процесс взаимодействия её элементов при выполнении поставленной задачи (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1. Схема процессов взаимодействия различных моделей

Модели типа нагрузка-прочность рассматриваются как случайное событие, соответствующее определённому превышению нагрузки над прочностью. Модели

типа распределения времени строятся по статистическим данным, по которым определяются вид и параметры закона распределения [113, 115-127].

Для определения вероятностей P_{1mji}^b , P_{2mji}^b и P_{3mji}^b необходимо рассмотреть все возможные состояния каждого элемента подсистем исходного продукта, управления и качества готовой продукции в период всего времени функционирования системы.

Рассмотрим произвольный элемент какой-либо подсистемы готовой продукции. В период функционирования системы любой элемент может находиться в различных состояниях, совокупность которых определяется условиями его применения. Для общности рассуждений введем следующие обозначения: k – номер подсистемы, $k = 1, 2, \dots, K$, где K – число подсистем; m – номер элемента подсистемы, $m = 1, 2, \dots, M$, где M_k – число элементов k -ой подсистемы; q – номер состояния элемента, $q = 1, 2, \dots, Q_k$, где Q_k – число состояний элемента k -ой подсистемы [128].

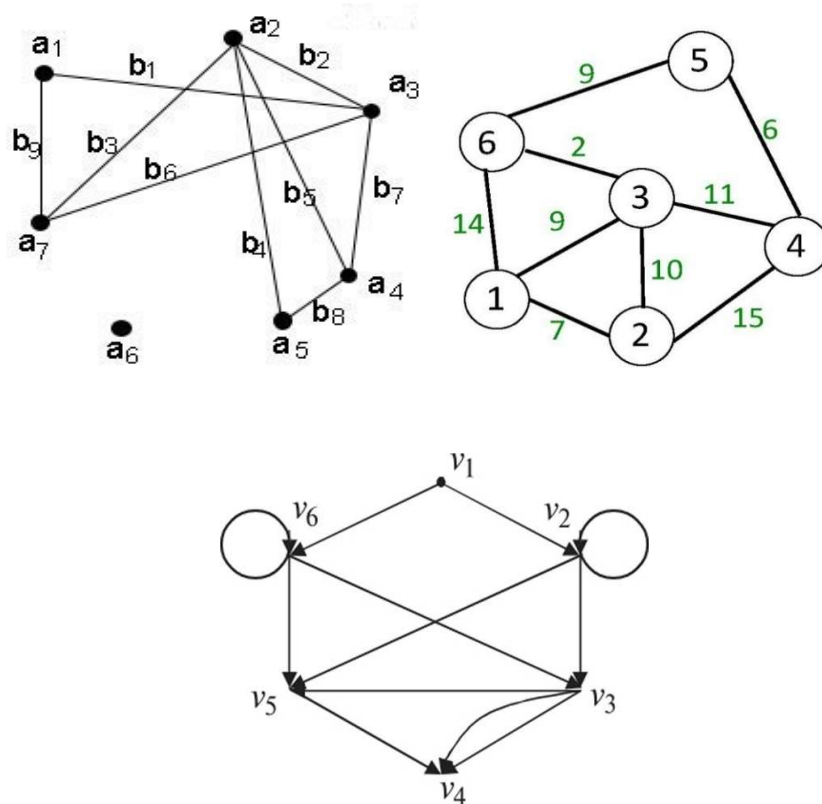


Рисунок 2.2. Виды различных графов меж факторного взаимодействия [128]

Совокупность состояний m -го элемента k -ой подсистемы в каждый момент

времени целесообразно представить в виде графа, вершины которого соответствуют его состояниям, а дуги функциональными связями между ними (рисунок 2.2). Вид данного графа определяется выражением:

$$G_{km} = \{V_{km}, U_{km}\} \quad (2.1),$$

где V_{km} – множество вершин графа, соответствующих тому или иному состоянию рассматриваемого элемента в момент времени t ;

U_{km} – множество дуг графа, соответствующих функциональным связям между состояниями элемента в момент времени [128].

Каждой вершине графа $v_{kmq} \in V_{km}$ поставим в соответствии с вероятностью нахождения элемента в q -ом состоянии, отвечающем этой вершине. Следовательно, совокупность вероятностей $P_{km}(t)$ состояний m -го элемента k -ой подсистемы в момент времени t можно представить в виде вектора:

$$P_{km}(t) = \{P_{km1}(t), P_{km2}(t), \dots, P_{kmq}(t), \dots, P_{kmQ}(t)\} \quad (2.2),$$

где $P_{km}(t)$ – вероятность нахождения m -го элемента, k -ой подсистемы в q -ом состоянии в момент времени t [128].

Совокупность функциональных связей между состояниями элемента в момент времени t – можно представить в виде квадратной матрицы, составленной из плотностей вероятностей перехода элемента из одного состояния в другое, которое в общем случае имеет вид [128, 129]:

$$L_{km} = \|\lambda_{gq}^{km}\| = \begin{vmatrix} \lambda_{11}^{km} & \lambda_{12}^{km} & \dots & \lambda_{1Q}^{km} \\ \lambda_{21}^{km} & \lambda_{22}^{km} & \dots & \lambda_{2Q}^{km} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{Q1}^{km} & \lambda_{Q2}^{km} & \dots & \lambda_{QQ}^{km} \end{vmatrix} \quad (2.3),$$

где λ_{gq}^{km} – плотность вероятности перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -го состояния в q -е состояние в момент времени t .

Плотность вероятности перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -е состояние определяются по формуле [128]:

$$\lambda^{km}_{gq} = \lambda^{km}_{gq} \cdot P^{km}_{gq} \quad (2.4),$$

где λ^{km}_{gq} – интенсивность перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -го состояния в q -е состояние подсистемы; P^{km}_{gq} – условная вероятность перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -е состояния в q -е состояние.

При определении условных вероятностей P^{km}_{gq} будем исходить из того, что k -ой подсистемы из g -е состояния подсистемы в общем случае может перейти либо в q -е состояние, либо в s -е состояние [128].

Обозначим через t^{km}_g – время функционирования m -го элемента k -ой подсистемы, а через τ^{km}_g – некоторое время, при достижении которого m -го элемента k -ой подсистемы может перейти либо в q -е состояние, либо в s -е состояние. Для определенности примем, что при выполнении условия $t^{km}_g < \tau^{km}_g$ m -го элемента k -ой подсистемы переходит в q -е состояние, а при выполнении условия $t^{km}_g \geq \tau^{km}_g$ в состояние $q-s$. Величины t^{km}_g и τ^{km}_g будем считать случайными.

Вероятности данных переходов обозначим соответственно через $P(t^{km}_g < \tau^{km}_g)$ и $P(t^{km}_g \geq \tau^{km}_g)$. Следовательно, $P^{km}_{gq} = P(t^{km}_g < \tau^{km}_g)$, а $P^{km}_{gs} = P(t^{km}_g \geq \tau^{km}_g)$. События $t^{km}_g < \tau^{km}_g$ и $t^{km}_g \geq \tau^{km}_g$, образуют полную группу несовместимых событий (являются противоположными), поэтому для вероятностей P^{km}_{gq} и P^{km}_{gs} должно выполняться условие $P^{km}_{gq} + P^{km}_{gs} = 1$ [128].

Принимая данное обстоятельство во внимание, условные вероятности перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -го состояния в q -е состояние и s -е состояние можно представить в виде:

$$P^{km}_{gq} = P(t^{km}_g < \tau^{km}_g); P^{km}_{gs} = P(t^{km}_g \geq \tau^{km}_g) \quad (2.5).$$

Если m -й элемент k -ой подсистемы может перейти только в одно, например, в q -е состояние, то вероятность такого переходы $P^{km}_{gq} = 1$ [128]. Поэтому в данном частном случае согласно зависимости (2.4) имеет место равенство:

$$\lambda^{km}_{gq} = \lambda^{km}_{gq},$$

т.е. плотность вероятности перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -го состояния в q -е состояние равна интенсивности данного перехода.

Анализ выражений (2.5) показывает, что определение искомых вероятностей P^{km}_{gq} и P^{km}_{gs} сводится к определению вероятности вида: $P(t^{km}_g < \tau^{km}_g)$. Эта вероятность можно определить следующим образом. Пусть $f(t^{km}_g)$ и $f(\tau^{km}_g)$ – плотности распределения вероятностей случайных величин t^{km}_g и τ^{km}_g соответственно. Тогда вероятность того, что случайная величина t^{km}_g не превысит случайную величину τ^{km}_g , определится выражением [128]:

$$P(t^{km}_g < \tau^{km}_g) = \int_0^\infty f(t^{km}_g) \left\{ \int_{\tau^{km}_g}^\infty f(\tau^{km}_g) d\tau^{km}_g \right\} dt^{km}_g \quad (2.6),$$

Каждая из случайных величин t^{km}_g и τ^{km}_g являются суммой большого числа независимых случайных величин – времен выполнения различных мероприятий. По этой причине в соответствии с центральной предельной теоремой Ляпунова является правдоподобным допущением о нормальном законе распределения этих случайных величин с плотностями распределения вероятностей вида [126]:

$$f(t^{km}_g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[t^{km}_g]}} \exp \left[-\frac{(t^{km}_g - M[t^{km}_g])^2}{2D[t^{km}_g]} \right] \quad (2.7),$$

$$f(\tau^{km}_g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[\tau^{km}_g]}} \exp \left[-\frac{(\tau^{km}_g - M[\tau^{km}_g])^2}{2D[\tau^{km}_g]} \right] \quad (2.8),$$

где

$M[t^{km}_g], M[\tau^{km}_g], D[t^{km}_g], D[\tau^{km}_g]$ – математические ожидания и дисперсии случайных величин

$$t^{km}_g, \tau^{km}_g [128].$$

Недостаток моделей (2.7) и (2.8) очевиден и связан с тем, что функции плотностей распределений не являются односторонними, т.е. они отличны от нуля при отрицательных значениях времени в то время, как $t^{km}_g > 0$ и $\tau^{km}_g > 0$. Этот недостаток несущественен, если

$$M[t^{km}_g] \gg \sqrt{D[t^{km}_g]} \text{ и } M[\tau^{km}_g] \gg \sqrt{D[\tau^{km}_g]}$$

не выполняются, то использование нормального распределения может привести к заметным погрешностям. Поэтому эти модели целесообразно модифицировать, сдвинув кривые распределения несколько вправо, а оставшуюся левую часть кривых распределения при $t^{km}_g < 0$ и $\tau^{km}_g < 0$ отсечь (рисунок 2.3). Однако при этом будут нарушены условия нормирования плотностей распределения вероятностей [128]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t^{km}_g) dt = 1; \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau^{km}_g) dt = 1 \quad (2.9).$$

Так как $t^{km}_g \geq 0$ и $\tau^{km}_g \geq 0$, то при $t^{km}_g < 0$ и $\tau^{km}_g < 0$ должны выполняться условия $f(t^{km}_g) = 0$ и $f(\tau^{km}_g) = 0$, которые приводят к условиям нормирования вида [128]:

$$c_t \int_{-\infty}^{\infty} f(t^{km}_g) dt = 1; c_\tau \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau^{km}_g) dt = 1 \quad (2.10),$$

где c_t и c_τ – нормирующие множители для сохранения условий нормирования.

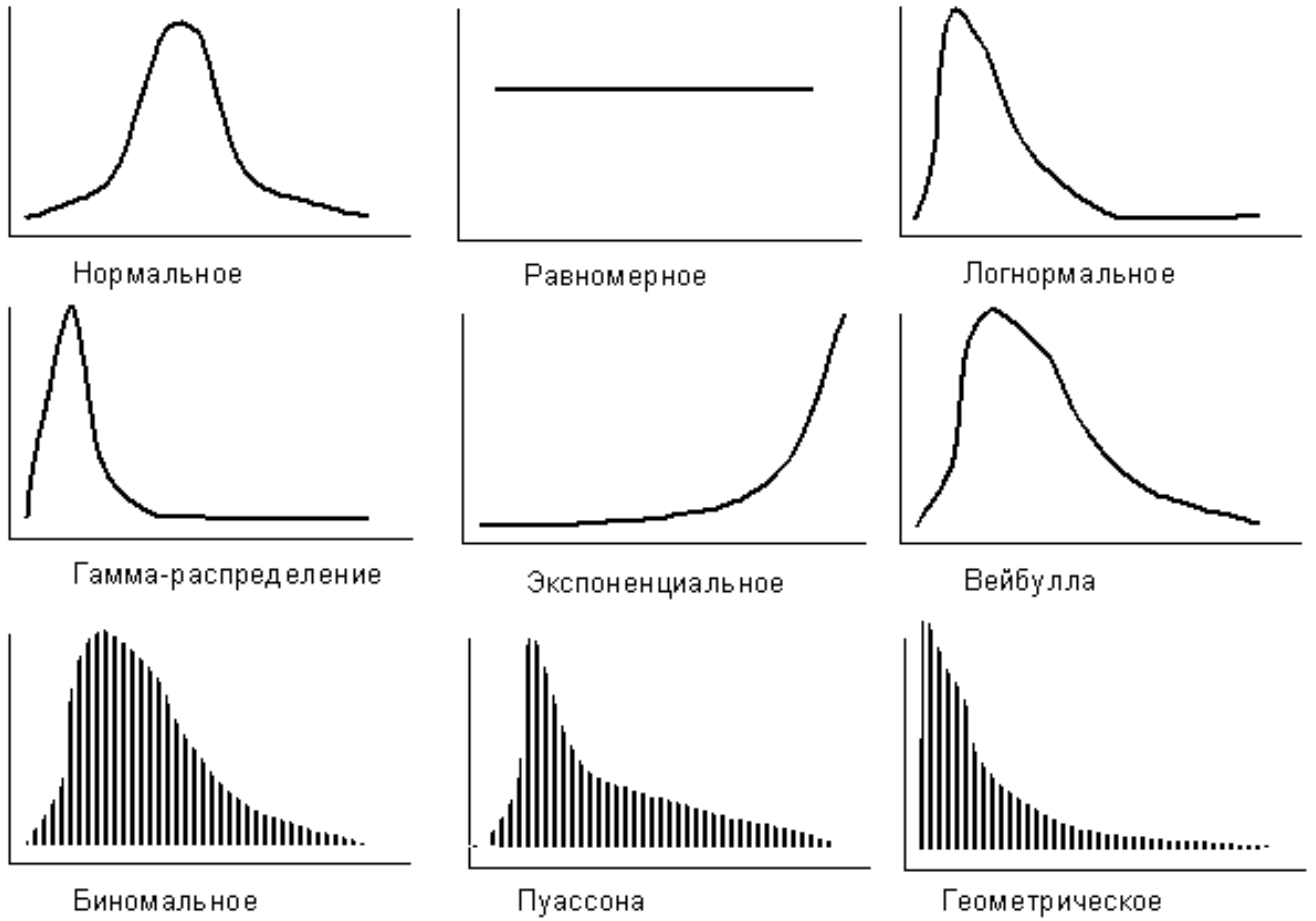


Рисунок 2.3. Виды диаграмм распределения [128]

Решая уравнения (2.10), находим следующие выражения для определения нормирующих множителей c_t и c_τ :

$$c_t = \left[F \frac{M[t^{km}_g]}{\sqrt{D[t^{km}_g]}} \right]^{-1} ; \quad c_\tau = \left[F \frac{M[\tau^{km}_g]}{\sqrt{D[\tau^{km}_g]}} \right]^{-1} \quad (2.11),$$

где $F(x)$ – интеграл Лапласа,

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du, \quad F(-x) = 1 - F(x) \quad (2.12),$$

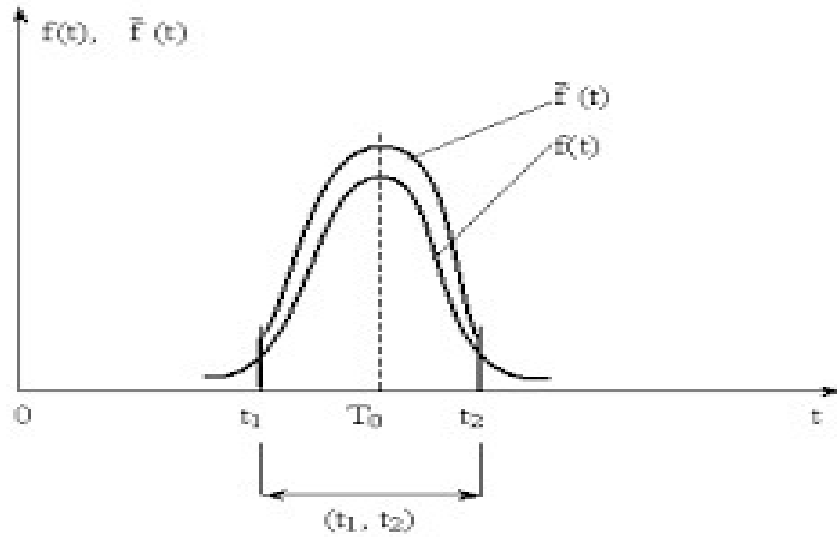


Рисунок 2.4. Усеченное нормальное распределение [128]

Таким образом, приходим к моделям усеченных нормальных распределений (рисунок 2.4) [128]:

$$f(t^{km}_g) = \begin{cases} \frac{c_t}{\sqrt{2\pi D[t^{km}_g]}} \exp \left[-\frac{(t^{km}_g - M[t^{km}_g])^2}{2D[t^{km}_g]} \right], & \text{при } t^{km}_g \geq 0 \\ 0, & \text{при } t^{km}_g < 0 \end{cases} \quad (2.13),$$

$$f(\tau^{km}_g) = \begin{cases} \frac{c_\tau}{\sqrt{2\pi D[\tau^{km}_g]}} \exp \left[-\frac{(\tau^{km}_g - M[\tau^{km}_g])^2}{2D[\tau^{km}_g]} \right], & \text{при } \tau^{km}_g \geq 0 \\ 0, & \text{при } \tau^{km}_g < 0 \end{cases} \quad (2.14).$$

Если плотности распределения вероятностей случайных величин t^{km}_g и τ^{km}_g следует усеченным нормальным законам вида (2.13) и (2.14), то выражение после преобразований можно представить в виде:

$$P(t^{km}_g < \tau^{km}_g) = \frac{c_t c_\tau}{2} \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{M[t^{km}_g] - M[\tau^{km}_g]}{\sqrt{2D[t^{km}_g] + D[\tau^{km}_g]}} \right) \right\} \quad (2.15),$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt, \quad \Phi(-x) = -\Phi(x) \quad (2.16).$$

Если принять во внимание интеграл Лапласа (2.12), то учитывая, что

$$\Phi(x) = 2F(x\sqrt{2}) - 1 \quad (2.17),$$

то выражение (2.15) можно преобразовать в виде:

$$P(t_{g}^{km} < \tau_{g}^{km}) = c_t c_\tau \left\{ 1 - F \left(\frac{M[t_{g}^{km}] - M[\tau_{g}^{km}]}{\sqrt{D[t_{g}^{km}] + D[\tau_{g}^{km}]}} \right) \right\} \quad (2.18).$$

Если обозначить значение Δt_{g}^{km} время прохождения m -го элемента k -ой подсистемы в g -м состоянии, то интенсивность его перехода из данного состояния в какое-либо другое, например, в q -е состояние можно представить в виде [128]:

$$\lambda_{gq}^{km} = \frac{1}{M[\Delta t_{g}^{km}]}, \quad (2.19),$$

где $M[t_{g}^{km}]$ – математическое ожидание времени нахождения m -го элемента k -ой подсистемы в g -м состоянии.

Принимая во внимание (2.4), (2.5), (2.18) и (2.19), выражения для определения плотностей вероятностей перехода m -го элемента k -ой подсистемы из g -го состояния в q -е и s -е в виде [128]:

$$\lambda_{gq}^{km} = \frac{P(t_{g}^{km} < \tau_{g}^{km})}{M[\Delta t_{g}^{km}]} \quad (2.20),$$

$$\lambda_{gs}^{km} = \frac{1 - P(t_{g}^{km} < \tau_{g}^{km})}{M[\Delta t_{g}^{km}]} \quad (2.21),$$

или

$$\lambda_{gs}^{km} = \frac{c_t c_\tau}{M[\Delta t_{g}^{km}]} \left\{ 1 - F \left(\frac{M[t_{g}^{km}] - M[\tau_{g}^{km}]}{\sqrt{D[t_{g}^{km}] + D[\tau_{g}^{km}]}} \right) \right\} \quad (2.22),$$

$$\lambda_{gs}^{km} = \frac{1}{M[\Delta t_{g}^{km}]} - \frac{c_t c_\tau}{M[\Delta t_{g}^{km}]} \left\{ 1 - F \left(\frac{M[t_{g}^{km}] - M[\tau_{g}^{km}]}{\sqrt{D[t_{g}^{km}] + D[\tau_{g}^{km}]}} \right) \right\} =$$

$$= \frac{1}{M[\Delta t^{km}_g]} = \lambda^{km}_{gs} \quad (2.23).$$

Зная плотности вероятностей перехода m -го элемента k -ой подсистемы в различные состояния, для определения функциональной надежности m -го элемента k -ой подсистемы можно воспользоваться уравнениями Колмогорова, которые позволяют определить вероятности нахождения элемента в различных состояниях [128].

Обозначим функциональную надежность m -го элемента k -ой подсистемы в момент времени t через $P^{km}_b(t)$, а функциональную надежность k -ой подсистемы – через $P^k_b(t)$. Так как k -я подсистема включает в свой состав M_k элементов, то вероятность $P^k_b(t)$ будет являться некоторой функцией от вероятности $P^{km}_b(t)$, т.е.

$$P^k_b(t) = \psi[P^{k1}_b(t), P^{k2}_b(t), \dots, P^{kM}_b(t)] \quad (2.24).$$

Конкретный вид данной функции определяется структурой функциональных связей между элементами k -ой подсистемы, которые могут быть последовательными, параллельными и смешанными.

Выбор адекватного подхода к определению функциональных связей зависит от того, обнаружены или нет факторы, влияющие на значение зависимой переменной. В целом процесс выбора прогноза можно представить в виде схемы на рисунке 2.5 [128].



Рисунок 2.5. Схема этапов выбора метода прогнозирования

Благодаря предложенной схеме в качестве исходных данных могут быть взяты выборочные наблюдения и динамические ряды, в качестве инструмента прогноза применяются регрессии на независимые переменные или средние величины [129].

Анализ предложенной схемы показывает, что на начальном этапе необходимо осуществить правильный выбор исходных факторов, которые оказывают наибольшее влияние на качество готовой продукции и обеспечивает надежный прогноз рассматриваемого материала, а также установить, насколько исходные факторы взаимосвязаны с другими. А также выбрать инструмент (математический аппарат) позволяющий осуществить этот прогноз. На втором этапе рассмотреть динамическую составляющую зависимостей от других переменных, и уже исходя определения этих взаимодействий, выбрать инструмент прогноза.

2.2. Причинно-следственные связи между показателями исходного сырья и технологическими параметрами производства пряжи

Как вытекает из предыдущих рассуждений, для обеспечения технологического процесса на начальном этапе необходимо определить наиболее значимые факторы, влияющие на выходные параметры готовой продукции. В тоже время при проведении экспериментальных исследований необходимо варьировать факторами в строго определенных пределах, ибо это сказывается на качестве готовой продукции.

В ряде работ, посвященных влиянию различных факторов на свойства готовой продукции, используется бинарная причинно-следственная теория информации, основанная на предпосылках Шеннона [130-137].

Использование причинно-следственной теории позволяет идентифицировать исследуемые факторы, автоматизировать трудоемкие методы расчета, устранить эффекты сопутствия.

Для решения данной задачи необходимо выделить две основные фундаментальные проблемы:

- проблему идентификации причин и следствий в исследуемом процессе;
- проблему количественной оценки интенсивности прямых и косвенных причинных влияний в процессе [133-139].

Проблема идентификации заключается в том, что рассматриваются две переменные y и x , между которыми существует причинная связь и имеется статистика значений, рассматриваемых переменных $X_i, Y_i, i=1, 2, \dots, N$.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать соотношение: $I_{12}:H_1 > I_{21}:H_2$, то $2 \rightarrow 1$, где J, H – соответственно информация и энтропия распределения вероятностей случайных величин. Поскольку $I_{12}=I_{21}$, то если $H_1 < H_2$, то $2 \rightarrow 1$.

Причинная связь – это информационный канал между фактором-причиной и фактором-следствием. Следовательно, при одной и той же статистической неопределенности следствия, информация, поступающая от причины, должна быть тем больше, чем больше собственная статистическая неопределенность причины.

Величину энтропии распределения вероятностей для случайной одномерной величины можно представить в виде:

$$H_i = \sum_1^k P(X_{Ki}) \log_2 P(X_{Ki}) \quad (2.25),$$

где $P(X_{Ki})$ – вероятность состояний случайной величины X_{Ki} .

Величина информации между i -ым и j -ым факторами определится по формуле

$$I_{ij} = \sum_1^k \sum_1^r P(X_{Ki}, X_{ri}) \log_2 \frac{P(X_{Ki}, X_{ri})}{P(X_{Ki})P(X_{ri})} \quad (2.26),$$

где $P(X_{ri})$ – вероятность состояний случайной величины X_{ri} ;

$P(X_{Ki}, X_{ri})$ – вероятность состояний случайных величин X_{Ki} и X_{ri} .

Для функционалов энтропии и информации справедливо следующее равенство:

$$\Gamma_{ij} = I_{ij} : H_i \quad (2.27),$$

где Γ_{ij} – коэффициент причинного влияния j -ого фактора на i -ый.

При расчете коэффициентов Γ_{ij} целесообразно для удобства при определении информации и энтропии использовать десятичные или натуральные логарифмы вместо логарифмов с основанием 2. Причинную связь между факторами необходимо понимать, как информационный канал между фактором-причиной и фактором-следствием. При статистической независимости переменных X_i, X_j парный коэффициент причинного влияния Γ_{ij} равен 0, при $\Gamma_{ij} = 1$ существует наличие строгой детерминированности следствия причиной.

В тоже время парные коэффициенты Γ_{ij} не могут служить мерой истинной тесноты связи между факторами. Такой мерой могут служить частные коэффициенты причинного влияния g_{ij} , причем $\sum \Gamma_{ij} > \sum g_{ij}$. Разность $\Gamma_{ij} - g_{ij}$ может служить оценкой косвенного причинного влияния X_j на X_i .

Любой выбор одного элемента из множества есть устранение неопределенности, превращение возможности в действительность, таким образом, установление причинной связи, рассматривается как установление определенного соответствия множеств [106, 134].

Система уравнений может быть решена последовательными подстановками, так как левые части системы представлены треугольной матрицей.

В качестве примера в работе рассматривается конкретная задача влияния ряда показателей на разрывную нагрузку пряжи. За исходные параметры были взяты такие показатели, которые, на наш взгляд, оказывают наибольшее влияние на качество пряжи [129].

Это:

- разрывная нагрузка волокна, сН, – X_1 ;
- линейная плотность волокна, текс, – X_2 ;
- штапельная длина волокна, мм, – X_3 ;
- число волокон в сечении пряжи, – X_4 ;
- крутка пряжи, – X_5 ;
- показатель технологического процесса, – X_6 ;
- разрывная нагрузка пряжи, сН, – X_7 .

Для решения поставленной задачи построим ориентированный граф при-

чинно-следственных связей для 7 факторов. Он представлен на рисунке 2.6 по результатам расчета энтропии:

$$\begin{array}{lll} H_1=0,698 & H_2=1,128 & H_3=1,178 \\ H_4=1,296 & H_5=0,866 & H_6=1,293 \\ H_7=0,593 \end{array}$$

Это позволяет представить следующее направление причинно-следственных связей: $H_4 \rightarrow H_6 \rightarrow H_2 \rightarrow H_3 \rightarrow H_5 \rightarrow H_1 \rightarrow H_7$.

Значения информации между факторами оказались равными:

$$\begin{array}{lll} I_{12}=0,324 & I_{13}=0,331 & I_{14}=0,415 \\ I_{15}=0,223 & I_{16}=0,455 & I_{17}=0,148 \\ I_{23}=0,684 & I_{24}=0,752 & I_{25}=0,456 \\ I_{26}=0,770 & I_{27}=0,272 & I_{34}=0,603 \\ I_{35}=0,473 & I_{36}=0,715 & I_{37}=0,238 \\ I_{45}=0,465 & I_{46}=0,695 & I_{47}=0,265 \\ I_{56}=0,708 & I_{57}=0,318 & I_{67}=0,333 \end{array}$$

Коэффициенты Γ_{ij} оказались равными:

$$\begin{array}{lll} \Gamma_{46}=0,34 & \Gamma_{42}=0,04 & \Gamma_{43}=0,23 \\ \Gamma_{45}=0,02 & \Gamma_{41}=0 & \Gamma_{47}=0 \\ \Gamma_{62}=0,68 & \Gamma_{63}=0,04 & \Gamma_{65}=0,12 \\ \Gamma_{62}=0 & \Gamma_{67}=0 & \Gamma_{23}=0,61 \\ \Gamma_{25}=0,28 & \Gamma_{21}=0,21 & \Gamma_{27}=0,12 \\ \Gamma_{35}=0,47 & \Gamma_{31}=0,34 & \Gamma_{37}=0,17 \\ \Gamma_{51}=0,32 & \Gamma_{57}=0,57 & \Gamma_{17}=0,21 \end{array}$$

Для расчета коэффициента влияния g_{ij} составим систему нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} \Gamma_{46} &= g_{46} \\ \Gamma_{42} &= g_{42} + g_{46}g_{62} \\ \Gamma_{43} &= g_{43} + g_{46}g_{63} + g_{42}g_{23} + g_{46}g_{62}g_{23} \\ \Gamma_{45} &= g_{45} + g_{46}g_{65} + g_{42}g_{25} + g_{43}g_{35} + g_{46}g_{62}g_{25} + g_{46}g_{63}g_{35} + g_{42}g_{23}g_{35} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{35} \\ \Gamma_{41} &= g_{41} + g_{46}g_{61} + g_{42}g_{21} + g_{43}g_{31} + g_{45}g_{51} + g_{46}g_{62}g_{21} + g_{46}g_{63}g_{31} + g_{46}g_{65}g_{51} + \\ &+ g_{42}g_{23}g_{31} + g_{42}g_{25}g_{51} + g_{43}g_{35}g_{51} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{31} + g_{46}g_{62}g_{25}g_{51} + \\ &+ g_{46}g_{63}g_{35}g_{51} + g_{42}g_{23}g_{35}g_{51} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{35}g_{51} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{47} = & g_{47} + g_{46}g_{67} + g_{42}g_{27} + g_{43}g_{37} + g_{41}g_{57} + g_{41}g_{17} + g_{46}g_{62}g_{27} + g_{46}g_{63}g_{37} + \\ & + g_{46}g_{65}g_{57} + g_{46}g_{61}g_{17} + g_{42}g_{23}g_{37} + g_{42}g_{25}g_{57} + g_{42}g_{23}g_{37} + g_{42}g_{25}g_{57} + \\ & + g_{42}g_{21}g_{17} + g_{43}g_{35}g_{57} + g_{43}g_{31}g_{37} + g_{45}g_{51}g_{17} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{37} + g_{46}g_{62}g_{25}g_{57} + \\ & + g_{46}g_{62}g_{21}g_{17} + g_{42}g_{23}g_{35}g_{57} + g_{42}g_{23}g_{31}g_{17} + g_{43}g_{35}g_{51} + g_{17} + \\ & + g_{46}g_{62}g_{23}g_{35}g_{57} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{31}g_{17} + g_{46}g_{63}g_{35}g_{31}g_{17} + g_{46}g_{62}g_{23}g_{35}g_{51}g_{17} \end{aligned}$$

$$\Gamma_{62} = g_{62}$$

$$\Gamma_{63} = g_{63} + g_{62}g_{23}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{65} = & g_{65} + g_{62}g_{25} + g_{63}g_{35} + g_{62}g_{23}g_{35} + g_{62} + g_{62}g_{21} + g_{63}g_{31} + g_{65}g_{51} + \\ & + g_{62}g_{23}g_{31} + g_{62}g_{25}g_{51} + g_{63}g_{35}g_{51} + g_{62}g_{23}g_{35}g_{51} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{67} = & g_{67} + g_{62}g_{27} + g_{63}g_{37} + g_{65}g_{57} + g_{61}g_{17} + g_{62}g_{23}g_{37} + g_{62}g_{25}g_{57} + \\ & + g_{62}g_{21}g_{17} + g_{63}g_{35}g_{57} + g_{63}g_{31}g_{17} + g_{65}g_{51}g_{17} + g_{62}g_{23}g_{35}g_{57} + \\ & + g_{62}g_{23}g_{31}g_{17} + g_{62}g_{25}g_{51}g_{17} + g_{63}g_{35}g_{51}g_{17} + g_{62}g_{23}g_{35}g_{51}g_{17} \end{aligned}$$

$$\Gamma_{17} = g_{17}$$

В расчетах получили:

$$\begin{array}{lll} g_{46} = 0.34 & g_{42} = 0.04 & g_{43} = 0.23 \\ g_{45} = 0.02 & g_{41} = 0 & g_{47} = 0 \\ g_{62} = 0.68 & g_{63} = 0.04 & g_{65} = 0.12 \\ g_{62} = 0 & g_{67} = 0 & g_{23} = 0.61 \\ g_{25} = 0.28 & g_{21} = 0.27 & g_{27} = 0.12 \\ g_{35} = 0.47 & g_{31} = 0.34 & g_{37} = 0.17 \\ g_{51} = 0.32 & g_{57} = 0.03 & g_{17} = 0.21 \end{array}$$

Полученные результаты сведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Значения коэффициентов Γ_{ij} и g_{ij}

Направление связи	Γ_{ij}	g_{ij}	$\Gamma_{ij} - g_{ij}$
4→6	0,46	0,46	0
4→2	0,66	0,04	0,62
4→3	0,68	0,23	0,45
4→5	0,47	0,02	0,45
4→1	0,59	0	0,59
4→7	0,27	0	0,27
6→2	0,68	0,68	0
6→3	0,71	0,34	0,37
6→5	0,71	0,12	0,59

Окончание Таблицы 2.1.

Направление связи	Γ_{ij}	g_{ij}	$\Gamma_{ij} - g_{ij}$
6→1	0,65	0	0,65
6→7	0,33	0	0,33
2→3	0,61	0,61	0
2→5	0,40	0,28	0,12
2→1	0,46	0,27	0,19
2→7	0,24	0,12	0,12
3→5	0,47	0,47	0
3→1	0,47	0,34	0,13
3→7	0,24	0,17	0,07
5→1	0,32	0,32	0
5→7	0,32	0,09	0,23
1→7	0,21	0,21	0



Рисунок 2.6. Граф причинно-следственных связей между технологическими параметрами

Построенный граф причинно-следственных связей между технологическими

параметрами и произведенные расчеты позволили выявить наиболее значимые показатели, оказывающие существенное влияние на качество готовой продукции:

- X_1 – разрывная нагрузка волокна;
- X_2 – линейная плотность волокна;
- X_3 – штапельная длина волокна;
- X_4 – число волокон в сечении пряжи;
- X_5 – крутка пряжи;
- X_6 – показатель технологического процесса;
- X_7 – разрывная нагрузка пряжи.

Выводы по главе 2

1. Разработана методология и предложен алгоритм проектирования текстильных материалов с опорой на системно-функциональный подход к определению и прогнозированию их свойств.

2. Согласно представленной классификация существующих систем по разным основаниям, можно сделать вывод, 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.

3. 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.

4. Сформулирован общий вид функциональной системы производства текстильных материалов, которая в свою очередь состоит из следующих функциональных подсистем:

- подсистемы исходных материалов;
- подсистемы получения промежуточной и готовой продукции;
- подсистемы обеспечения качества получаемой продукции [128].

5. Для решения поставленной задачи определения функциональных свойств системы готовой продукции была использована бинарная причинно-следственная теория информации. Использование причинно-следственной теории позволяет идентифицировать исследуемые факторы и автоматизировать трудоемкие методы расчета.

6. Рассмотрено влияние параметров ряда факторов при производстве хлопчатобумажной пряжи на ее разрывную нагрузку.

7. Построен граф причинно-следственных связей между технологическими параметрами и выявлены наиболее значимые показатели оказывающие существенное влияние на качество готовой текстильной продукции.

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.

8. На основании полученного графа становится возможным перейти к цифровому двойнику, так как имеется информационная связь между объектом оригиналом и его цифровым двойником.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИСХОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

Во второй главе была предложена общая схема процесса взаимодействия различных элементов готовой продукции. Основой системы является иерархическое построение при изготовлении того или иного вида текстильного изделия. И в первую очередь это подсистема исходных показателей применяемых первичных материалов, оказывающих наибольшее влияние на надежность готовой продукции.

В зависимости от назначения и области применения текстильного материала исходные показатели будут варьироваться.

Это связано со структурой исходных волокон, их линейных размеров, технологией получения и переработкой, и целым рядом других свойств.

Однако наряду с этим имеется и ряд общих показателей, характеризующих данный вид продукции, а именно показатели качества исходного сырья.

В общепринятой классификации все показатели можно разделить на две подгруппы. К первой относятся показатели, которые используют при контроле и оценке качества волокон по стандартам, ко второй – показатели, применяемые при исследовании и сравнительной оценке различных свойств текстильных волокон.

Для большинства волокон в стандартах установлены в качестве обязательных требования к следующим свойствам и показателям [140-141].

Геометрические свойства – тонины и длины волокон. К ним также относятся такие показатели как извитость (химических) и зрелость (хлопковых) волокон.

Механические свойства – полуцикловые разрывные характеристики при растяжении (разрывная нагрузка и удлинение при разрыве). Эти свойства характеризуют поведение волокон при приложении к ним различных нагрузок и деформации. При получении в процессе переработки и эксплуатации, изготовленных из этих во-

локон изделий они подвергаются различным воздействиям, из которых значительную долю занимают механические. Поэтому показатели механических свойств текстильных волокон являются важнейшими характеристиками, знание которых позволяет правильно выбрать параметры технологии их переработки и обеспечить выпуск нитей и изделий заданного качества [141].

Одноцикловые и много цикловые характеристики механических свойств текстильных волокон обычно используют чаще всего в исследовательских работах. Волокна подвергают деформациям растяжения, изгиба, кручения и сжатия, т.е. тем, которые они испытывают при переработке и эксплуатации изготовленных из них изделий.

Для исследования одноцикловых характеристик растяжения применяют два основных способа.

Первый основан на длительном поддержании постоянной заданной деформации в течение продолжительного времени и определении изменений усилия в материале.

Второй способ заключается в продолжительном растяжении волокна с постоянной нагрузкой и последующей разгрузкой, и измерением деформации [141].

Исследование много цикловых характеристик свойств текстильных волокон, при котором многократно повторяется испытательный цикл «нагрузка – разгрузка – отдых», производят для деформации растяжения и изгиба.

Физические свойства – усадка и белизна, устойчивость окраски и разнотонность для химических волокон.

Для всех волокон в стандартах даны нормы кондиционной (нормированной) влажности и предельная фактическая влажность [141].

Из внешних признаков в стандартах предусмотрены оценка по эталонам и органолептическая оценка, например, степени рассыпчатости химических волокон, а также содержания пороков и не волокнистых включений, в том числе жира у шер-

сти и замасливателя у химических волокон. Нормы по перечисленным выше показателям устанавливаются в виде номинальных или предельных значений. Для номинальных значений (например, толщины или длины химических волокон) даются допустимые отклонения.

В качестве дополнительных показателей, применяемых при оценке качества волокон отдельных видов, используют общую неровноту по прочности и гибкости у чесаного льна, среднее квадратическое отклонение по толщине у волокон шерсти, содержание длинных волокон в вискозных, хлорированных и т.п. [141].

Одними из важнейших показателей, характеризующих свойства текстильных материалов являются механические свойства, и в первую очередь, стойкость волокна на разрыв. Причем этот показатель в свою очередь будет зависеть также от ряда показателей, т.е. налицо многофункциональная зависимость. Поэтому перед нами стояла задача рассмотрения данного вопроса с помощью цифровых двойников и современных средств прогнозирования.

3.1. Применение теории подобия и анализа размерностей при прогнозировании свойств текстильных материалов

Проблема повышения качества текстильных материалов достаточно сложна, так как ее решение зависит от многих факторов. Как выше было установлено на результаты готовой продукции влияют значения исходных показателей, к которым относятся геометрические, механические и физические свойства волокон, качество исходного сырья. Поэтому при прогнозировании поведения текстильных материалов необходимым условием является использование достаточно большого числа показателей, оказывающих влияние на качество готовой продукции. Однако, чем больше число переменных, тем сложнее привести результаты к единому знаменателю.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать множество разнородных величин, таких как длина волокон, линейная плотность, крутка, удлинение и другие, причем их действие часто проявляется как порознь, так и совместно. Поэтому при решении поставленной задачи необходимо рассматривать не отдельные величины, а их совокупности и скрытые связи между ними. Возникает необходимость в переходе от обычных физических величин к величинам комплексного типа, включающих смысловое содержание этого компонента. Использование комплексного показателя позволяет значительно сократить число исходных переменных, что значительно облегчает получение решения поставленной задачи, внутри комплекса может быть использовано бесчисленное множество различных комбинаций составляющих эту совокупность.

Одним из способов решения данной задачи является применение теории подобия и анализа размерностей [142-148, 167].

Суть теории подобия и анализа размерностей заключается в обобщении различных факторов таким образом, чтобы получить безразмерные комплексы, которые позволяют обобщить различные показатели.

Таким образом, при переходе от обычных физических величин к величинам комплексного типа, появляется ряд важных преимуществ [148, 167]:

- во-первых, уменьшается число переменных;
- во-вторых, отражается влияние не отдельных факторов, а всего комплекса, более отчетливо выступают внутренние связи;
- в-третьих, заданное значение комплекса может быть получено как результат бесчисленного множества различных комбинаций составляющих его величин [158].

На основе теории подобия становится возможным установление взаимосвязей между процессами, происходящими в реальных условиях и в предлагаемых теоретических моделях. Для правильной постановки задачи очень важно правильно выбрать исходные показатели, число их должно быть минимальным и отражать

суть технологического процесса.

В теории подобия имеются три основные теоремы, которые характеризуют свойства подобных систем и устанавливают необходимые и достаточные условия преобразования функциональной зависимости между рассматриваемыми параметрами [167].

В первой теореме рассматриваются условия подобия между рассматриваемым объектом и моделью. Они имеют одинаковые критерии подобия в одни и те же моменты времени и в сходственных точках пространства. Необходимые условия позволяют установить связь между параметрами систем в размерных и безразмерных величинах, так как они подобны.

Вторая теорема известна под названием «π-теоремы», которая позволяет представить функциональную зависимость между физическими параметрами системы в виде зависимости между составленными из них критериями подобия.

Благодаря «π-теореме» становится возможным получить критериальное уравнение характеризующих группу подобных систем, что позволяет распространять полученные результаты единичного эксперимента на всю группу. Применение безразмерных комплексных величин уменьшает число параметров, которые входят в исследуемое уравнение, что упрощает математические операции с ним. При проведении экспериментальных исследований не нужно изучать влияние каждого фактора в отдельности [148].

Важное свойство критериев подобия заключается в том, что критерии подобия любого явления могут преобразовываться в критерии другой формы, получаемые за счет операций перемножения или деления критериев, возведения их в степень или умножения на любой постоянный коэффициент. При этом любая комбинация критериев подобия есть также критерий подобия.

С помощью теории размерностей можно получить особенно ценные выводы при рассмотрении таких явлений, которые зависят от большого количества параметров.

Более эффективным способом получения алгоритма применения теории подобия рассмотрено в работе [144]:

- составление перечня параметров $x_1, \dots, x_n$, характеризующих исследуемый процесс;
- составление матрицы из показателей степени размерностей параметров;
- выявление числа k независимых между собой параметров путем вычисления ранга матрицы;
- расчет значений показателей степеней $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ основных параметров;
- определение выражений критериев подобия во всех формах записи.

Постоянные параметры, входящие в тот или иной критерий подобия, оказывают различное влияние на результат исследования в зависимости от характера изучаемого явления.

В одном случае точность воспроизведения критерия будет оказывать решающее влияние на характер изучаемого процесса; в другом случае упомянутый критерий может воспроизводиться приближенно, без ущерба для точности получаемого результата; в третьем случае параметры, входящие в критерий, могут не моделироваться вовсе, так как данный критерий не будет оказывать никакого влияния на протекание изучаемого процесса. Поэтому при установлении условий подобия и осуществлении моделирования для решения инженерных задач существенной оказываются не все связанные с данным явлением процессы в совокупности, а только главные процессы.

Вид критериального уравнения может быть получен методом анализа размерностей, если число физических параметров функциональной зависимости превышает число основных единиц измерений не больше чем на единицу.

Размерные физические величины связаны между собой определенными соотношениями. Поэтому, если некоторые из этих величин принять за основные и установить для них какие-то единицы измерения, то единицы измерения всех остальных величин будут определенным образом выражаться через единицы измерения основных величин. Принятые для основных величин единицы измерения

называются основными или первичными, а все остальные – производными или вторичными.

В настоящее время наиболее распространенной и имеющей предпочтительное применение является Международная система единиц СИ.

Размерные физические величины связаны между собой определенными соотношениями. Поэтому, если некоторые из этих величин принять за основные и установить для них какие-то единицы измерения, то единицы измерения всех остальных величин будут определенным образом выражаться через единицы измерения основных величин. Принятые для основных величин единицы измерения называются основными или первичными, а все остальные – производными или вторичными [167].

К основным, иногда их называют первичными величинами, относятся масса, длина, время, температура. Единицы измерения других физических величин, например, сила, скорость, энергия и др., получаются из основных единиц в результате того или иного действия над ними.

Выражение производной единицы измерения через основные единицы измерения называется размерностью. Например, сила определяется исходя из уравнения:

$$F = M \cdot a = M \cdot L / T^2 = M \cdot L \cdot T^{-2} \quad (3.1)$$

Размерность записывается символически в виде формулы, в которой символ единицы измерения обозначается буквой в квадратных скобках:

$$F = [M] \cdot [L] \cdot [T]^{-2} \quad (3.2),$$

где $[M]$, $[L]$, $[T]$ – соответственно размерности массы, длины и времени.

В то же время размерность любой физической величины представляет собой произведение возведенных в степень размерностей первичных величин:

$$[Q] = [M]^{\mu} \cdot [L]^{\lambda} \cdot [T]^{\tau} \quad (3.3).$$

Таким образом, теория подобия дает общие методические указания, как поступить в каждом отдельном случае при анализе уравнений, описывающих явление, при постановке и обработке данных опыта над ними и при распределении результатов опыта на другие явления. Она показывает, что любая функциональная зависимость между физическими параметрами исследуемого объекта может быть представлена в виде зависимости между критериями подобия, составленными из физических параметров. При этом критерии подобия представляют собой безразмерные параметры, которые характеризуют физическое подобие происходящих в исследуемом объекте процессов, и являются константами для всех подобных процессов [147].

3.2. Функциональный подход к анализу и прогнозированию разрывной нагрузки тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка

С развитием производства и появлением новых технологий на первый план выступают проблемы качества. Данное обстоятельство связано в первую очередь с тем, что повышается уровень требований к товарам, выпускаемым текстильной промышленностью, поэтому для получения положительного результата в сфере маркетинга продукции необходимо проведение оценки ее качества.

Совершенствование качества требует, прежде всего, знания свойств текстильных материалов, умения правильно и объективно измерять, оценивать и контролировать показатели качества.

В настоящее время перед текстильным материаловедением стоит задача по разработке методов прогнозирования отдельных свойств текстильных материалов, что позволит значительно сократить сроки разработки нового ассортимента при минимальных материальных затратах [148-156].

Проблема повышения качества текстильных изделий достаточно сложна, так как ее решение зависит от многих факторов. Однако при большом числе переменных привести результаты решения в определенную систему, найти скрытые в них

связи и объединить эти связи в общих количественных закономерностях крайне трудно. При решении таких задач приходится вводить множество разнородных величин, каждая из которых рассматривается как самостоятельная переменная. В действительности влияние отдельных факторов, представленных различными величинами, как правило, проявляется не порознь, а совместно [167]. Поэтому при решении той или иной задачи надо рассматривать не отдельные величины, а их совокупности, определенные для каждого конкретного процесса [141].

В качестве объекта исследования рассмотрим хлопковые волокна. Общеизвестно, что все хлопковые волокна делятся на две группы: тонковолокнистые и средневолокнистые сорта, отличающиеся между собой видом сбора, сортностью, физико-механическими характеристиками и другими показателями.

Исходя из анализа имеющейся литературы [149-158] был выделен ряд факторов, оказывающих на наш взгляд наибольшее влияние на свойства рассматриваемых волокон.

$$P_{\text{вол}} = f(T_{\text{вол}}, L_{\text{шт}}, W, n) \quad (3.4),$$

где $P_{\text{вол}}$ – разрывная нагрузка волокна, Сн;

$T_{\text{вол}}$ – линейная плотность, мтекс;

$L_{\text{шт}}$ – штапельная длина, мм;

W – влажность, %;

n – содержание пороков и сорных примесей, %.

В тех случаях, когда известен только набор физических параметров, характеризующих процесс, но не известны уравнения, связывающие их между собой, целесообразно применять теорию подобия и размерности [158]. Для выбора определяющих физических параметров можно использовать экспериментальные методы.

Хлопковые волокна в зависимости от области произрастания делятся на две группы – тонковолокнистые и средневолокнистые сорта, несмотря на общие технологические свойства, эти группы отличаются между собой различными значениями основных показателей.

Прогнозирование разрывной нагрузки тонковолокнистого хлопка

В качестве объектов исследования были взяты три вида селекционных сортов тонковолокнистого сорта хлопка ручной сборки [157, 158] (таблица 3.1). Переход от обычных физических величин к величинам комплексного типа создает ряд важных преимуществ. В первую очередь это приводит к уменьшению числа переменных. Замещение обычных переменных обобщенными является основной чертой рассматриваемой системы исследования. Систему эту принято называть теорией подобия и анализа размерностей.

Таблица 3.1. Физико-механические показатели тонковолокнистого сорта хлопка (ГОСТ 3279), [157]

Тип хлопкового волокна	Селекционный сорт	Промышленный сорт	Разрывная нагрузка, сН	Штапельная длина, мм	Линейная плотность, мтекс	Коэф. зрелости	Влажность, %	Содержание пороков и сорных примесей, %
1	Ашхабад	I	4,4	39,3	126	2,0	4,1	3,2
		II	4,1	39,7	123	1,9	4,6	3,7
		III	3,5	38,7	112	1,7	4,1	4,8
		IV	3,1	39,2	103	1,4	4,4	5,8
1	9732-И	I	4,4	40,0	128	2,0	4,5	2,2
		II	4,0	40,0	122	1,9	4,9	2,7
		III	3,6	39,8	113	1,7	5,0	3,2
		IV	3,1	39,2	113	1,5	5,9	3,7
2	6249-В	I	4,4	39,3	141	2,0	5,0	2,4
		II	4,1	39,0	133	1,8	5,2	3,0
		III	3,5	38,2	119	1,7	5,5	3,8
		IV	3,1	37,6	111	1,5	6,0	4,4

Переход от обычных физических величин к величинам комплексного типа создает ряд важных преимуществ. В первую очередь это приводит к уменьшению

числа переменных. Замещение обычных переменных обобщенными является основной чертой рассматриваемой системы исследования. Систему эту принято называть теорией подобия и анализа размерностей [157, 158].

Используя методы теории подобия и анализа размерностей [153, 157], представим функциональную зависимость (3.5), исходя из полученных в таблица 3.1 результатов, в виде комплекса безразмерных показателей:

$$P = \eta \left(T \cdot L, \frac{W}{n} \right) \quad (3.5)$$

где η – безразмерный показатель, характеризующий изменение разрывной нагрузки волокна.

Так как на разрывную нагрузку одновременно оказывают влияние несколько факторов, формула (3.5) может быть представлена в виде двух безразмерных показателей:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \quad (3.6)$$

где η_1 – безразмерный показатель, характеризующий влияние геометрических свойств волокон;

η_2 – безразмерный показатель, характеризующий влияние внешних воздействий [157, 158].

$$\eta_1 = 0,7 \left\{ \frac{T \cdot L}{1000} \right\} \quad (3.7).$$

Зависимость для комплекса η_1 определяется уравнением (3.4) и представлена на рисунке 3.1 [154, 155].

$$\eta_2 = \frac{\frac{W}{n}}{0,8638 \frac{W}{n} - 0,0067} \quad (3.8).$$

Таблица 3.2. Результаты расчета разрывной нагрузки тонковолокнистого хлопка, [157]

Селекционный сорт	Промышленный сорт	Разрывная нагрузка, сН	$\frac{T \cdot L}{1000}$	$\frac{W}{n}$	η_1	η_2	$P_{\text{рас}} = \eta_1 \cdot \eta_2$	Отклонение, %
Ашхабад	I	4,4	4,95	1,28	3,46	1,165	4,03	8,4
	II	4,1	4,88	1,24	3,41	1,165	3,97	3,1
	III	3,5	4,33	0,85	3,03	1,169	3,54	1,1
	IV	3,1	4,04	0,75	2,83	1,171	3,31	6,7
9732-И	I	4,4	5,12	2,05	3,58	1,162	4,15	5,6
	II	4,0	4,88	1,81	3,42	1,163	3,97	0,7
	III	3,6	4,50	1,56	3,15	1,164	3,66	1,6
	IV	3,1	4,33	1,59	3,10	1,142	3,54	14,1
6249-В	I	4,4	5,54	2,08	3,87	1,164	4,50	2,5
	II	4,1	5,19	1,73	3,63	1,163	4,22	2,9
	III	3,5	4,55	1,45	3,15	1,164	3,66	4,5
	IV	3,1	4,17	1,36	3,10	1,165	3,61	6,4

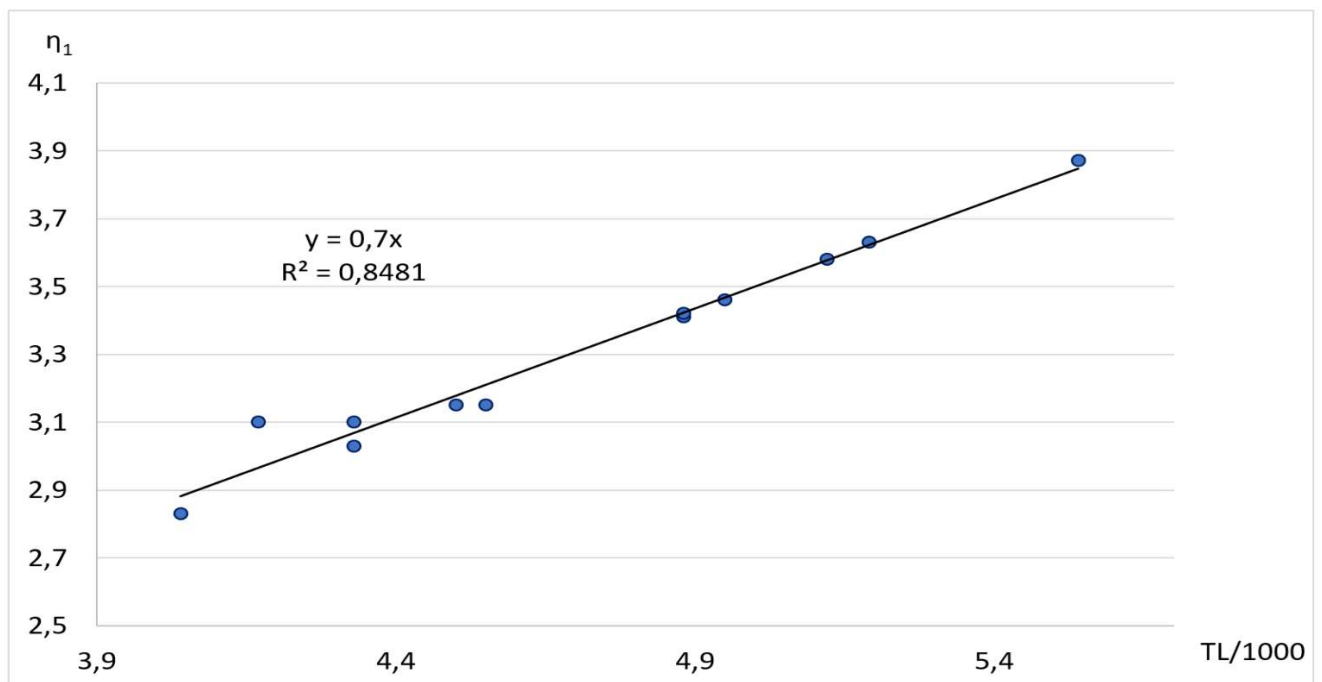


Рисунок 3.1. Зависимость для комплекса η_1

Зависимость для комплекса η_2 определяется уравнением (3.5) и рисунком 3.2 [157].

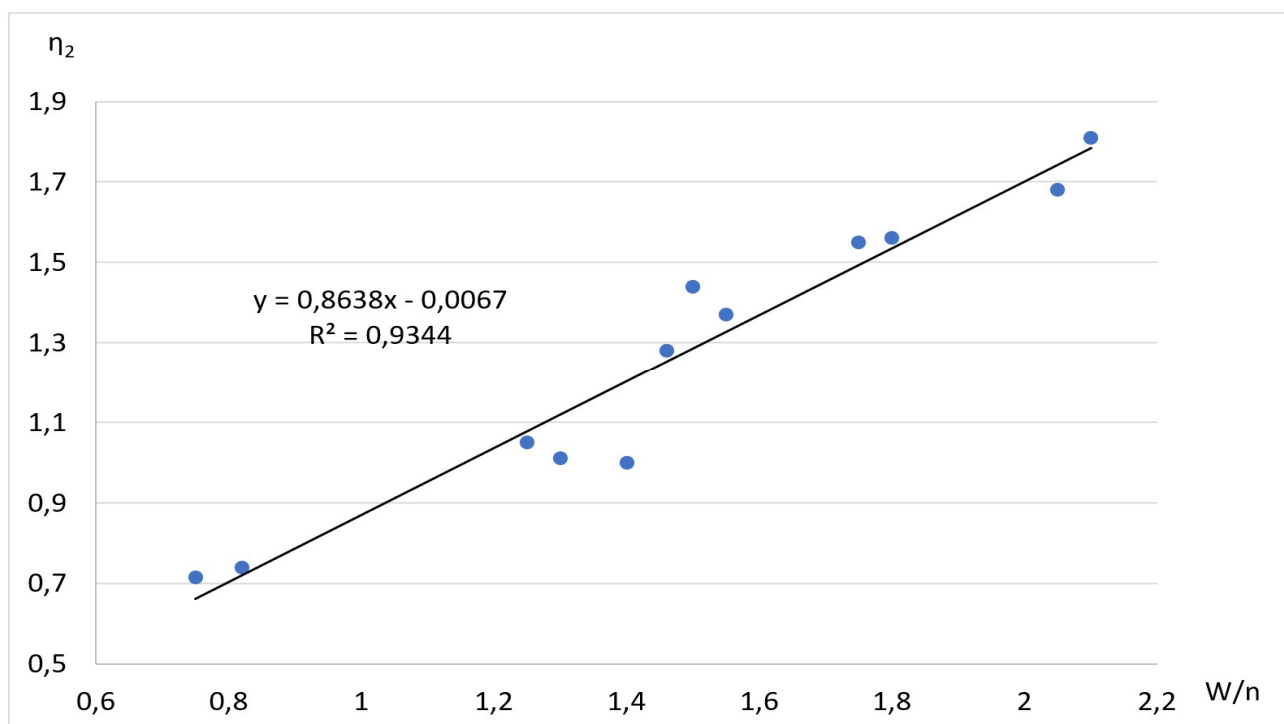


Рисунок 3.2. Зависимость для комплекса η_2

Таким образом, окончательная формула для расчета разрывной нагрузки тонковолокнистых волокон хлопка принимает вид [157]:

$$P_{\text{рас}} = 0,7 \left\{ \frac{T \cdot L}{1000} \right\} \times \frac{\frac{W}{n}}{0,8638 \frac{W}{n} - 0,0067} \quad (3.9).$$

Формула справедлива при: $4 \leq T \cdot L \leq 6$, $0,5 \leq \frac{W}{n} \leq 2,2$.

Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 14 %.

Таким образом, получена математическая модель, позволяющая прогнозировать качественные показатели тонковолокнистого исходного хлопкового волокна ручной сборки исходя из его основных показателей [157].

Прогнозирование разрывной нагрузки средневолокнистого хлопка

Исходя из вышеприведенных рассуждений о возможности использования теории подобия для определения разрывной нагрузки тонковолокнистого волокна, рассмотрим возможность решения данной задачи и для волокон средневолокнистого хлопчатника по аналогии с предыдущим решением.

Выделим факторы, влияющие на свойства рассматриваемых волокон [158].

$$P_{\text{вол}} = f(T_{\text{вол}}, L_{\text{шт}}, W, n) \quad (3.10),$$

где $P_{\text{вол}}$ – разрывная нагрузка волокна, Сн;

$T_{\text{вол}}$ – линейная плотность, мтекс;

$L_{\text{шт}}$ – штапельная длина, мм;

W – влажность, %;

n – содержание пороков и сорных примесей, %.

В качестве объектов исследования были взяты три вида селекционных сортов средневолокнистого сорта хлопка ручной сборки [158] (таблица 3.3).

Одним из методов построения адекватных математических моделей, обеспечивающих возможность формализованного сопоставления экспериментальных и фактических данных, является использование при построении моделей уравнений подобия. В тех случаях, когда известен только набор физических параметров, характеризующих процессов, но неизвестны уравнения, связывающие их между собой, целесообразно применять теорию размерностей [158].

Используя методы теории подобия и анализа размерностей, представим выражение (3.10) в виде комплекса безразмерных показателей:

$$P = \eta \left(T \cdot L, \frac{W}{n} \right) \quad (3.11)$$

где η – безразмерный показатель, характеризующий изменение разрывной нагрузки волокна [158].

Таблица 3.3. Физико-механические показатели средневолокнистого сорта хлопка (ГОСТ 3279), [158]

Тип хлопкового волокна	Селекционный сорт	Промышленный сорт	Разрывная нагрузка, сН	Штапельная длина, мм	Линейная плотность, мтекс	Влажность, %	Содержание пороков и сорных примесей, %
4	133	I	4,4	35,3	154	4,8	2,8
		II	4,1	35,2	150	5,1	3,8
		III	3,6	35,1	136	5,2	4,6
		IV	3,1	34,8	127	6,0	7,6
4	175-Ф	I	4,4	33,8	167	5,8	2,0
		II	4,1	32,8	161	5,4	2,0
		III	3,4	32,9	145	5,5	4,3
		IV	3,1	31,8	135	5,9	3,8
5	108-Ф	I	4,5	31,9	180	5,4	2,1
		II	4,0	31,7	167	5,8	2,9
		III	3,5	31,6	152	6,0	4,0
		IV	3,0	31,4	134	5,9	5,7

Так как на разрывную нагрузку одновременно оказывают влияние несколько факторов, формула (3.11) может быть представлена в виде двух безразмерных показателей:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \quad (3.12)$$

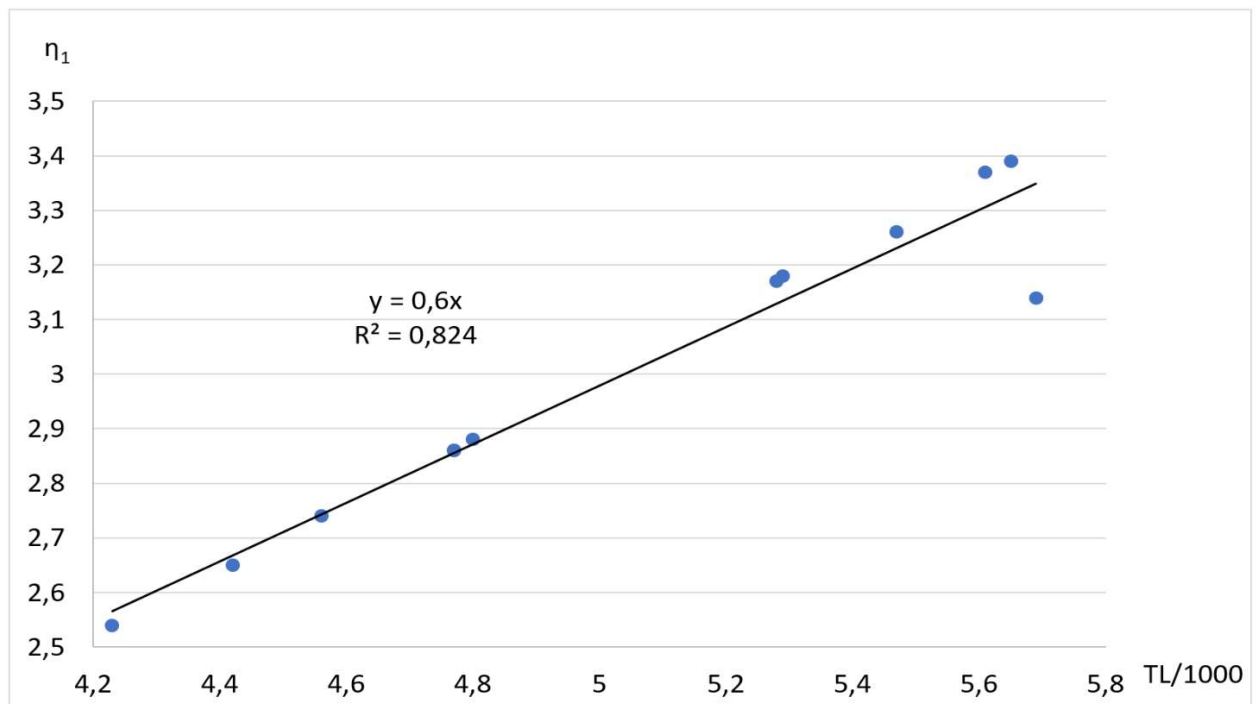
где η_1 – безразмерный показатель, характеризующий влияние геометрических свойств волокон;

η_2 – безразмерный показатель, характеризующий влияние внешних воздействий [158].

Зависимость для комплекса η_1 определяется уравнением (3.10) и представлена на рисунке 3.3 [158].

Таблица 3.4. Результаты расчета разрывной нагрузки волокон, [158]

Селекционный сорт	Промышленный сорт	Разрывная нагрузка, сН	$\frac{T \cdot L}{1000}$	$\frac{W}{n}$	η_1	η_2	$P_{\text{рас}} = \eta_1 \cdot \eta_2$	Отклонение, %
133	I	4,4	5,47	1,71	3,26	1,20	3,92	11,0
	II	4,1	5,28	1,34	3,17	1,17	3,71	9,7
	III	3,6	4,77	1,13	2,86	1,32	3,78	4,8
	IV	3,1	4,42	0,79	2,65	1,09	2,88	7,2
175-Ф	I	4,4	5,65	2,90	3,39	1,25	4,23	3,9
	II	4,1	5,61	2,70	3,37	1,24	4,18	1,9
	III	3,4	4,77	1,28	2,86	1,16	3,3	2,0
	IV	3,1	4,56	1,55	2,74	1,15	3,15	5,0
108-Ф	I	4,5	5,69	2,57	3,14	1,24	4,23	6,0
	II	4,0	5,29	2,00	3,18	1,22	3,86	3,5
	III	3,5	4,80	1,50	2,88	1,19	3,41	8,8
	IV	3,0	4,23	1,04	2,54	1,13	2,78	7,5

Рисунок 3.3. Зависимость для комплекса η_1

$$\eta_1 = 0,6 \left\{ \frac{T \times L}{1000} \right\} \quad (3.13),$$

$$\eta_2 = \frac{\frac{W}{n}}{0,7565 \frac{W}{n} - 0,1311} \quad (3.14).$$

Зависимость для комплекса η_2 определяется уравнением (3.14) и представлена на рисунке 3.4 [158].

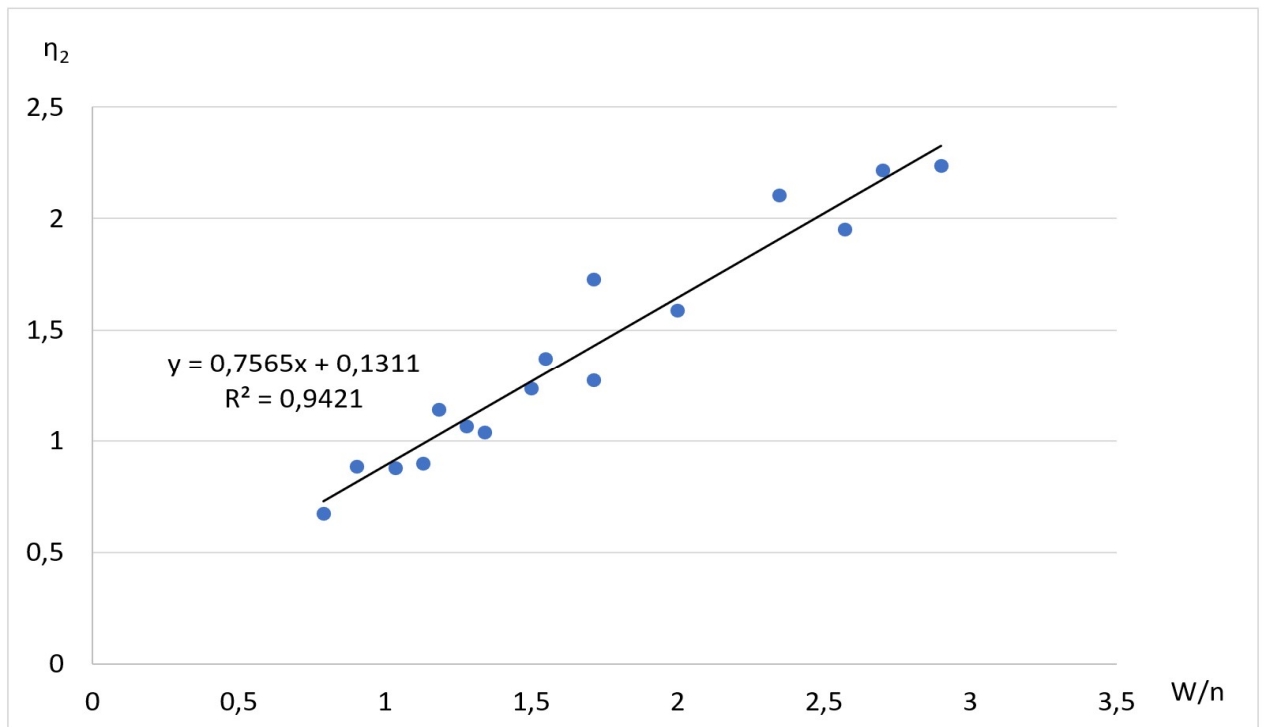


Рисунок 3.4. Зависимость для комплекса η_2

Таким образом, окончательная формула для расчета разрывной нагрузки средневолокнистого хлопка принимает вид [158]:

$$P_{\text{рас}} = 0,6 \left\{ \frac{T \times L}{1000} \right\} \times \frac{\frac{W}{n}}{0,7565 \frac{W}{n} - 0,1311} \quad (3.15).$$

Формула справедлива при $4 \leq TL \leq 6$, $0,5 \leq \frac{W}{n} \leq 2,2$.

Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 11%.

Таким образом, полученная математическая модель позволяет прогнозировать качественные показатели исходного средневолокнистого хлопкового волокна ручной сборки исходя из его основных показателей [158].

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на разрывную нагрузку пряжи оказывают разрывная нагрузка волокна, линейная плотность волокна 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.

3.3. Анализ влияния многократного растяжения на остаточную циклическую деформацию волокон хлопка

Среди свойств текстильных материалов большое значение имеют механические свойства, поскольку текстильные изделия в эксплуатации постоянно подвергаются нагрузкам, вызывающим деформации растяжение, изгиба, кручения и т.д. Наиболее часто встречается деформация растяжения, поэтому остановимся на этом более подробно.

Работы по исследованию усталости пряжи показали, что структура пряжи в процессе ее использования, связанного с многократным нагружением, изменяются, она расшатывается, и связь между волокнами, полученная от крутки, ослабляется, поперечник увеличивается, она становится более рыхлой, тем самым снижается надежность рассматриваемых материалов [159-166].

Очень часто бывает, что пряжа с более высокой разрывной нагрузкой показывает большую обрывность в ткачестве, нежели сходная с ней менее прочная. Это объясняется тем, что пряжа с более высокой прочностью при однократном растяжении может иметь структуру, которая не выдерживает многократных растяжений, расшатывается, что приводит ее к разрыву.

Одновременно с появлением усталости в пряже, аналогичные явления могут

иметь место и в волокнах ее составляющих. В них происходит расшатывание структуры, ослабление межмолекулярных связей, разрывы цепных молекул и в результате изменение физико-механических свойств и т.д. [166].

Для исследования волокон хлопка на усталость были использованы образцы разновидностей: «108-Ф» и «149-Ф». Целью этих исследований заключалась в том, чтобы определить, как влияют многократные деформации растяжения и вызываемая ими усталость волокон различных образцов на их свойства [166].

Многократные растяжения осуществлялись при следующем режиме работы (таблица 3.5).

Таблица 3.5. Значения режимов работы приборов для определения многократных деформаций при зажимной длине 10 мм и частоте 200 циклов в минуту, [166]

Амплитуда растяжения в % от зажимной длины	Общее число циклов воздействия на волокно
0,25	10000
0,50	5000
0,80	3000
1,00	2000
1,50	До обрыва

Необходимо установить характер кривых нарастания остаточных циклических деформаций, получаемого волокном при испытании на пульсаторе. Для каждого испытания брали волокна с типичным коэффициентом зрелости. Результаты проведенных исследований приведены в таблицах 3.6, 3.7, и на рисунках 3.5, 3.6, отражающих нарастание остаточных циклических деформаций [166].

Рост остаточных циклических деформаций для волокон хлопка разновидности 108-Ф при разной заданной величине деформации приведен в таблице 3.6 и на рисунке 3.5.

Таблица 3.6. Значения остаточных циклических деформаций для хлопка 108-Ф при частоте 200 циклов в минуту [166]

Величина деформации	Число циклов											
	10	20	50	100	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
0,25	0,035	0,038	0,047	0,050	0,069	0,080	0,081	0,084	0,088	0,089	0,091	0,092
0,50	0,036	0,037	0,043	0,049	0,070	0,082	0,091	0,094	0,098	0,098	0,101	0,103
0,80	0,130	0,160	0,17	0,200	0,230	0,250	0,260	0,280	0,280	0,280	-	-
1,00	0,219	0,258	0,290	0,310	0,349	0,367	0,376	0,387	0,394	0,399	-	-
1,50	0,440	0,530	0,620	0,680	0,860	0,920	0,940	0,960	-	-	-	-

Рост остаточных циклических деформаций для волокон хлопка разновидности 149-Ф при разной заданной величине деформации приведен в таблице 3.7 и на рисунке 3.6 [166].

Таблица 3.7. Значения остаточных циклических деформаций для хлопка 149-Ф, [166]

Величина деформации	Число циклов											
	10	20	50	100	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
0,25	0,037	0,044	0,054	0,065	0,081	0,085	0,094	0,100	0,100	0,100	0,104	0,106
0,50	0,056	0,064	0,072	0,084	0,105	0,114	0,116	0,118	0,120	0,123	0,126	0,127
0,80	0,160	0,170	0,200	0,210	0,240	0,250	0,260	0,270	0,280	0,290	-	-
1,00	0,234	0,261	0,282	0,301	0,332	0,349	0,356	0,363	0,365	0,368	-	-
1,50	0,583	0,633	0,767	0,833	0,950	1,000	1,033	1,058	-	-	-	-

Исходя из вышеприведенных значений, можно сделать следующие выводы [166]:

1. Испытания на пульсаторе для волокна установили характер кривых нарастания остаточной циклической деформации при постоянстве заданной величины абсолютной деформации.

2. Величина амплитуды растяжения сильно влияет на остаточную циклическую деформацию. С ростом амплитуды она значительно увеличивается. За первые 100 циклов нарастание остаточных циклических деформаций происходит ускоренно. В интервале от 100 до 1000 циклов рост деформации замедляется, после чего

она изменяется еще меньше.

3. Установлено, что показатели деформации для хлопка 149-Ф ниже, чем для хлопка 108-Ф [166].

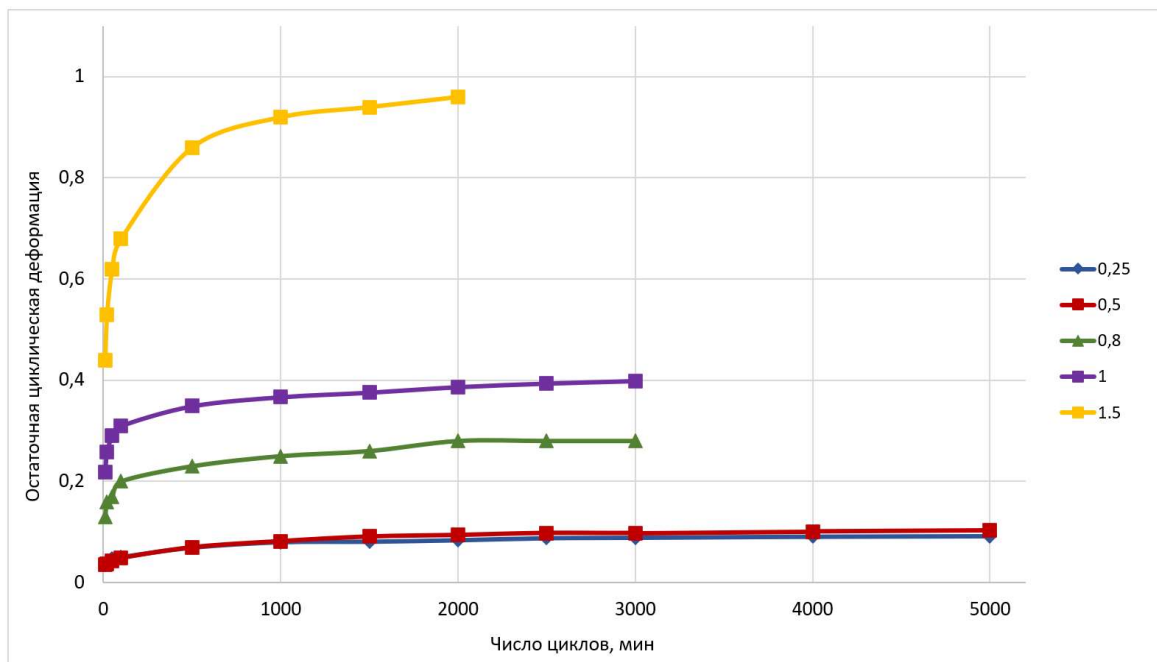


Рисунок 3.5. Кривые нарастания остаточной циклической деформации для хлопка 108-Ф [166]

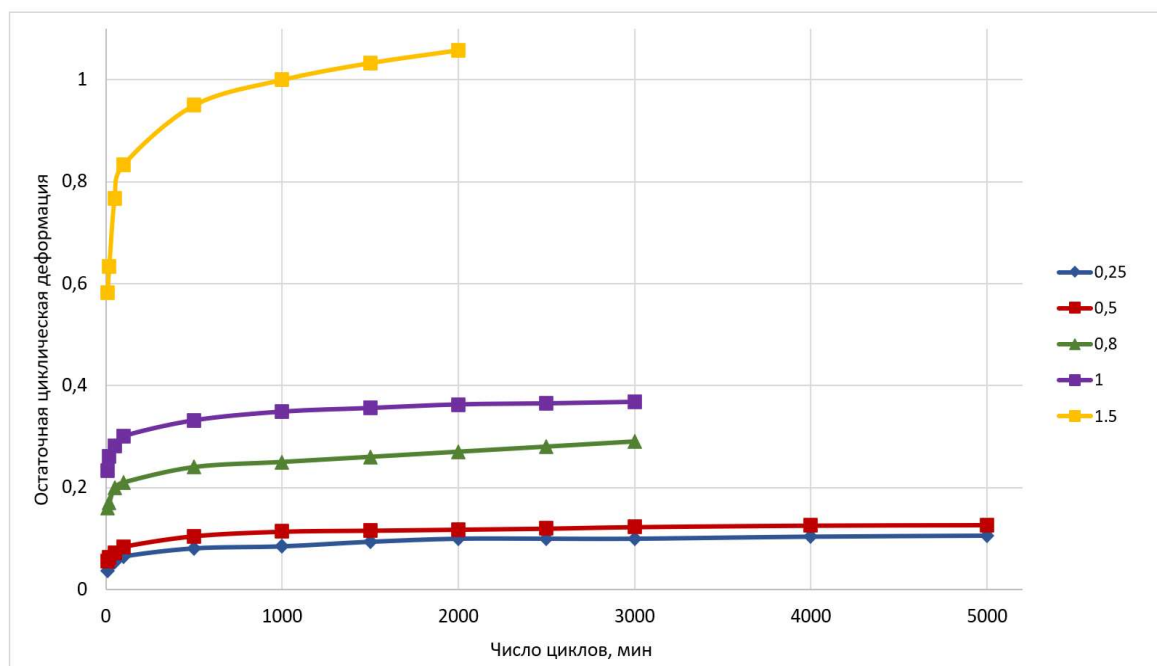


Рисунок 3.6. Кривые нарастания остаточной циклической деформации для хлопка 149-Ф [166]

Выводы по главе 3

1. Предложена функциональная зависимость, позволяющая прогнозировать разрывную нагрузку тонковолокнистого и средневолокнистого хлопкового волокна. В качестве исходных факторов, влияющих на свойства разрывной нагрузки волокон, выступают: линейная плотность, штапельная длина волокон, содержание пороков и сорных примесей, влажность исходных волокон, т.е. те параметры, которые заложены в оценку селекционных сортов хлопкового волокна.

2. Целесообразно использовать теорию подобия и анализа размерностей при прогнозировании свойств текстильных материалов, которая позволяет обобщить различные факторы таким образом, чтобы получить безразмерные комплексы.

3. Для определения разрывной нагрузки тонковолокнистого хлопка ручной сборки были взяты три селекционных сорта: Ашхабад, 9732-И, 6249-В. В результате использования теории подобия получено уравнение:

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

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

4. Получено уравнение расчета разрывной нагрузки средневолокнистых сортов хлопка. В качестве объектов исследования были взяты селекционные сорта: 133, 175-Ф, 108-Ф:

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

Отклонение расчетных значений не превышает 11% от экспериментальных.

5. В работе проведены исследования влияния многократного растяжения на остаточную циклическую деформацию волокон хлопка. Цель этих исследований заключалась в том, чтобы определить, как влияют многократные деформации растяжения на усталостные свойства волокон при изменении амплитуды растяжения и от количества циклов растяжения.

6. Установлено, что величина амплитуды растяжения достаточно сильно влияет на остаточную циклическую деформацию, причем за первые 100 циклов нарастание остаточной циклической деформации происходит ускоренно, после чего оно замедляется, практически выходя на горизонтальное плато.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРЯЖИ И ТКАНЕЙ

4.1. Установление взаимосвязей между показателями механических свойств пряжи от ее сырьевого состава

Контроль качества текстильных нитей основан на измерении и оценке нормативных показателей в соответствии с действующей нормативно – технической документацией, в которой устанавливаются требования к свойствам продукции и методы испытания для их контроля.

Требования к показателям качества текстильной пряжи регламентированы в стандартах, технических условиях или другой нормативно-технической документации. Показатели качества пряжи должны определять основные требования к их изготовлению. Показатели качества пряжи разделяют на общие, обязательные для всех видов пряжи и дополнительные, обязательные для некоторых видов и обусловленные их назначением.

В таблице 4.1 приведены показатели качества пряжи, нормируемые в стандартах. Таблица составлена с учетом стандартов, устанавливающих номенклатуру показателей качества пряжи и нитей, вырабатываемых для хлопчатобумажной, шерстяной, льняной и шелковой промышленности [141].

К общим показателям качества нитей относятся такие показатели, как вид применяемого сырья (для смешанных – содержание тех или иных видов волокон, п, %); линейная плотность, Т, текс; допустимые отклонения от номинальной линейной плотности, %; коэффициент вариации линейной плотности, С, %; разрывная нагрузка, Р, сН; относительная разрывная нагрузка пасмы или одиночной нити, Р/Т, мН/текс; коэффициент вариации разрывной нагрузки, С, %; разрывное удлинение, ϵ , %; крутка, К, кр/м; коэффициент крутки; влажность, W, %; чистота нити (определяемая классом) [141].

Таблица 4.1. Основные показатели характеризующие свойства текстильных нитей

Нити (пряжа)	Показатели качества, характеризующие				
	геометрические свойства	механические свойства	физические свойства	пороки нитей и намотки	неравномерность
Нити (пряжа) хлопчатобумажные, штапельные из синтетических и искусственных волокон и смешанные	Линейная плотность, коэффициент крутки (кроме основной одноплеточной пряжи)	Относительная разрывная нагрузка пасмы или одиночной нити	Влажность, %	Чистота, дефекты намотки	Коэффициент вариации по линейной плотности и разрывной нагрузке
Пряжа льняная суровая, из химически обработанного волокна и смешанная	Линейная плотность, коэффициент крутки (для пряжи сухого способа прядения)	Разрывная нагрузка одиночной нити	Влажность, удельная вязкость раствора целлюлозы и белизна, заостренность	Количество утолщений	Коэффициент вариации по линейной плотности и разрывной нагрузке
Пряжа шерстяная и полушерстяная (смешанная)	Линейная плотность, коэффициент крутки	Относительная разрывная нагрузка одиночной нити или пасмы, удлинение при разрыве	Влажность, содержание жира и растительных примесей	Пороки внешнего вида, дефекты намотки	Коэффициент вариации по линейной плотности, разрывной нагрузке и крутке
Нити из натурального шелка и химические	Линейная плотность, крутка	Относительная разрывная нагрузка одиночной нити, удлинение при разрыве	Влажность, содержание за-масливателя, плотность намотки	Внутри-бобинные пороки, дефекты намотки	Коэффициент вариации по линейной плотности, крутке и удлинению при разрыве

К дополнительным показателям качества нитей относятся: коэффициент вариации крутки, %; устойчивость окраски, баллы; содержание аппрета, %; степень мерсеризации, %; белизна, %; парафинирование, %; пороки внешнего вида; содержание жира; устойчивость окраски и др.

Выбор тех или других показателей определяется видом используемых нитей или пряжи. Для более конкретного выбора номенклатуры показателей используются стандарты [141].

В связи с широким внедрением в текстильные изделия химических волокон разных видов большое значение приобретает изучение механических свойств текстильных материалов, которые в значительной степени определяют их технологические свойства, так как, такие показатели как изгибоустойчивость, или многократное растяжение, характеризует динамическую усталость материала [168-174].

Для решения поставленной задачи исследования, было изучено влияние волокнистого состава смеси на такие показатели пряжи, как прочность, удлинение, работа разрыва, изгибоустойчивость, релаксационные процессы, устойчивость к многократному растяжению и установлена корреляционная зависимость между свойствами, определяющими в той или иной степени устойчивость к деформационным воздействиям различных видов волокон [175-186].

В качестве исходных образцов была взята хлопко-вискозная пряжа линейной плотности 25 текс и хлопко-полиэфирная пряжа линейной плотности 15 текс. Различного процентного содержания натуральных и химических волокон [182-186]. Для сравнения были взяты той же линейной плотности хлопковая, полиэфирная и вискозная пряжи.

Сырьевой состав рассматриваемых вариантов пряжи варьировался в широком диапазоне.

Хлопковая, вискозная и хлопко-вискозная пряжа линейной плотности 25 текс приведены в таблице 4.2 [182, 183].

Таблица 4.2. Состав пряж

Варианты	Сырьевой состав
1	100% хлопок + 0% вискозного волокна
2	90% хлопка + 10% вискозного волокна
3	84% хлопка + 16% вискозного волокна
4	75% хлопка + 25% вискозного волокна
5	67% хлопка + 33% вискозного волокна
6	50% хлопка + 50% вискозного волокна
7	0% хлопка + 100% вискозного волокна

Хлопковая, полиэфирная и хлопко-полиэфирная пряжа линейной плотности 15 текс приведены в таблице 4.3. [184].

Таблица 4.3. Состав пряж

Варианты	Сырьевой состав
1	100% хлопок + 0% полиэфирного волокна
2	67% хлопка + 33% полиэфирного волокна
3	45% хлопка + 55% полиэфирного волокна
4	33% хлопка + 67% полиэфирного волокна
5	13% хлопка + 87% полиэфирного волокна
6	0% хлопка + 100% полиэфирного волокна

В качестве основных показателей были использованы:

- разрывная нагрузка пряжи;
- разрывное удлинение;
- крутка пряжи;
- неровнота по линейной плотности;
- неровнота по разрывной нагрузке.

Результаты испытаний механических свойств хлопковой, вискозной и смешанной хлопко-вискозной пряжи приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Механические свойства хлопковой, вискозной и смешанной пряж [182, 183]

Показатели	Наименование варианта и состав смеси в %						
	100% хлопок	90/10 Хл/вис	84/16 Хл/вис	75/25 Хл/вис	67/33 Хл/вис	50/50 Хл/вис	100% Виск
Линейная плотность, текс	24,7	25,1	24,1	25,3	25,1	25,0	24,6
Разрывная нагрузка, Н	3,15	3,15	3,14	3,15	3,17	3,20	3,24
Удлинение, %	8,6	8,4	8,2	8,3	8,5	8,7	10,5
Число кручений на 1 м	718	720	732	714	716	696	694
Неровнота по линейной плотности%	1,9	2,4	2,6	1,8	2,2	1,8	2,1
Неровнота по разрывной нагрузке, %	8,9	9,7	9,7	9,5	10,3	8,3	9,5

Результаты испытаний механических свойств хлопковой, полиэфирной и смешанной хлопко-полиэфирной пряжи приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Механические свойства хлопковой, полиэфирной и смешанной пряж [184]

Показатели	Наименование варианта и состав смеси в %					
	100% хлопка	67/33 х/б/п/э	43/57 х/б/п/э	33/67 х/б/п/э	23/77 х/б/п/э	100% полиэфир
Линейная плотность, текс	14,4	14,6	15,1	14,6	14,3	14,6
Разрывная нагрузка, Н	3,05	3,34	3,45	3,62	3,75	3,96
Удлинение, %	8,3	8,2	8,7	9,7	10,7	11,3
Число кручений на 1 м	945	945	953	946	935	915
Неровнота по линейной плотности, %	5,1	4,7	4,4	4,2	4,1	3,8
Неровнота по разрывной нагрузке, %	15,3	13,8	12,7	11,7	9,1	8,9

На рисунках 4.1-4.4 приведены изменения разрывной нагрузки и разрывного удлинения пряж различного процентного содержания натуральных и химических волокон [183, 184].

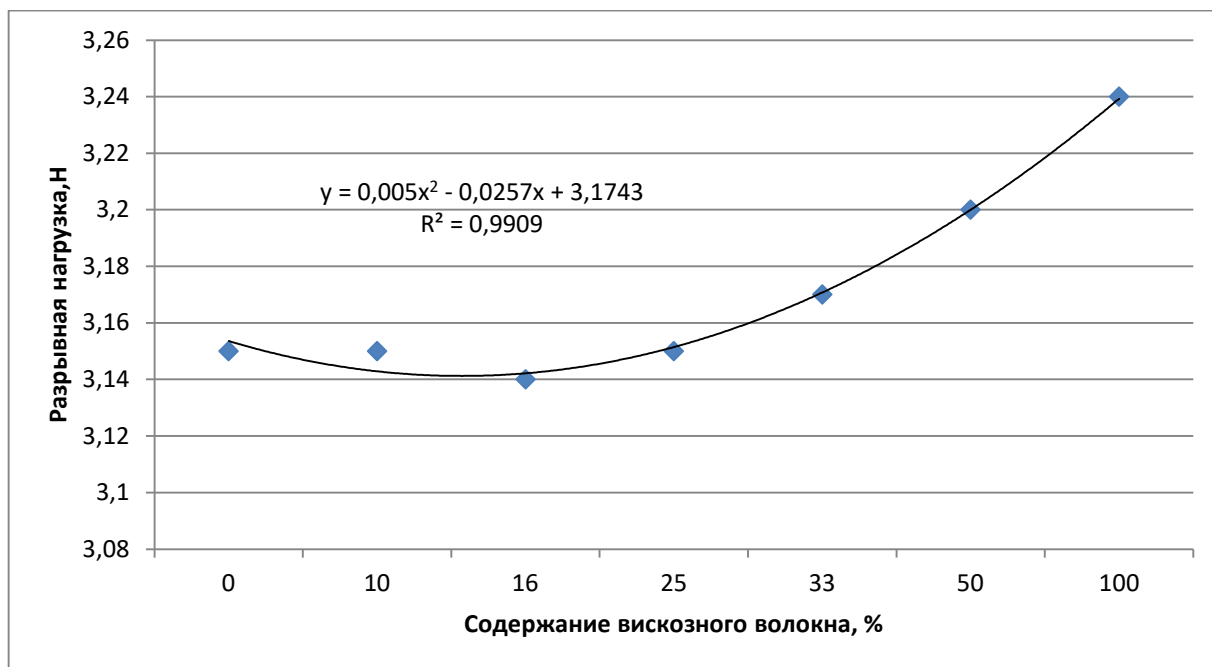


Рисунок 4.1. Изменение разрывной нагрузки от процентного содержания вискозного волокна и хлопкового волокна в пряже

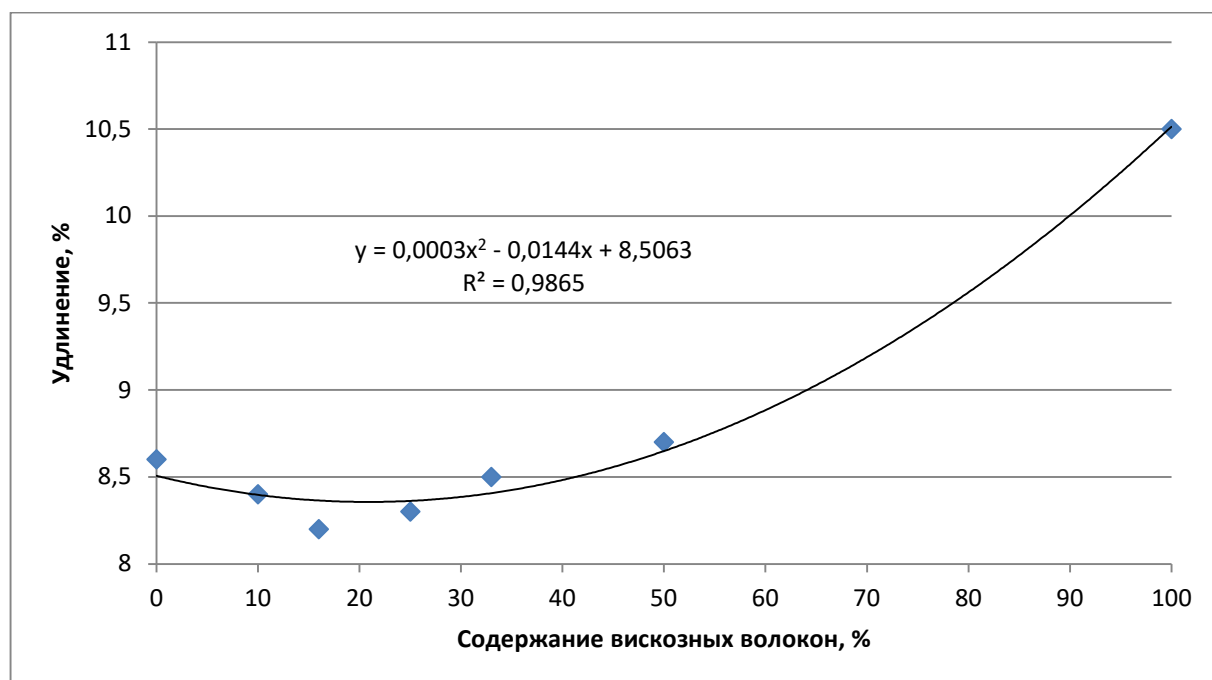


Рисунок 4.2. Изменение удлинения от процентного содержания вискозного волокна и хлопкового волокна в пряже

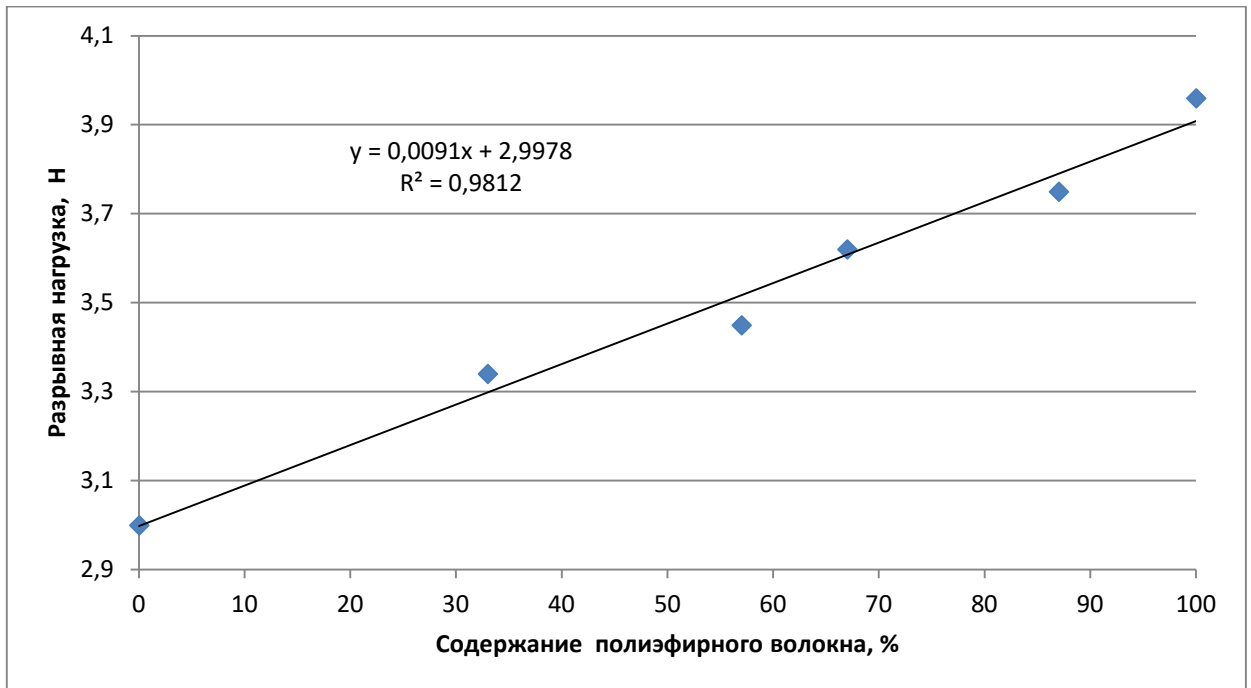


Рисунок 4.3. Изменение разрывной нагрузки от процентного содержания полиэфирного и хлопкового волокон в пряже

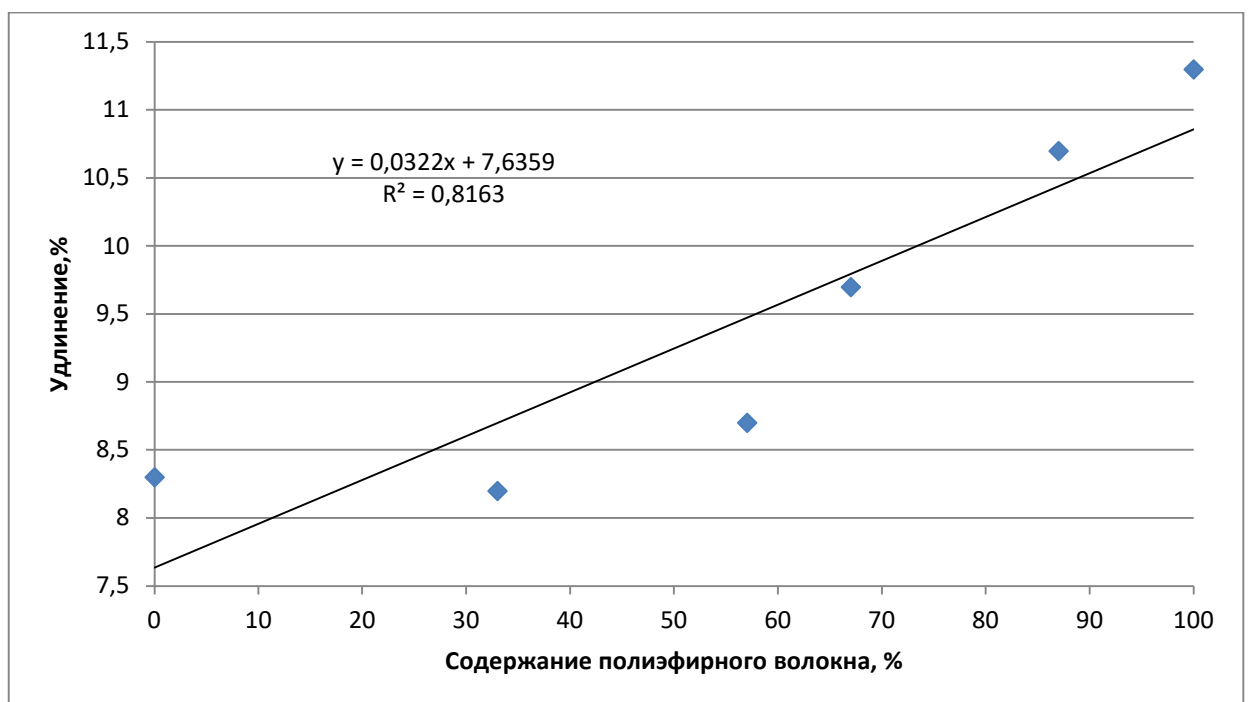


Рисунок 4.4. Изменение удлинения от процентного содержания полиэфирного и хлопкового волокон в пряже

Анализ полученных диаграмм показывает, что с увеличением процентного

содержания химических волокон прочность пряжи увеличивается, причем у хлопко-полиэфирной смеси эти показатели выше.

Так же наблюдается тенденция, что с увеличением процентного содержания химических волокон удлинение возрастает, причем у смесей с полиэфирными волокнами эти значения несколько выше.

Текстильные материалы по своей природе легко изгибаются. В зависимости от назначения и состава текстильные материалы в процессе эксплуатации будут вести себя по-разному.

Для испытания текстильных материалов на изгибоустойчивость использовался прибор марки ДП-5/3. Полученные значения изгибоустойчивости пряжи от разного сырьевого состава приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Число циклов до разрушения хлопчатобумажной, вискозной, полиэфирной и смешанной пряжи

Сырьевой состав пряжи	Число циклов до разрушения	
	X ср (цикл)	C, %
Пряжа 25 текс		
100% хлопка + 0% вискозного волокна	15340	33,0
90% хлопка + 10% вискозного волокна	13820	34,8
84% хлопка + 16% вискозного волокна	10180	33,5
75% хлопка + 25% вискозного волокна	9840	30,7
67% хлопка + 33% вискозного волокна	8560	27,9
50% хлопка + 50% вискозного волокна	7870	42,7
0% хлопка + 100% вискозного волокна	6520	44,1
Пряжа 15 текс		
100% хлопка + 0%полиэфирного волокна	26120	42,2
67% хлопка + 33% полиэфирного волокна	30300	48,1
43% хлопка + 57% полиэфирного волокна	41790	40,3
33% хлопка + 67% полиэфирного волокна	44830	48,3
13% хлопка + 87% полиэфирного волокна	45750	38,0
0% хлопка + 100% полиэфирного волокна	47020	46,7

Из данных таблицы 4.6. видно, что у пряжи из хлопка и вискозных волокон с увеличением содержания вискозных волокон прочность и изгибоустойчивость понижаются, тогда как, большее вложение полиэфирных волокон дает противоположную картину.

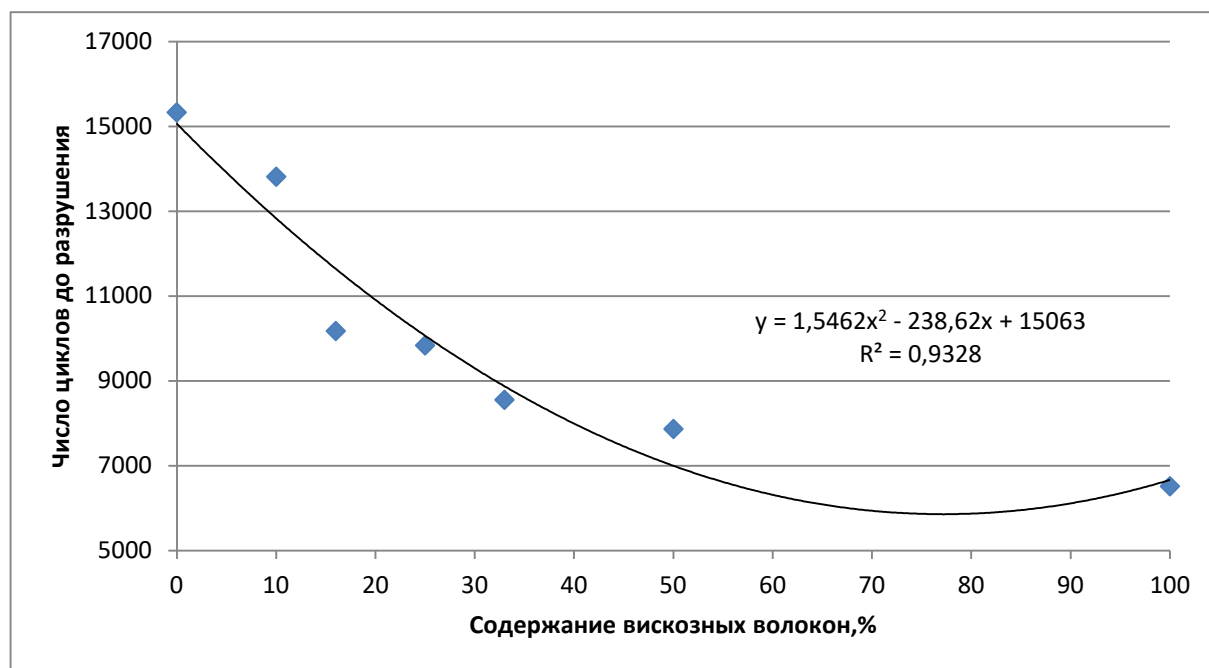


Рисунок 4.5. Изменение изгибоустойчивости хлопковой, вискозной и хлопко-вискозной пряжи в зависимости от процентного содержания вискозных волокон

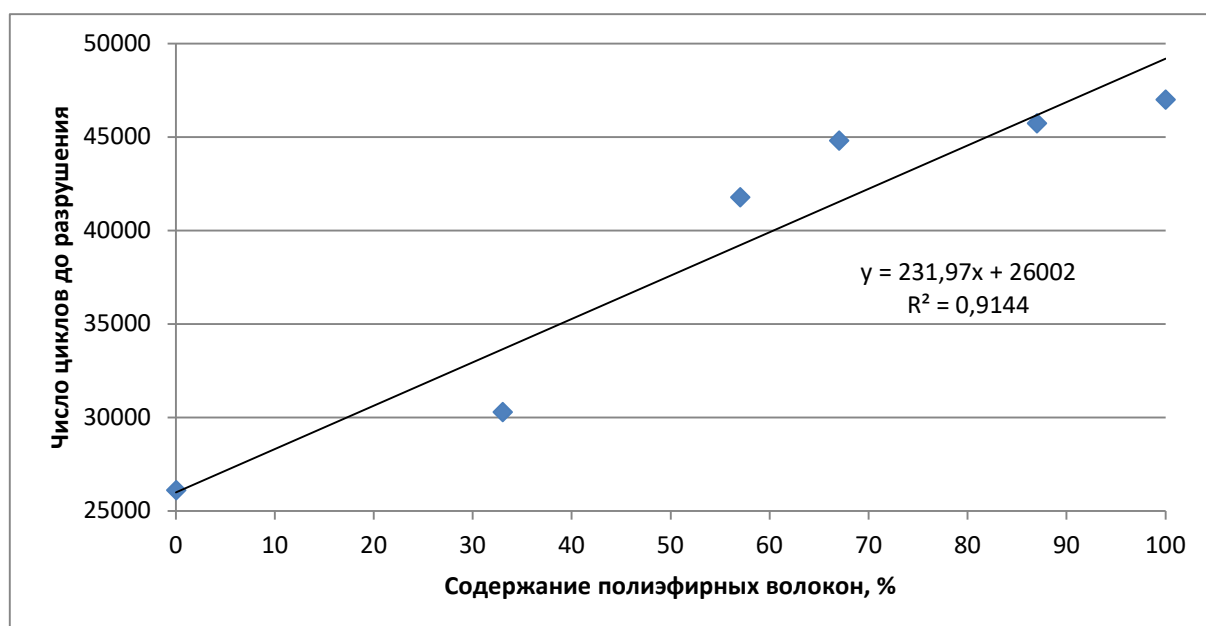


Рисунок 4.6. Изменение изгибоустойчивости моно структурной и смешанной пряжи в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

Следующим этапом работы было изучение устойчивости пряжи к многократному растяжению, для чего был использован пульсатор ПН-5. Скорость растяжения составляла 240 циклов в минуту при абсолютной нагрузке на нить 60 г. Результаты исследований приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Число циклов до разрушения при многократных деформациях хлопчатобумажной, вискозной, полиэфирной и смешанной пряжи

Сырьевой состав пряжи	Число циклов до разрушения при многократных деформациях	
	Х ср (цикл)	М _г , %
Пряжа 25 текс		
100% хлопка + 0% вискозного волокна	722	23,0
90% хлопка + 10% вискозного волокна	690	26,8
84% хлопка + 16% вискозного волокна	750	20,5
75% хлопка + 25% вискозного волокна	850	20,7
67% хлопка + 33% вискозного волокна	910	21,9
50% хлопка + 50% вискозного волокна	960	23,2
0% хлопка + 100% вискозного волокна	1250	20,1
Пряжа 15 текс		
100% хлопка + 0% полиэфирного волокна	720	18,0
67% хлопка + 33% полиэфирного волокна	1856	22,1
43% хлопка + 57% полиэфирного волокна	2380	24,7
33% хлопка + 67% полиэфирного волокна	5190	24,3
13% хлопка + 87% полиэфирного волокна	>10000	-
0% хлопка + 100% полиэфирного волокна	>15000	-

На рисунках 4.7, 4.8. приведены графики устойчивости хлопковой, вискозной, хлопко-вискозной, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи от многократных растяжений.

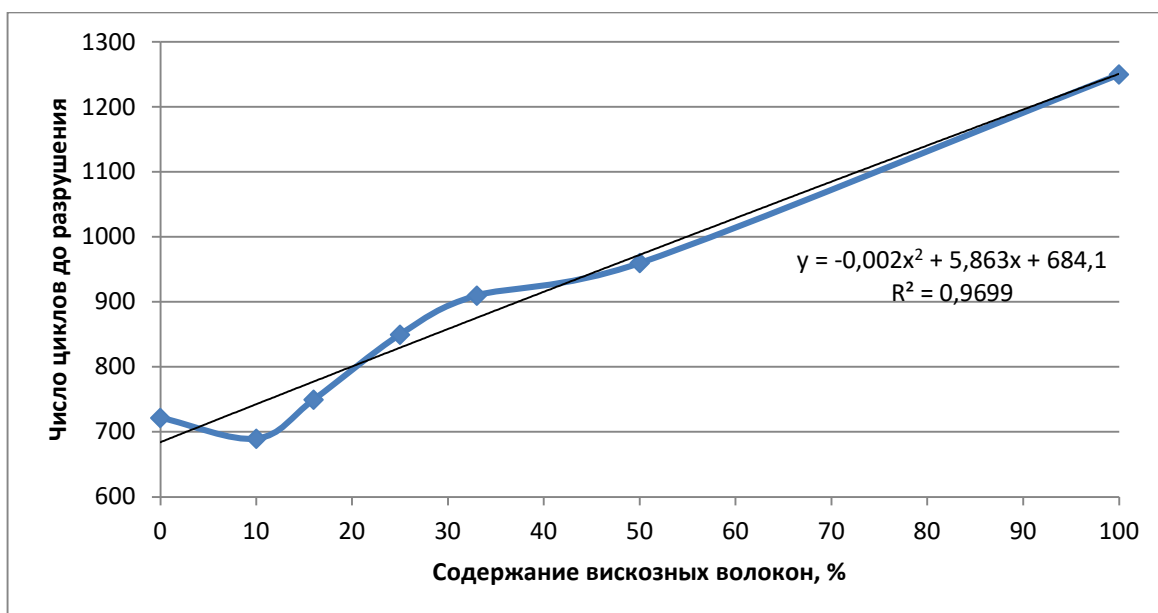


Рисунок 4.7. Устойчивость хлопковой, вискозной и хлопко-вискозной пряжи к многократным деформациям растяжения

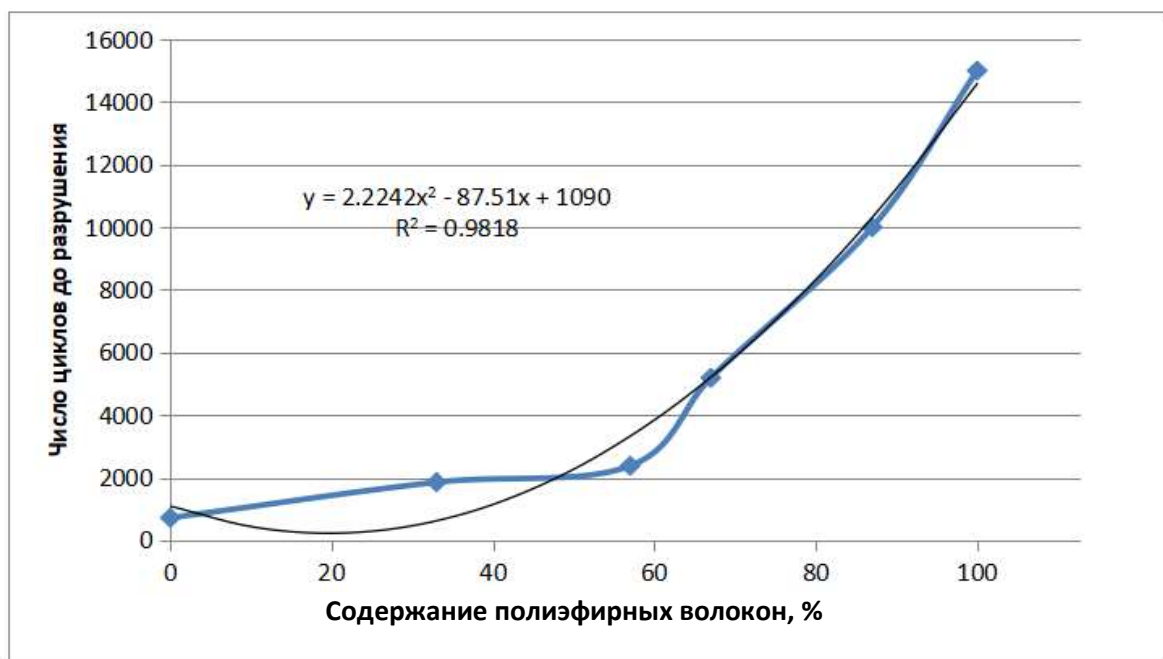


Рисунок 4.8. Устойчивость хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи к многократным деформациям растяжения

Анализ графиков 4.7 и 4.8 показывает, что увеличение вложений химических волокон позволяет повысить устойчивость смесовой пряжи к многократному растяжению, причем полиэфирные волокна оказывают большее влияние по сравнению с вискозными волокнами.

4.2. Комплексная оценка качества хлопко-полиэфирной пряжи

Проведенные исследования показали, что выше рассмотренные показатели по-разному влияют на конечный продукт. Поэтому целесообразно рассмотреть комплексную оценку качества рассматриваемой пряжи.

Для определения наилучшего образца целесообразно рассмотреть их в комплексе от приведенных показателей. В качестве основных факторов использовались следующие факторы:

- линейная плотность пряжи;
- разрывная нагрузка пряжи;
- удлинение пряжи;
- крутка пряжи;
- изгибоустойчивость пряжи;
- многократное растяжение.

В таблице 4.8 приведены показатели, характеризующие пряжу различного процентного содержания натуральных и химических волокон [184, 185].

Таблица 4.8. Механические показатели хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи [184, 185]

Показатели	100% полиэф.	87% полиэф.	67% полиэф.	57% полиэф.	33% полиэф.	100% Хлоп.
Линейная плотность, текс	14,6	14,3	14,6	14,5	14,6	14,4
Разрывная нагрузка, Н	3,96	3,75	3,62	3,45	3,34	3,05
Удлинение, %	11,3	10,7	9,7	8,7	8,2	8,3
Крутка, кр./м	915	935	946	935	945	945
Изгибоустойчивость, цикл	47020	45750	44830	41790	30300	26120
Многократное растяжение, цикл	15000	10000	5190	2380	1850	720

В связи с тем, что приведенные факторы имеют различную размерность, необходимо перевести их в безразмерные показатели, то есть соотнести эти показатели с базовыми показателями.

Относительные показатели качества q_i рассчитывались по формуле:

$$q_i = \frac{x_i}{x_{i0}} \quad (4.1),$$

где x_i и x_{i0} – значения i -го показателя качества соответственно фактического и базового [184].

В таблице 4.9 приведен перерасчет исходных значений в комплексные на основании которых построена диаграмма относительных показателей качества пряжи различного процентного содержания натуральных и химических волокон (рисунок 4.9).

Таблица 4.9. Комплексные показатели механических свойств хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи [184]

Показатели	100% полиэф.	87% полиэф.	67% полиэф.	57% полиэф.	33% полиэф.	100% хлопок
Линейная плотность, текс	0,967	0,947	0,967	1	0,967	0,954
Разрывная нагрузка, Н	1	0,947	0,915	0,872	0,844	0,771
Удлинение, %	1	0,874	0,508	0,404	0,430	0,435
Крутка, кр/м	0,968	0,989	1	0,989	0,999	0,988
Изгибоустойчивость, цикл	1	0,973	0,954	0,889	0,645	0,556
Многократное растяжение, цикл	1	0,667	0,346	0,150	0,124	0,048

Комплексная оценка представляет собой площадь всех участков кривой. Чем больше суммарная площадь, тем образец лучше по совокупности свойств.

Ниже приведена диаграмма относительных показателей качества пряжи различного процентного содержания хлопковых и полиэфирных волокон (рисунок 4.9) [185].

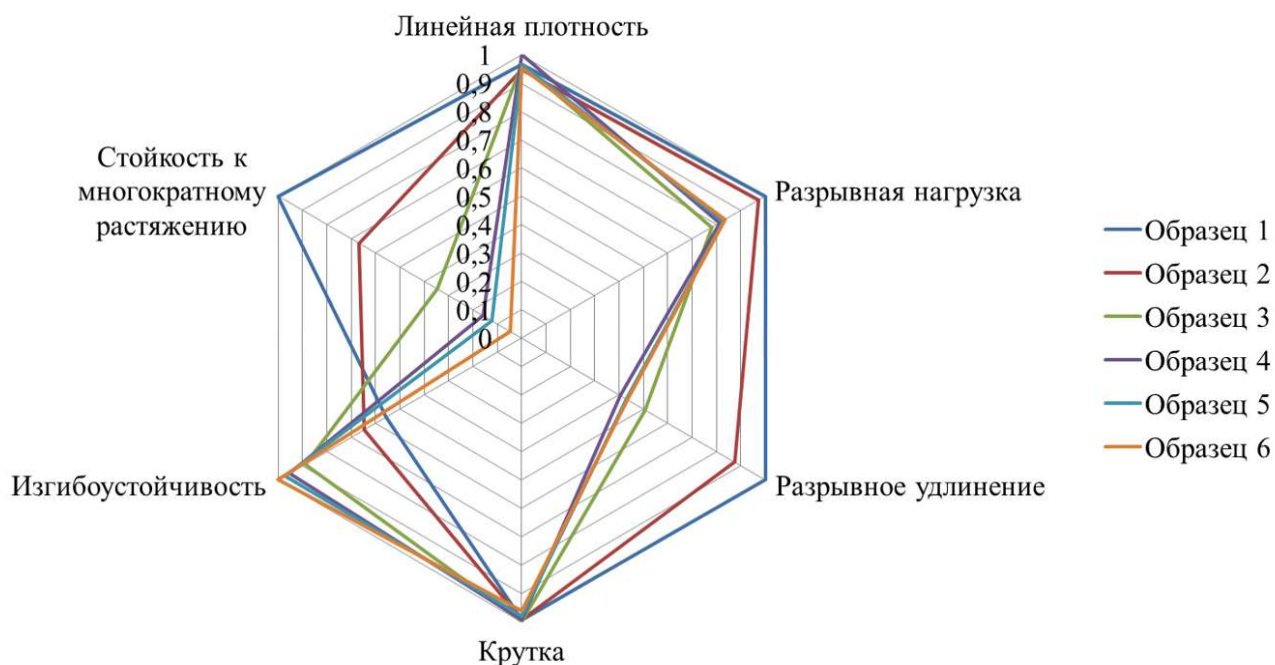


Рисунок 4.9. Диаграмма относительных показателей качества пряжи различного процентного содержания хлопковых и полиэфирных волокон [185]

Комплексная оценка проводилась путем сравнения площадей многогранника, построенного для каждого типа пряжи. Площадь каждого многоугольника складывается из площадей треугольников, образующих фигуру. Соответственно, чем больше площадь, тем образец лучше по совокупности свойств.

Площадь треугольника рассчитывалась по формуле Герона [158, 185]. Она позволяет вычислить площадь треугольника (S) по его сторонам a , b , c :

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (4.2),$$

где p – полупериметр треугольника:

$$p = \frac{a+b+c}{2}$$

Анализ полученных данных показывает, что использование химических волокон позволяет значительно повысить прочностные характеристики пряжи, однако увеличение процентного содержания полиэфирных волокон может привести к ухудшению гигиенических свойств рассматриваемых материалов [185].

4.3. Зависимость величины деформации от одноцикловых характеристик хлопчатобумажной пряжи

Для описания механических свойств текстильных материалов в большинстве случаев ограничивались установлением их разрывных характеристик, то есть доведения материалов до разрушения. Поскольку наиболее частым видом деформации текстильных материалов является их растяжение, в качестве таких характеристик чаще всего применяются разрывная нагрузка и удлинения при растяжении. Однако они не всегда являются исчерпывающими уже потому, что получаются в условиях резко отличных от тех, в которых обычно используются текстильные материалы, последним редко приходится работать при режиме, близком к разрушению. Как правило, в практике вслед за напряженным состоянием текстильных материалов, следует их отдых, а разрывные характеристики естественно не отражают поведение материалов в процессе последнего и не являются достаточно надежным мерилom долговечности материала [186].

Рассмотрим влияния величины приложенной нагрузки на величину и скорость процесса деформации нити. Для этой цели была использована хлопчатобумажная пряжа линейной плотности 25 текс с заправочным коэффициентом крутки α в интервале от 90 до 170, предварительная нагрузка варьировалась в интервале от 25 г до 125 г.

Общеизвестно, что деформация состоит из: упругой, эластической и пластической [168-171].

Различные составные части деформации пряжи определяются по формулам [187]:

– упругое удлинение:
$$E_y = \frac{l_1 - l_2}{L} 100\%;$$

- эластическое удлинение: $E_{\text{э}} = \frac{l_2 - l_3}{L} 100\%$;
- пластическое удлинение: $E_{\text{у}} = \frac{l_3 - l}{L} 100\%$;
- общее удлинение: $E_{\text{об}} = \frac{l_1 - L}{L} 100\%$,

где L – первоначальная зажимная длина пряжи,

l_1 – последний замер удлинения нагруженной пряжи,

l_2 – первый замер удлинения сразу после снятия нагрузки,

l_3 – последний замер удлинения разгруженной пряжи.

Для снятия показаний применялся пульсатор ПН-5.

В таблице 4.10 приведены составные части удлинения пряжи разной крутки при нагружении в течение 4 часов и времени отдыха 20 часов [186, 187].

Крутка варьировалась в интервале от 92 до 169 (коэффициент крутки), предварительная нагрузка составляла, 25, 75, 125 г.

Таблица 4.10. Составные части удлинения х/б пряжи разной крутки при нагружении в течение 4 часов и времени отдыха 20 часов [187]

Линейная плотность, текс	Коэффициент крутки	Нагрузка, г	Деформация		
			$E_{\text{у}}$	$E_{\text{э}}$	$E_{\text{п}}$
24,57	92	25	0,22	0,29	0,49
25,25	113	25	0,25	0,27	0,48
25,38	148	25	0,27	0,27	0,45
22,57	169	25	0,36	0,24	0,40
23,6	92	75	0,24	0,24	0,52
25,4	113	75	0,26	0,25	0,49
23,0	148	75	0,29	0,24	0,47
24,5	169	75	0,35	0,21	0,44
21,7	113	125	0,27	0,23	0,50
22,6	148	125	0,29	0,28	0,43
21,9	169	125	0,33	0,27	0,40

На рисунках 4.10-4.12 приведены составляющие части удлинения в зависимости от предварительной нагрузки.

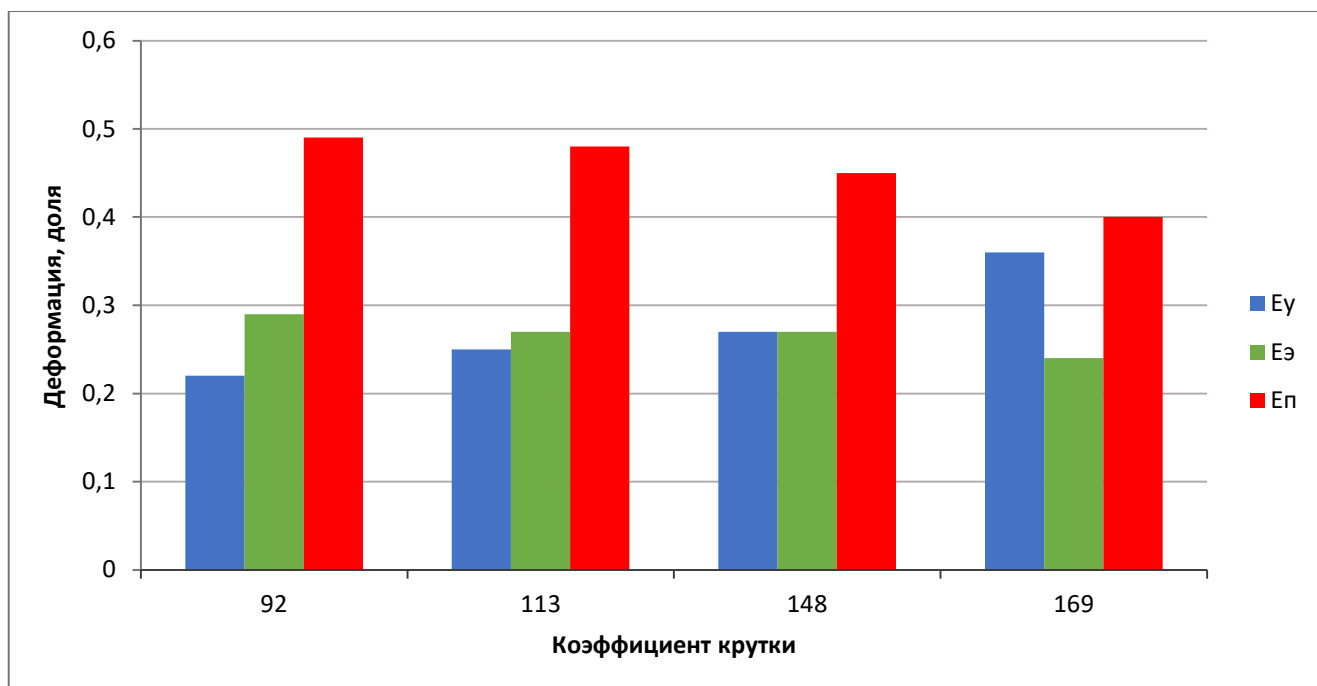


Рисунок 4.10. Диаграмма составных частей деформации в зависимости от коэффициента крутки при предварительной нагрузке 25 г [187]

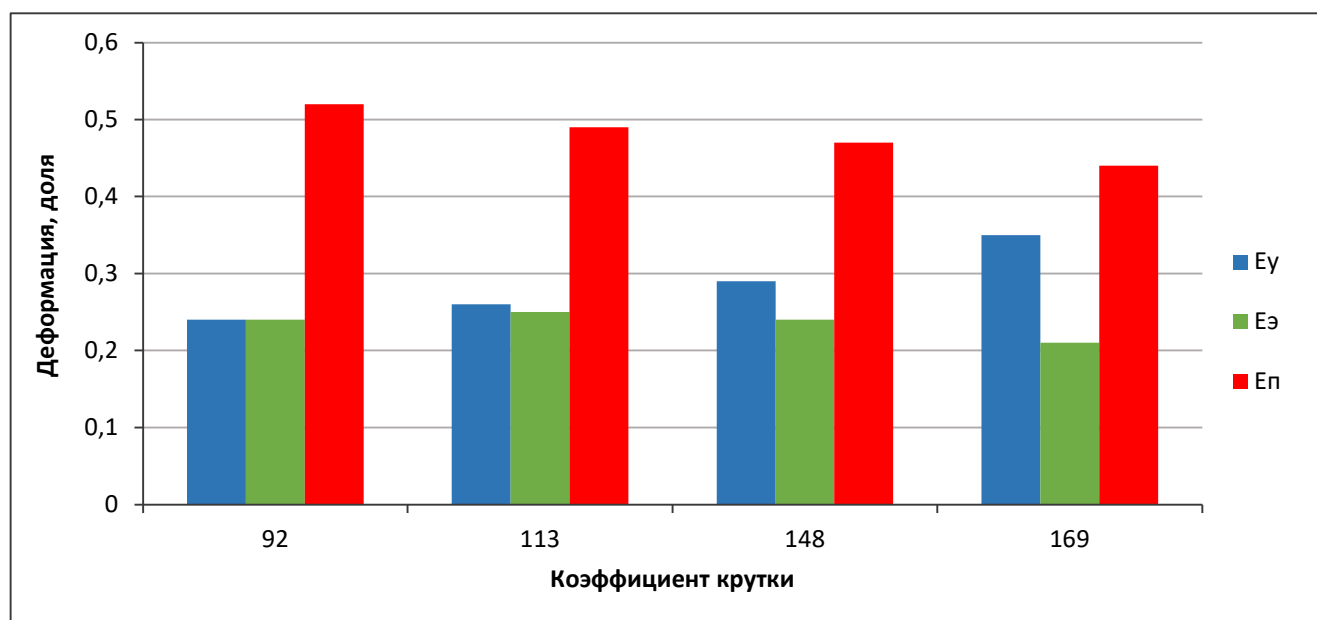


Рисунок 4.11. Диаграмма составных частей деформации в зависимости от коэффициента крутки при предварительной нагрузке 75 г [187]

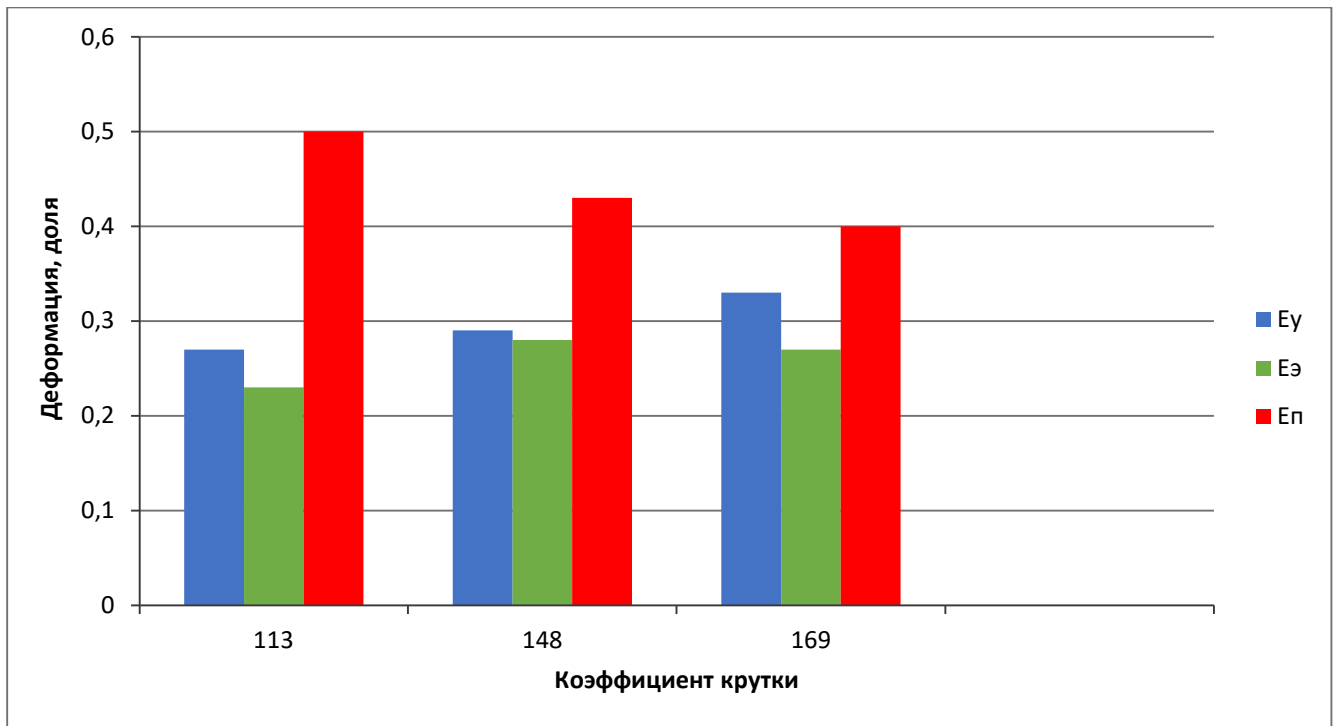


Рисунок 4.12. Диаграмма составных частей деформации в зависимости от коэффициента крутки при предварительной нагрузке 125 г [187]

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением коэффициента крутки пряжи при ее растяжении наблюдается рост упругой деформации, эластическая деформация изменяется незначительно, в то время как наблюдается снижение пластической деформации.

Увеличение упругого и эластического удлинений в пряже при значительном повышении крутки можно объяснить тем, что их величина в основном определяется упруго-эластическими свойствами самих волокон. Однако повышение крутки вызывает усиление межволоконистых связей и уменьшение скольжения волокон в пряже. Вследствие этого при снятии нагрузки и уменьшения длины волокон за счет исчезновения упругого и эластического удлинений происходит несколько более заметное обратимое укорочение более скрученной пряжи. Увеличение необратимой деформации при малых крутках и повышенной относительной нагрузке объясняется скольжением волокон вследствие уменьшения меж волоконистых связей, а при повышенных крутках большей спиральностью волокон и необратимым их распрямлением в начале растяжения [187].

Выше были рассмотрено поведение одноцикловых характеристик хлопчатобумажной пряжи при изменении крутки пряжи. В тоже время представляет интерес поведения хлопчатобумажной пряжи при варьировании относительной нагрузки и влажности.

В качестве объекта исследования была рассмотрена хлопчатобумажная пряжа линейной плотности 25 текс. В таблице 4.11 приведены основные структурные характеристики пряжи.

Таблица 4.11. Основные структурные характеристики пряжи линейной плотности 25 текс

№	Показатели	Значения
1	Линейная плотность, текс	25
2	Разрывная нагрузка, Н	2,87
3	Разрывное удлинение, %	5,5
4	Крутка, кр/м	768
5	Коэффициент крутки	122
6	Коэффициент вариации, %	
	– по линейной плотности	5,4
	– по разрывной нагрузке	11,6
	– по крутке	7,9

Исследования изменения величины деформации нитей в зависимости от величины начальной относительной нагрузки в долях от исходной величины проводились на приборе РМ-5 при относительной влажности 60%, время нагрузки и разгрузки составляло 240 мин [186, 187].

На рисунке 4.13 представлена диаграмма изменения значения полной деформации и ее составных частей. Как видно, на поведение рассматриваемой пряжи достаточно сильное влияние оказывает величина начальной нагрузки, что впоследствии может сказываться на процессе последующей переработки пряжи.

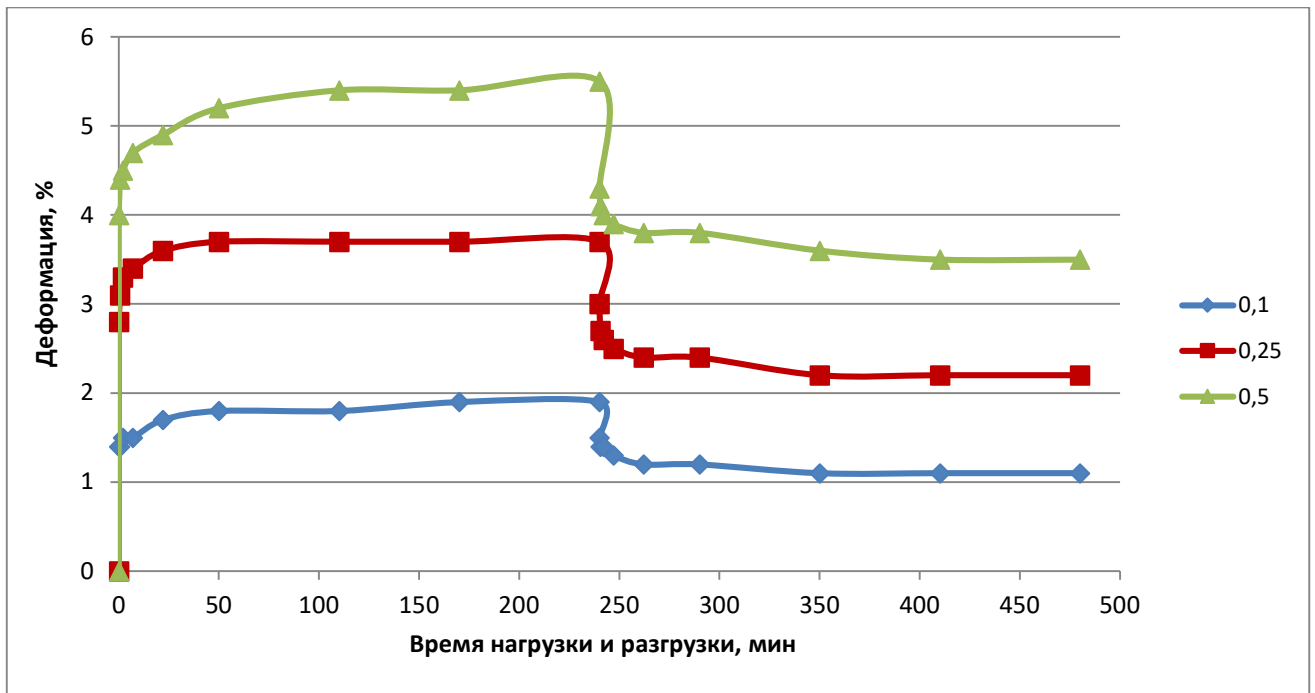


Рисунок 4.13. Диаграмма изменения значений полной деформации в зависимости от величины относительной нагрузки

Как видно из приведенных на рисунке 4.13 данных с возрастанием значения относительной нагрузки значительно возрастает величина деформации.

Также на показатели изменения деформационных свойств оказывает существенное влияние значение влажности рассматриваемого материала. Для этого были рассмотрены образцы с относительной влажностью 40, 65, 90% при относительной нагрузке в 1/2 от разрывной (рисунок 4.14) [187].

На рисунке 4.14 приведено изменение величины деформации от значения относительной влажности рассматриваемого материала. Анализ результатов показывает, что с увеличением влажности деформация возрастает, причем наибольшее изменение наблюдается при относительной влажности 90%, что приводит к ухудшению переработки пряжи [187].

Таким образом, при проведении исследований необходимо учитывать значения величины относительной нагрузки и относительной влажности.

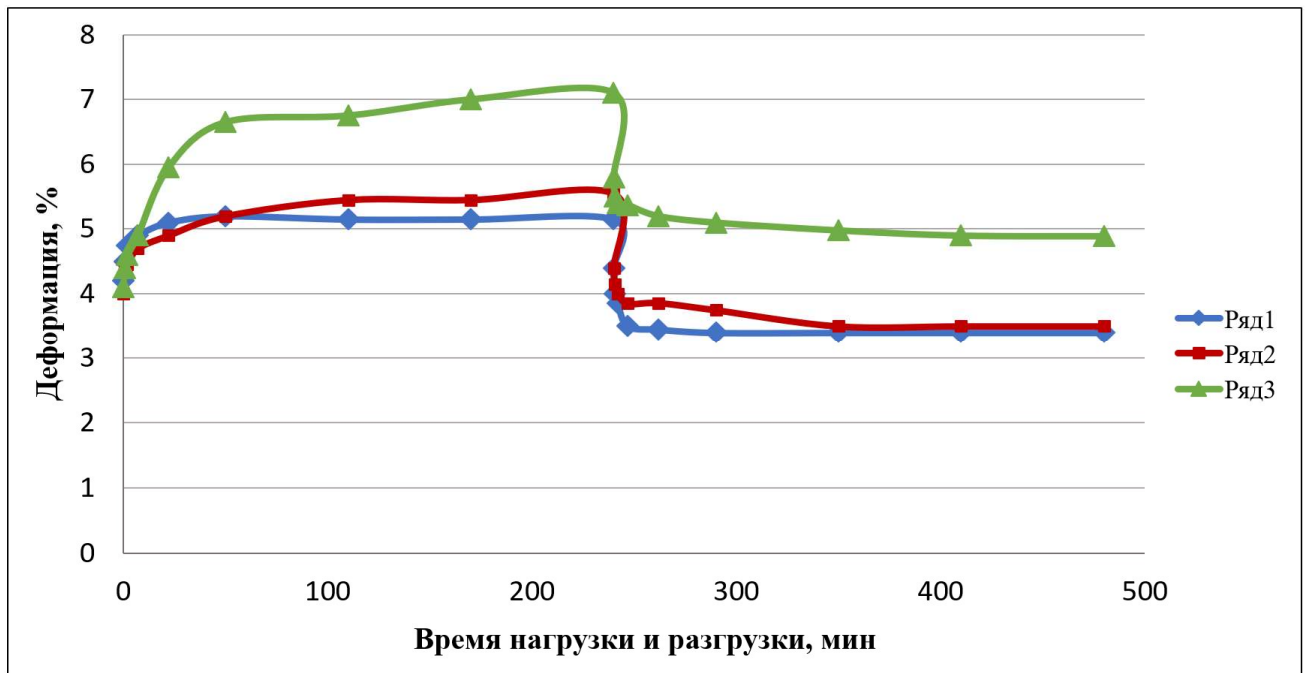


Рисунок 4.14. Диаграмма изменения значений полной деформации в зависимости от величины относительной влажности

4.4. Функциональная зависимость показателей физико-механических характеристик тканей от их сырьевого состава

Номенклатура показателей качества текстильных полотен подразделена на общие, обязательные для всех видов данных текстильных изделий, и дополнительные.

В таблице 4.12 приведена номенклатура общих показателей качества текстильных изделий, нормируемых стандартами [148].

Кроме показателей, приведенных в таблице 4.12, для некоторых текстильных изделий в качестве обязательных нормируют и некоторые другие.

Большое разнообразие показателей, по которым должно оцениваться качество текстильных изделий, с одной стороны, позволяет наиболее полно их характеризовать, а с другой – приводит к большим затратам материалов и времени, вносит дополнительные трудности в управление качеством продукции [141].

Таблица 4.12. Номенклатура общих показателей качества, характеризующие текстильные изделия [141]

Ткани и штучные изделия				Изделия трикотажные бытового назначения	Полотна нетканые текстильные
Хлопчатобумажные, смешанные	Льняные и полульняные	Чистошерстяные и полшерстяные	Натуральный шелк и смешанные		
Состав сырья, линейная плотность пряжи, плотность ткани, ширина ткани, поверхностная плотность ткани, разрывная нагрузка, устойчивость окраски, художественно-эстетические показатели	Состав сырья, вид и линейная плотность пряжи, структура нитей, плотность ткани, поверхностная плотность ткани, устойчивость окраски, содержание ап-прета, художественно-эстетические показатели	Состав сырья, плотность ткани, поверхностная плотность ткани, разрывная нагрузка, содержание остаточного жира, устойчивость окраски, художественно-эстетические показатели	Состав сырья, ширина ткани, поверхностная плотность ткани, плотность ткани, разрывная нагрузка, устойчивость окраски, художественно-эстетические показатели	Состав сырья, линейная плотность пряжи, плотность вязания, линейные размеры, прочность при разрыве, устойчивость окраски, художественно-эстетические показатели	Состав сырья, линейная плотность пряжи, ширина полотна, поверхностная плотность ткани, число петель на 100 мм

Поэтому для оценки свойств текстильных материалов необходимо более подробно рассмотреть влияние различного сырьевого состава на основные показатели текстильных полотен.

Так, например, В патенте [188] была успешно выполнена техническая задача по расширению ассортимента натуральных экологически чистых тканей с сохранением высоких потребительских и гигиенических свойств, а также повышением долговечности, прочности и других эксплуатационных характеристик. Для дости-

жения этой цели была использована пряжа из льняных и пеньковых волокон в качестве основных нитей, а также льняная и пеньковая пряжа в качестве уточных нитей в равных пропорциях. Ткань производится полотняным переплетением шириной 150 ± 2 см и имеет поверхностную плотность 180 ± 14 г/м², количество нитей на 10 см по основе 165 ± 3 и по утку 170 ± 4 , а также линейную плотность по основе и утку $56 \pm 2,8$ текс.

Исследование [189] показало, что идеальные условия для создания парашютной ткани на бесчелночных ткацких станках СТБ включают в себя следующее: натяжение основных нитей – 18сН, заступ в размере 9 мм. Путем установки оптимальных технологических параметров возможно производство парашютных тканей с минимальным риском обрыва основных нитей, не превышающим 0,08 обр/м, и процентом брака, который не превысит 0,07%.

Оптимальные параметры изготовления парашютной ткани, основанные на использовании современных информационных технологий, были определены в результате исследований, которые также учитывали влияние плотности ткани по утку и линейной плотности нитей на прочностные характеристики парашютной ткани и ее воздухопроницаемость [190].

Создан новый метод автоматизированного построения геометрических моделей тканей различных переплетений с использованием оптики. Разработан алгоритм для расчета параметров строения однослойных тканей, включающий определение геометрических плотностей тканей, размеров нитей основы и утка, высоты волн изгиба нитей, порядка фазы строения и других характеристик. Установлена специальная аппаратура для сканирования микросрезов, состоящая из оптического прибора, видеокамеры и микроскопической насадки. Разработано программное обеспечение для обработки полученных сканированных микросрезов, позволяющее создавать геометрические модели строения тканей различных переплетений [191].

Для теоретического расчета напряжений в нитях композитов с различной структурой намотки из стеклянных волокон учитывается тип намотки. При анализе напряжений важно учитывать взаимное расположение волокон в объеме готового композита. Для начала необходимо определить количество волокон в композите и степень замкнутости намотки перед проведением расчетов напряжений. [192].

Разработка экспериментальных образцов новых видов тканей для детской одежды осуществлялась на базе смешанной пряжи из шерстяного волокна с полиэфирным и вискозным волокном. Высокораствяжимая смешанная пряжа из этих же волокон включала высокоэластичную составляющую – полиуретановую нить «дорластан» [193].

В исследованиях [194-195] были изучены геометрические и математические модели, основанные на структурной механике, которые отображают реальную структуру пряжи. Расчеты были представлены для прочности пряжи с низкой линейной плотностью, созданной из тонких шерстяных волокон диаметром, не превышающим 18,5 мкм. Теория одноосного растяжения нити и пряжи была описана с учетом изменения диаметра и воздействия поперечных сил. Также был рассмотрен метод проектирования пряжи с учетом заданных характеристик волокон и структуры пряжи, применительно к пряже из чистой шерсти с линейной плотностью 15,6 текс.

В работе [196] дана характеристика чистошерстяных камвольных пряж малой линейной плотности и тканей. Производство камвольных тканей находится в процессе обновления и расширения ассортимента за счет использования различных видов волокон, пряжи и отделки. Для создания этих тканей применяют модифицированные химические волокна, фасонную пряжу, многоцветную меланжевую и мулинированную пряжу, добавляют козью шерсть. Ткани изготавливают из гребенной пряжи, состоящей из тонких, полутонких и полугрубых волокон, крученой по основе и утку разной толщины – от 19,2 текс х 2 до 140 текс х 2. В работе [196] проведен анализ чистошерстяных камвольных пряж и тканей малой линейной плотности.

Для производства камвольных полушерстяных тканей часто используют пряжу с синтетическими волокнами. Эта пряжа может быть двухкомпонентной с нитроновыми или полиэфирными волокнами, трехкомпонентной с нитроновыми и капроновыми волокнами или другими сочетаниями волокон. Гребенная крученая пряжа применяется для создания тканей с гладкой поверхностью и открытым рисунком переплетения. Также в процессе изготовления используется вискозная пряжа, скрученная с шерстью или другими смешанными волокнами.

Пальтовые ткани производятся из смеси текстурированной полиэфирной нити бэлан (до 80%) и метанита (до 17%). Среди них встречаются как платьевые, так и костюмные ткани, но основное предназначение – пальто.

В работе [197] изложены аспекты использования триаксиальных переплетений для изготовления бесшовных плетеных заготовок верха обуви.

С целью установления взаимосвязей между физико-механическими свойствами тканей необходимо изучение влияние волокнистого состава смеси на такие показатели как прочность, удлинение, устойчивость к многократным растяжениям, износостойкостью и другими показателями [198-208].

В качестве объектов исследования были взяты хлопко-вискозные и хлопко-полиэфирные ткани полотняного переплетения различного сырьевого состава [209, 210].

В таблице 4.13 приведены структурные и механические характеристики смесовых тканей, включающих хлопко-вискозную и хлопко-полиэфирную ткани. Для сравнения представлены характеристики с моно волокнистым составом.

Таблица 4.13 Структурные и механические характеристики тканей.

Сырьевой состав пряжи	Поверх- ностная плот- ность, г/м ²	Число нитей на 10 см		Разрывная нагрузка, Н		Удлинение, %	
		по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку
1	2	3	4	5	6	7	8
Ткань с разным составом хлопковых и вискозных волокон							
100% хлопка	125,7	250	196	44,2	30,6	12,3	7,6
87,5% хлопка + 12,5% вискозного волокна	122,1	251	201	40,8	30,3	11,7	8,0
67% хлопка + 33% вискозного волокна	117,6	255	205	40,3	26,5	11,5	9,2
100% вискозного во- локна	107,2	256	206	34,5	24,6	11,3	10,6
Ткань с разным составом хлопковых и полиэфирных волокон							
100% хлопка	100,7	333	286	45,6	29,3	13,7	10,5

Окончание Таблицы 4.13

1	2	3	4	5	6	7	8
67% хлопка + 33% полиэфирного волокна	102,8	337	282	46,7	33,4	11,8	11,2
43% хлопка + 57% полиэфирного волокна	107,0	337	282	47,3	35,2	14,3	10,9
33% хлопка + 67% полиэфирного волокна	108,2	340	278	48,1	37,0	16,3	11,4
18% хлопка + 82% полиэфирного волокна	101,5	339	276	52,1	41,4	22,7	17,6
100% полиэфирного волокна	102,7	341	276	56,1	45,0	25,3	20,6

Рассмотрим более подробно поведение рассматриваемых образцов тканей.

На рисунках 4.15-4.18 приведены диаграммы зависимостей разрывной нагрузки и разрывного удлинения рассматриваемых образцов тканей различного волокнистого состава по основе и утку.

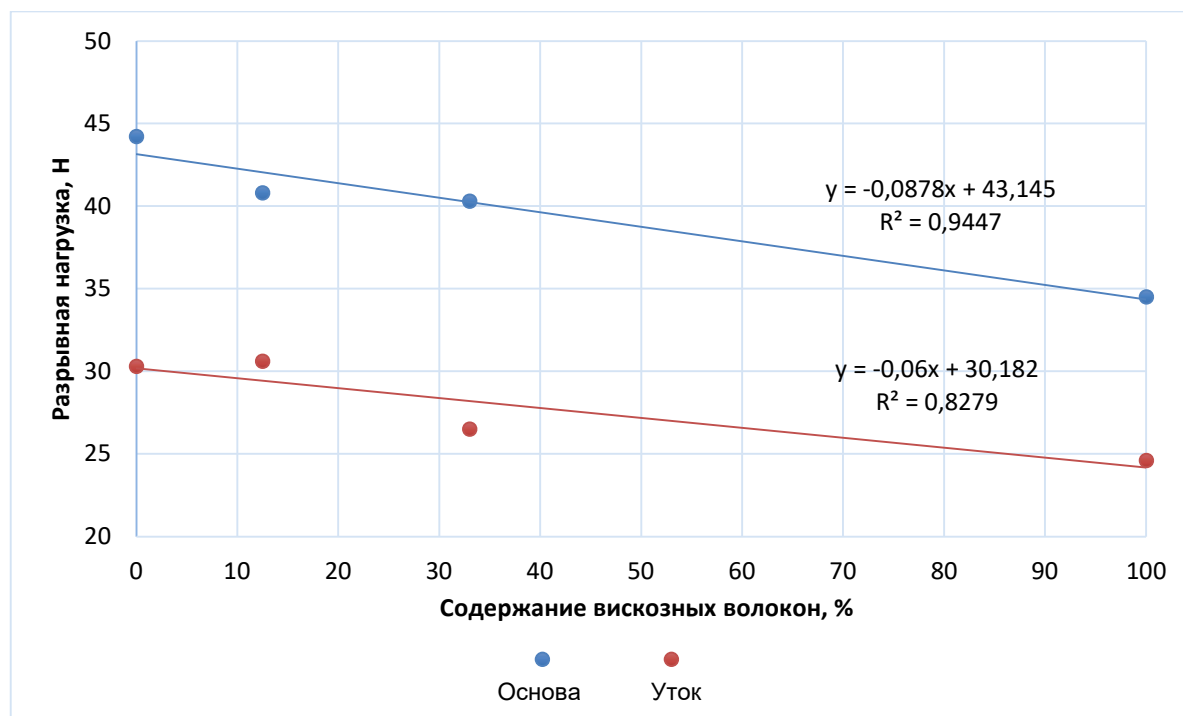


Рисунок 4.15. Зависимость разрывной нагрузки по основе и утку, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания ВИСКОЗНЫХ ВОЛОКОН

Анализ диаграмм, приведенных на рисунках 4.15-4.18 показывает, что процентное содержание натуральных и химических волокон значительно сказывается на механических свойствах тканей.

Наряду с этим было изучено влияние сырьевого состава, на ряд физико-механических свойств рассматриваемых тканей. К ним относятся изгибоустойчивость, несминаемость и устойчивость к истиранию.

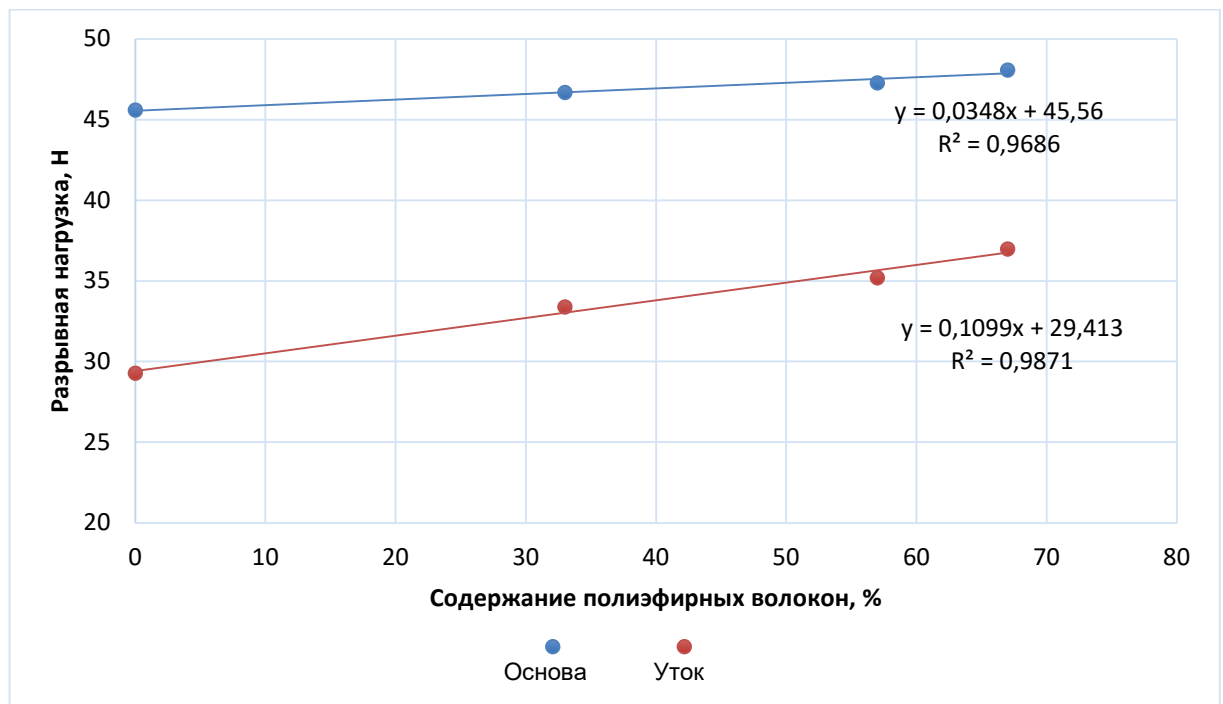


Рисунок 4.16. Зависимость разрывной нагрузки по основе и утку, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

В таблице 4.14 представлены данные влияния сырьевого состава на изгибоустойчивость, несминаемость и устойчивость к истиранию рассматриваемых материалов.

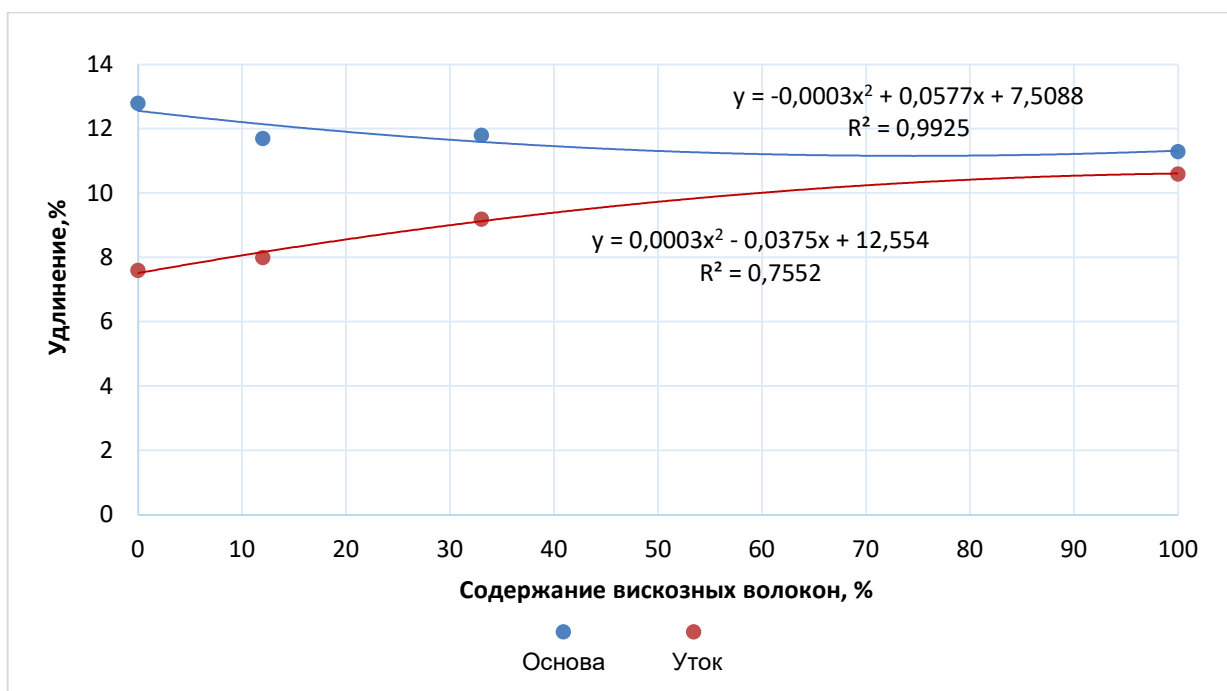


Рисунок 4.17. Зависимость разрывного удлинения по основе и утку, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания вискозных волокон

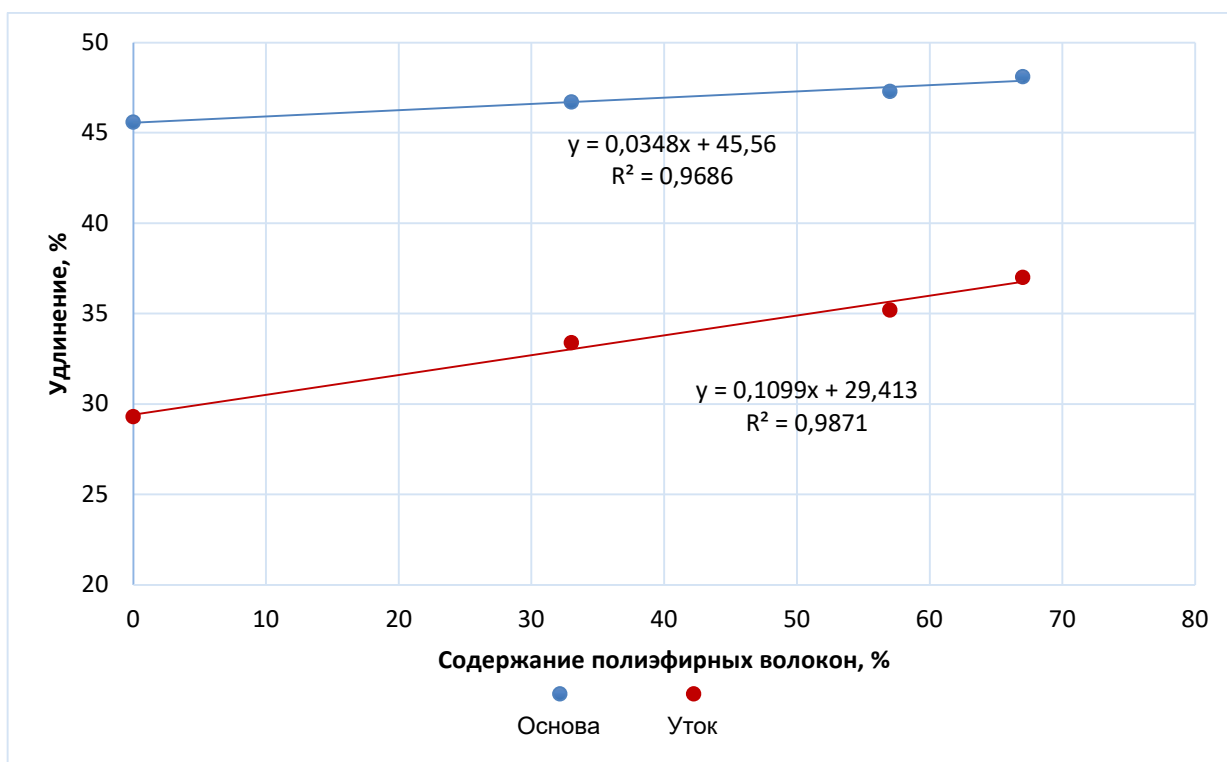


Рисунок 4.18. Зависимость разрывного удлинения по основе и утку, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

Таблица 4.14. Влияние сырьевого состава на физические свойства тканей

№	Сырьевой состав	Система нитей	Изгибо- устойчи- вость, тыс. цикл	Несми- нае- мость %	Стойкость к истиранию	
					число циклов	коэф. исти- рания
Ткань с разным составом 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
Ткань с разным составом хлопковых и полиэфирных волокон						
1	100% хлопка	основа уток	13,5 13,2	31,7	2587	0,43
2	67% хлопка + 33% полиэфирного волокна	основа уток	14,2 16,0	34,2	3619	0,82
3	43% хлопка + 57% полиэфирного волокна	основа уток	18,4 19,7	35,7	4642	0,87
4	33% хлопка + 67% полиэфирного волокна	основа уток	19,6 20,9	37,0	5369	1,21
5	18% хлопка + 82% полиэфирного волокна	основа уток	24,3 23,4	39,2	7178	1,23
6	100% полиэфирного волокна	основа уток	27,0 25,9	44,7	7793	1,28

На рисунках 4.19-4.24 приведены графики изменения изгибоустойчивости, несминаемости и устойчивости к истиранию тканей в зависимости от процентного содержания химических волокон.

Таким образом, была проведена сравнительная оценка смесовых хлопко-вискозных и хлопко-полиэфирных тканей, тканей из натуральной (хлопковых) и химических волокон, а также определено влияние различного процентного содержания химических волокон (вискозных и полиэфирных) на основные физико-механические свойства этих тканей, определяющие, во многом, их потребительские свойства.

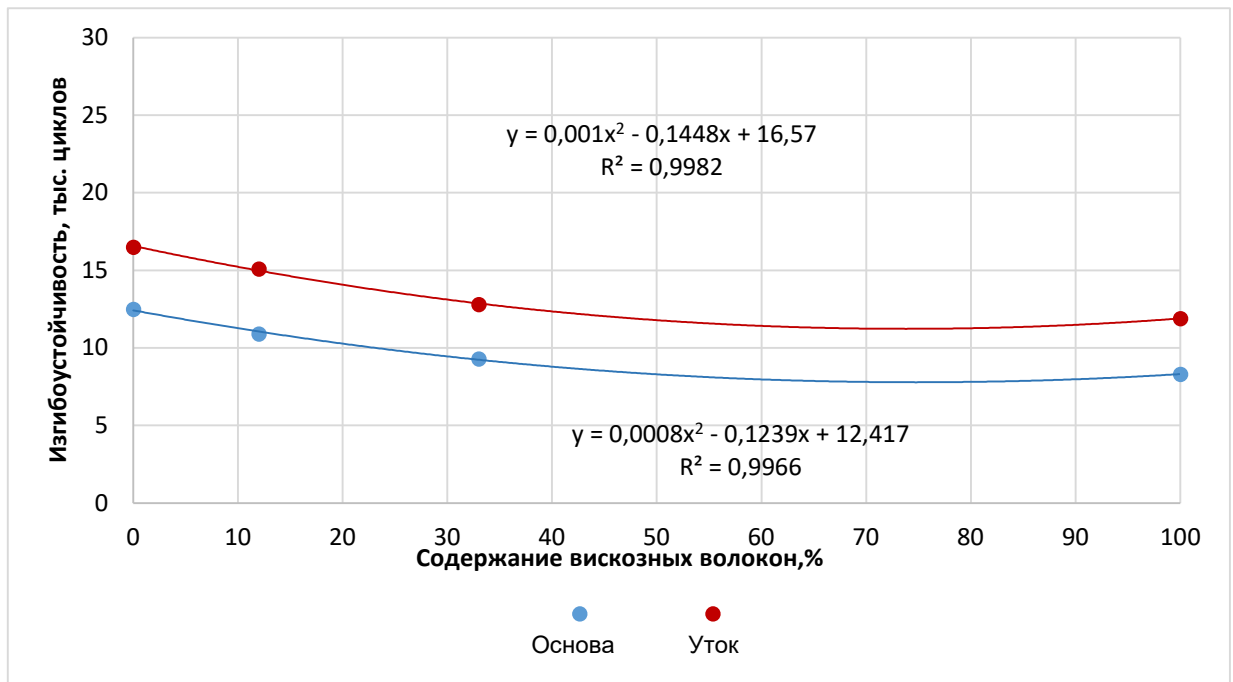


Рисунок 4.19. Зависимость изгибоустойчивости, рассматриваемых образцов ткани по основе и утку в зависимости от процентного содержания вискозных волокон

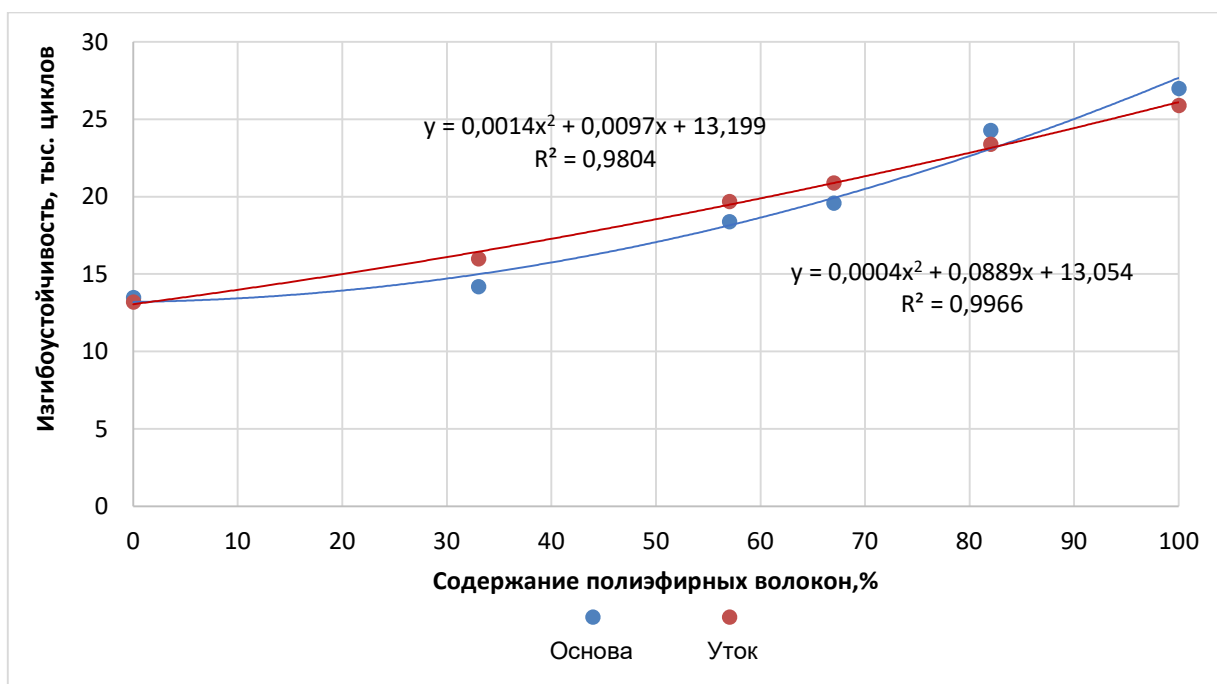


Рисунок 4.20. Зависимость изгибоустойчивости, рассматриваемых образцов ткани по основе и утку в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

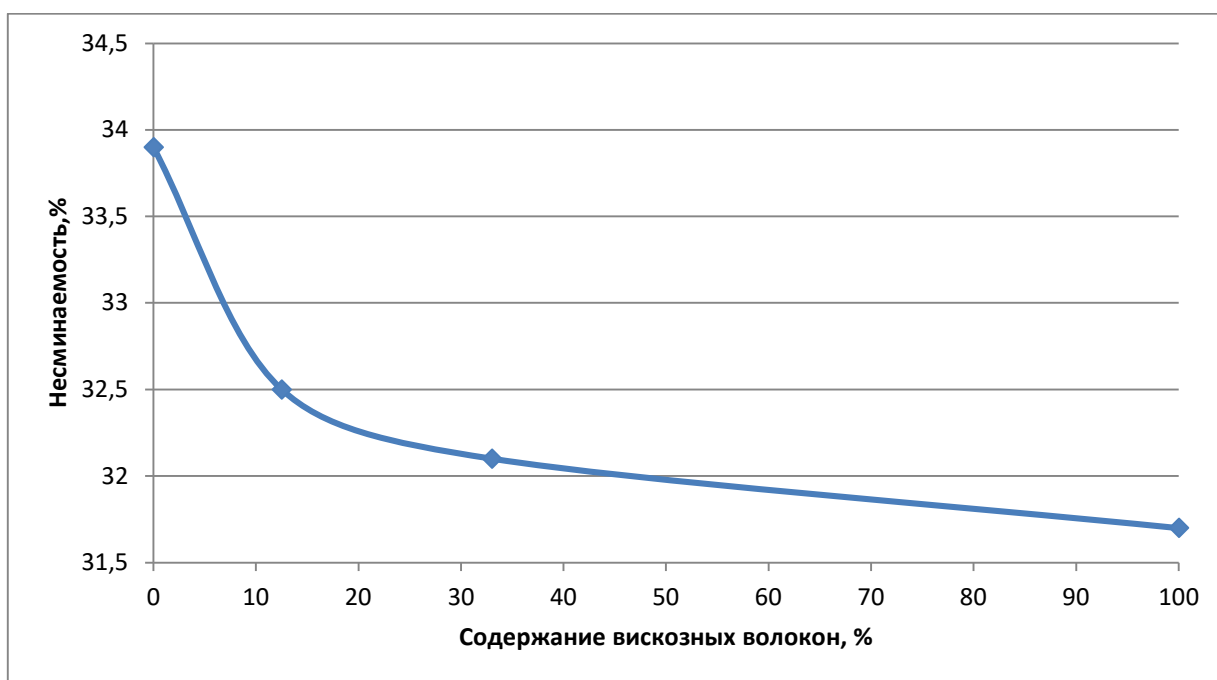


Рисунок 4.21. Зависимость несминаемости, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания вискозных волокон

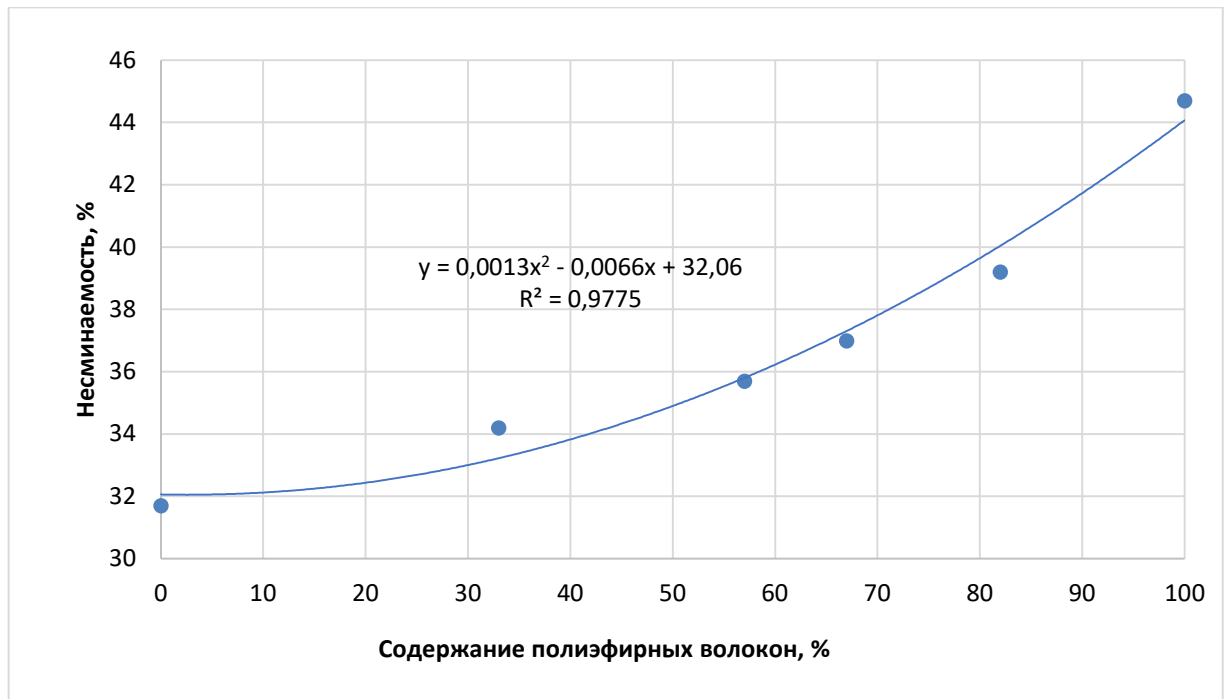


Рисунок 4.22. Зависимость несминаемости, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

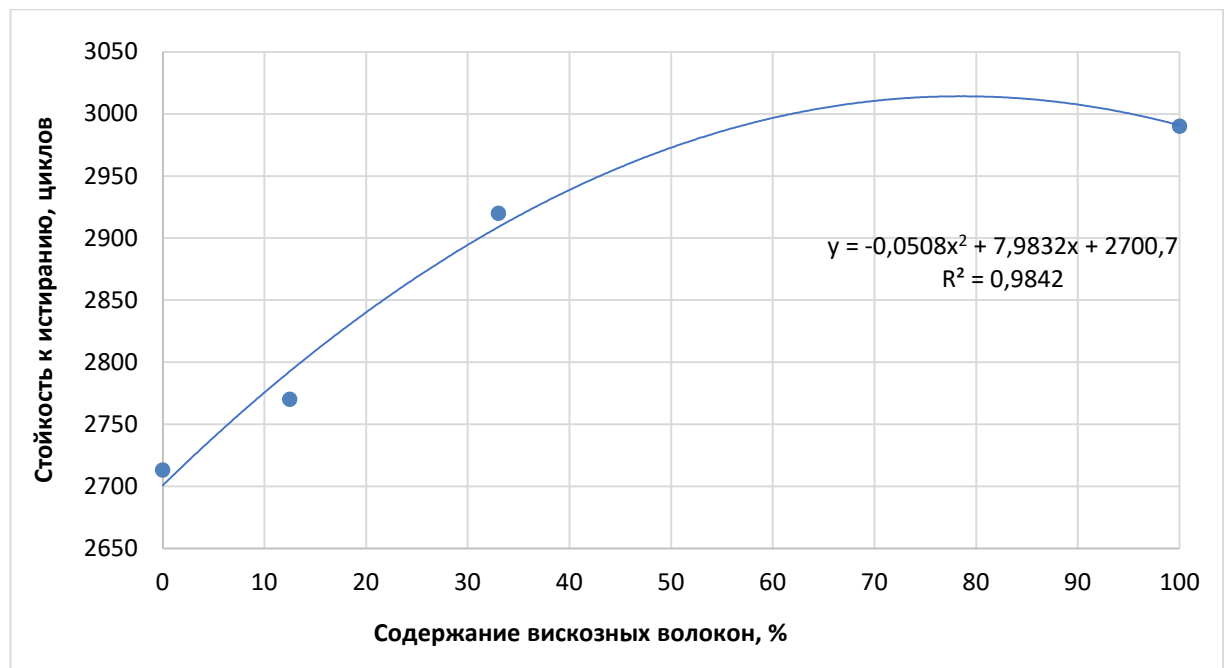


Рисунок 4.23. Зависимость стойкости к истиранию, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания вискозных волокон

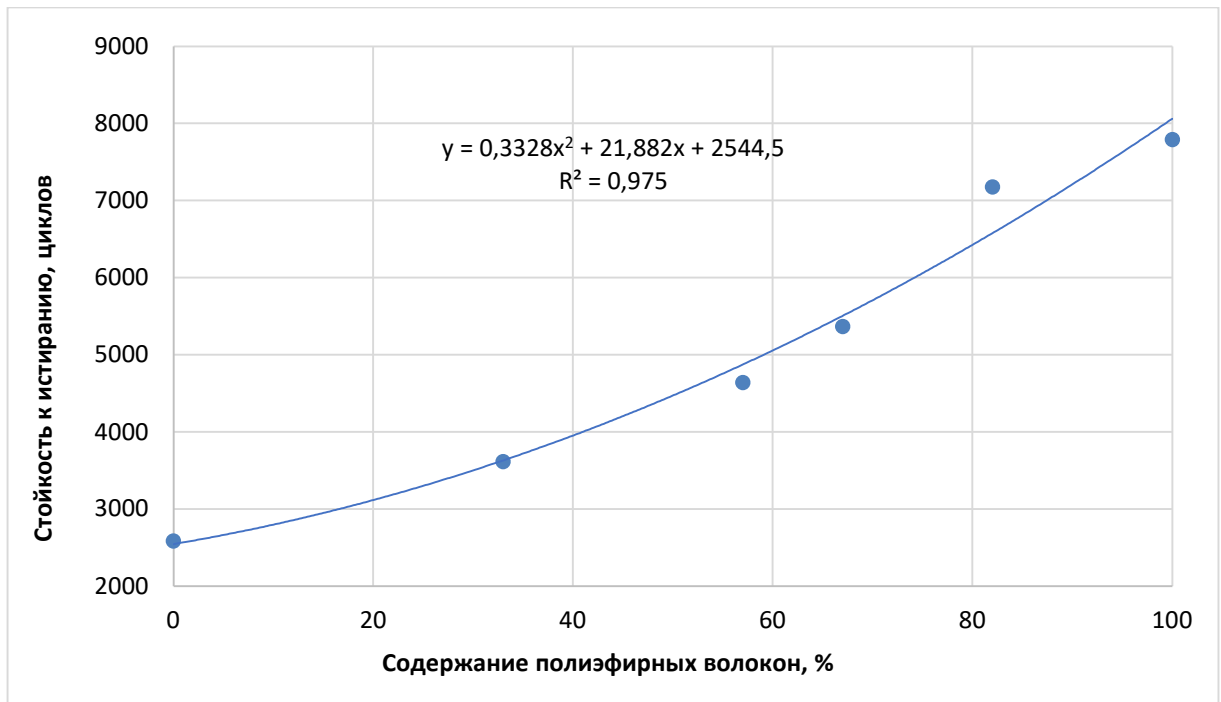


Рисунок 4.24. Зависимость стойкости к истиранию, рассматриваемых образцов ткани в зависимости от процентного содержания полиэфирных волокон

4.5. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопко-полиэфирной ткани

Выше было установлено, что на разрывную нагрузку ткани влияют различные факторы, такие как разрывная нагрузка пряжи, плотность нитей по основе и утку, ширина полосы ткани, а также процентное содержание хлопка и полиэфирного волокон. Необходимо отметить, что в связи с тем, что процентное содержание натуральных и химических волокон варьируется в широком пределе, необходимо учитывать исходную плотность самих волокон хлопка и полиэфира.

В качестве примера, для получения общей зависимости влияния различных факторов, на примере разрывной нагрузки ткани полотняного переплетения по основе, предлагается использовать теорию подобия и анализа размерностей [209].

Применим следующую функциональную зависимость:

$$Q_o = f(P_o, P_u, B, \rho_x, \rho_u, n_x, n_u) \quad (4.1),$$

где Q_o – разрывная нагрузка полосы ткани (по основе), Н;

P_o – разрывная нагрузка пряжи, Н;

P_o – плотность (количество) нитей по основе, нитей на 10 см;

B – ширина полосы ткани, 5 = см;

ρ_x, ρ_n – плотность хлопковых и полиэфирных волокон, 1,52 г/см³ и 1,38 г/см³ соответственно;

n_x, n_n – процентное содержание натуральных и химических волокон.

Именно эти факторы являются управляющими по отношению к строению ткани и определяют сущность строения и все его параметры. Эти же факторы являются объектами проектирования и заданными параметрами строения [167, 209].

В связи с тем, что используются два вида волокон: хлопок и полиэфирное волокно, необходимо учитывать процентное содержание каждого компонента, а также плотность этих волокон.

Представим полученную функциональную зависимость в виде:

$$Q_o = P_o P_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x}{A + B [(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x]} \quad (4.2).$$

Для решения поставленной задачи были проведены исследования поведения разрывной нагрузки хлопко-полиэфирной ткани различного волокнистого состава в сравнении с характеристиками тканей с моно волокнистым составом. Результаты приведены в таблице 4.15.

Исходя из предложенной функциональной зависимости (4.2) и расчетных значений из таблицы 4.15 была полученная зависимость:

$$Q_o = P_o P_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x}{54,86 \cdot [(\rho_x n_x \cdot \rho_n n_n) / \rho_x] - 43,88} \quad (4.3).$$

Сравнительный расчет между полученной расчетной зависимостью разрывной нагрузкой ткани и фактическими значениями показал, что погрешность не превышает 6%, что является вполне достаточной для определения прогнозирования поведения рассматриваемых текстильных материалов.

Таблица 4.15. Данные для расчета разрывной нагрузки ткани

Про- центное содер- жание поли- эфира	Разрыв- ная нагрузка ткани Q_o , Н	Разрыв- ная нагрузка пряжи P_o , Н	Поверх- ностная плот- ность, 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

Выводы по главе 4

1. Проведен системно-функциональный анализ влияния различных факторов на физико-механические свойства смесовой хлопко-полиэфирной и хлопко-вискозной пряжи различного содержания натуральных и химических волокон.

2. 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.

3. Получены функциональные зависимости, характеризующие изменение разрывной нагрузки хлопко-вискозной и хлопко-полиэфирной пряжи от процентного содержания натуральных и химических волокон, что позволяет выбрать наиболее оптимальные условия ее получения. Установлено, что изгибоустойчивость у хлопко-полиэфирной пряжи выше, чем у хлопко-вискозной.

4. Предложено использовать комплексную оценку качества смешанной пряжи, которая включает в себя разрывную нагрузку, разрывное удлинение, изгибоустойчивость, многократное растяжение.

5. Рассмотрено как влияет начальная нагрузка в интервале от 25 до 125 г, коэффициент крутки в интервале от 92 до 169 и влажность материала в интервале от 30 до 90% на деформационные свойства хлопчатобумажной пряжи [209, 210].

6. 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.

7. Рассмотрены функциональные зависимости поведения основных физико-механических характеристик смешанной хлопко-вискозной и хлопко-полиэфирной ткани полотняного переплетения от различного процентного содержания натуральных и химических волокон.

8. Установлено, что увеличение содержания полиэфирных волокон в ткани ведет к повышению механических характеристик рассматриваемых материалов, в отличие от вискозных.

9. С применением теории подобия и анализа размерностей решена задача определения функциональной зависимости разрывной нагрузки изучаемой ткани от таких показателей, как разрывная нагрузка пряжи, плотность нитей по основе, а также от процентного содержания натуральных и химических волокон.

10. Получена и представлена формула, позволяющая прогнозировать разрывную нагрузку хлопко-полиэфирной ткани:

$$Q_o = P_o \Pi_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_l n_l) / \rho_x}{54,86 \cdot [(\rho_x n_x \cdot \rho_l n_l) / \rho_x]^{-4,88}}$$

Отклонение расчетных значений относительно фактических не превышает 8%.

ГЛАВА 5. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Виды моделей деформации

Для полной реализации, внедрения и масштабирования поставленной задачи необходимо осуществить правильный выбор математического аппарата, позволяющий объединить разрозненные полученные результаты в единую модель. Исторический обзор и основные особенности математических моделей деформации, в том числе, и применявшихся для моделирования текстильных нитей, и полотен, приведены в главе 1.

В настоящее время существует достаточно большое число моделей, описывающих упругие свойства различных материалов. Эти модели позволяют нам лучше понять и предсказать поведение рассматриваемых материалов в тех или других условиях эксплуатации. Они могут быть применены для изучения поведения текстильных материалов при воздействии различных факторов.

Остановимся на наиболее значимых моделях и исследуем их особенности при применении этих моделей для волокнистых материалов.

Классические модели одномерной деформации

Одномерным называют образец материала, у которого одно измерение – длина – на много порядков больше двух других измерений. Один образец такого рода назовём волокном. Образец из нескольких волокон, так или иначе связанных между собой и расположенных параллельно или почти параллельно друг другу, будем называть одномерным волокнистым материалом [211].

Примерами такого одномерного волокнистого материала являются: натуральные или полученные химическим путем волокна; металлическая проволока; текстильная волокнистая лента, ровница, пряжа, крученая пряжа, нитка; элементарная нить, филамент, жгут из элементарных нитей и т.п.

Ключевая особенность одномерного волокнистого материала: его сопротивление удлинению вдоль длины материала настолько превосходит сопротивление деформации в поперечных направлениях и изгибу, что это позволяет рассматривать поведение волокнистого материала только под действием таких удлиняющих нагрузок, и считать, что другим видам нагрузки этот материал не сопротивляется.

Моделью деформации принято называть зависимость между механическим напряжением σ и относительной деформацией ε материала в некотором физически малом объеме материала. Для одномерного материала – это зависимость между двумя скалярными величинами σ и ε . Зависимости у разных материалов отличаются не только параметрами, но и аналитической природой: одни зависимости – это выражаются через элементарные функции, другие – дифференциальными или интегральными операторами. В одних зависимостях отсутствует время как фактор влияния, в других время является важнейшим фактором, определяющим деформацию. Модели принято отображать алгебраически, графически или в виде так называемых физических моделей, состоящих, как правило, из простых механических элементов.

В достаточно общем виде эту зависимость можно представить в виде:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \varepsilon', \dots, \varepsilon^{(n)}, p, t) \quad (5.1).$$

Здесь $\varepsilon, \varepsilon', \dots, \varepsilon^{(n)}$ – относительная деформация и ее производные по времени разных порядков, p – совокупность параметров. Зависимость, как правило, допускает обращение и представление в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma, \sigma', \dots, \sigma^{(n)}, p, t) \quad (5.2).$$

Зависимости (5.1) и (5.2), отображающие реакцию материала на внешние механические нагрузки, которые вызывают напряжения в материале и, как их следствие, деформацию, как правило, имеют общее свойство: при отсутствии нагрузок механические напряжения и, соответственно, деформация, в материале также отсутствуют. Существуют материалы, например, предварительно напряженный железобетон, у которых это свойство отсутствует, но это специфические материалы,

которые далее не рассматриваются.

Если материал реагирует на нагрузку своей деформацией немедленно и в полной мере, то в приведенных зависимостях время t отсутствует. Соответственно, отсутствуют и производные по времени. Зависимости (5.1) и (5.2) упрощаются:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, p) \quad (5.3)$$

и

$$\varepsilon = \varepsilon(\sigma, p) \quad (5.4).$$

Модель Гука. Исторически первой и простейшей математической моделью зависимости (5.3) или (5.4) явилась модель Гука [25]. Она получается, если допустить, что (5.4) допускает разложение в степенной ряд Маклорена, от которого с учетом отмеченного выше свойства сохраняют слагаемое 1-го порядка по ε :

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma(0) + \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} \cdot \varepsilon + o(\varepsilon) = E \cdot \varepsilon \quad (5.5)$$

Коэффициент пропорциональности E называют модулем упругости, или модулем Юнга. Обратная зависимость (5.5) в этом случае имеет вид:

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} \quad (5.6).$$

Эта модель линейной, абсолютно упругой деформации означает, что материал деформируется немедленно при возникновении в нем механического напряжения, причем величина деформации прямо пропорциональна напряжению. Эта деформация полностью обратима: при исчезновении (снятии) напряжения деформация исчезает безо всяких последствий для материала.

Модель Гука симметрична относительно знака (направления) деформации: при удлинении или при сжатии одной и той же нагрузкой деформация материала будет одна и та же по величине, но противоположна по знаку.

Потенциальная энергия $\Pi(\varepsilon)$, накапливаемая в материале вследствие деформации, равна работе, совершаемой силами нагрузки по деформации материала и

для дифференциально малого, так называемого элементарного, объема материала $dV = dx dy dz$ выражается интегралом от напряжения по деформации от начала приложения нагрузки до достижения конечной нагрузки и соответствующей ей деформации:

$$P(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{E \cdot \varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (5.7).$$

Нелинейные модели упругой деформации

Обобщением модели Гука является модель нелинейной упругой деформации [24-26]. В этой модели зависимость между механическим напряжением, действующим в единице объема, и относительной деформацией материала вдоль направления действия напряжения выражается нелинейной функцией $\sigma = \sigma(\varepsilon, p)$.

Алгебраически эта функция может быть полиномом по степеням деформации, дробно-полиномиальной функцией или алгебраической комбинацией трансцендентных функций. Любая из этих функций является эмпирической. Ее параметры подбирают исходя из трех условий:

- 1) количество параметров должно быть минимально возможным;
- 2) модельная зависимость должна наилучшим образом описывать имеющиеся результаты экспериментов с моделируемым материалом;
- 3) желательно, чтобы параметры модели имели наглядную физическую интерпретацию.

Ниже приведены указанные выше три вида модельных зависимостей. Полиномиальная модель:

$$\sigma(\varepsilon) = \sum_{k=1}^n p_k \cdot \varepsilon^k \quad (5.8).$$

В этой формуле n – старшая степень полинома. Количество параметров, используемых в модели, равно n .

Дробно-полиномиальная модель:

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{\sum_{k=1}^n p_{m+k} \cdot \varepsilon^k}{\sum_{j=0}^m p_j \cdot \varepsilon^j} \quad (5.9).$$

В этой формуле m и n – старшие степени полиномов знаменателя и числителя дробно-полиномиального выражения. Общее количество параметров модели при выбранных значениях m и n равно $m + n + 1$.

Трансцендентная модель:

$$\sigma(\varepsilon) = \sum_{k=1}^n \Psi_k(p_k \cdot \varepsilon) \quad (5.10).$$

В этой формуле n – количество трансцендентных функций $\Psi(p_k \cdot \varepsilon)$ со своими параметрами p_k , включаемых в модель. В качестве таких трансцендентных функций используют чаще всего экспоненциальные или логарифмические функции. Включение в модель трансцендентных функций обычно позволяет уменьшить количество параметров модели.

В качестве значений параметров модели используют их оценки по результатам экспериментов путем минимизации некоторого критерия качества оценивания. Поскольку для получения оценок используют численные методы и программные компьютерные процедуры, то классический метод наименьших квадратов со всеми своими аналитическими ограничениями все чаще заменяют альтернативными робастными критериями.

Как известно, робастными называют критерии или оценки, свойства которых не зависят или слабо зависят от исходных предположений, например, от закона распределения той величины, для которой используется критерий или получена оценка.

Линейная модель вязкости Ньютона

Вязкие материалы обладают свойством пластичности. Пластичность материала означает, что после снятия нагрузки и исчезновения механического напряжения в материале остается полностью или частично деформация, развившаяся в нем под

действием напряжения. Во многих случаях необходимо учесть развитие деформации в материале во времени. Это означает необходимость включения в модель фактора времени. Простейшей моделью такого рода является модель линейного, абсолютно вязкого материала. По-видимому, первой моделью пластической деформации является линейная модель вязкого материала, предложенная И. Ньютоном.

Эта модель описывается выражением:

$$\sigma(\varepsilon) = b \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (5.11).$$

Согласно этой модели, напряжение в материале пропорционально не самой деформации, а скорости ее нарастания. Обратная зависимость имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{b} \cdot \int_0^t \sigma(t) dt + \varepsilon(t = 0) \quad (5.12).$$

В соответствии с этой моделью величина деформации материала на момент времени t пропорциональна интегральному эффекту действия напряжения в материале за весь рассматриваемый интервал времени от нуля до t . При этом накопление этого эффекта начинается с начальной, уже имеющейся у материала деформации на момент $t = 0$.

Параметр $\eta = 1/b$ называют коэффициентом текучести материала, а сам процесс нарастания деформации материала при неизменном напряжении – эффектом текучести материала. Чем больше коэффициент текучести, тем быстрее «течет» материал, т.е. тем больше скорость нарастания деформации.

Поскольку при снятии нагрузки и исчезновении напряжения деформация в материале согласно модели Ньютона, остается на достигнутом к этому моменту уровне, без какого бы то ни было снятия деформации и, хотя бы частичного восстановления исходного состояния материала, то эта модель может быть использована для описания абсолютно пластичного материала.

Модель «идеальной» пластичности Сен-Венана

Сен-Венан и Кулон [212] предложили математическую модель пластичного материала, основанную на представлениях о механизме сухого трения – так называемое идеально пластическое тело Сен-Венана-Кулона [25]. Элемент материала представляется состоящим из двух частей. Одна часть при деформации элемента остается неподвижной, а вторая может смещаться, сдвигаться относительно первой. Части взаимодействуют между собой благодаря силам так называемого сухого трения.

Деформацию элемента материала под действием нагрузки представляют, как сдвиг одной части элемента относительно другой, остающейся неподвижной, части. Сдвиг происходит по закону сухого трения Амонтона-Кулона: пока сила смещения не превосходит максимальной силы трения, возможной между частями элемента материала, взаимного перемещения этих частей не происходит, и деформация отсутствует [213].

Как только сила смещения достигает максимальной силы трения между частями элемента материала, та часть, к которой приложена сила смещения, т.е. деформирующая материал нагрузка, начинает смещаться относительно другой части элемента. Поскольку суммарная сила, действующая на подвижную часть элемента, равна нулю (смещающая сила внешней нагрузки равна максимальной силе трения), смещающаяся часть элемента движется с постоянной скоростью, т.е. скорость деформации постоянна, а сама деформация нарастает неограниченно.

Для математического описания модели необходимы, как минимум, два параметра: σ_m – минимальное напряжение, при котором части элемента остаются неподвижными относительно друг друга, и v – скорость деформации, которую развивает скользящая часть элемента [213].

Аналитически модель может быть описана соотношениями:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \begin{cases} 0 \text{ и } \varepsilon(t) = 0, & \text{при } |\sigma| \leq \sigma_m \\ v \cdot \text{sign}(\sigma), & \text{при } |\sigma| > \sigma_m \end{cases} \quad (5.13).$$

Эта формула отображает аналитически описанный выше механизм деформации: пока действующее в элементе механическое напряжение не превосходит некоторого, характерного для данного материала, предела σ_m , и деформация, и ее скорость равны нулю [213].

Если напряжение превысило предельно допустимую величину, скорость деформации сразу приобретает конечное постоянное значение, которое остается неизменным по мере развития деформации, т.е. не зависит от напряжения в материале.

Знак скорости деформации зависит от знака механического напряжения, что учитывается включением в формулу функции знака [213]:

$$\text{sign}(z) = \begin{cases} -1, & z < 0 \\ 0, & z = 0 \\ +1, & z > 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Описанную выше «классическую» модель Сен-Венана иногда обобщают. Согласно теории сухого трения Амонтона-Кулона максимальная сила трения при скольжении частей элемента σ_v у большинства материалов меньше, чем максимальная сила трения покоя $\sigma_v < \sigma_m$, при которой происходит переход от взаимно неподвижного состояния частей элемента материала к их взаимному перемещению, которое и представляется как деформация.

Величина σ_v зависит от скорости деформации: чем выше, в определенных пределах, скорость деформации, тем меньше σ_v . Необходимость учета или игнорирования этой особенности в модели зависит от материала и решаемой задачи [213].

Многоэлементные модели деформации

Комбинируя описанные выше модели Гука, Ньютона и Сен-Венана и объединяя их разными способами и в разном количестве, получают математические модели, которые в большинстве случаев оказываются достаточными для адекватного описания результатов тех экспериментов, которые проводят для исследования механических свойств материалов и их деформации.

Наиболее известные двухэлементные модели Максвелла, Кельвина-Фойгта и их обобщения на трехэлементные и многоэлементные модели хорошо известны и широко используются для описания реологических свойств материалов, т.е., способность их к деформированию [214-217].

Для наглядного отображения этих моделей, как известно, используют механические аналогии. Модель Гука изображают пружиной (рисунок 5.1, *а*), модель Ньютона изображают демпфером (рисунок 5.1, *б*), модель Сен-Венана изображают элементом трения (рисунок 5.1, *в*).

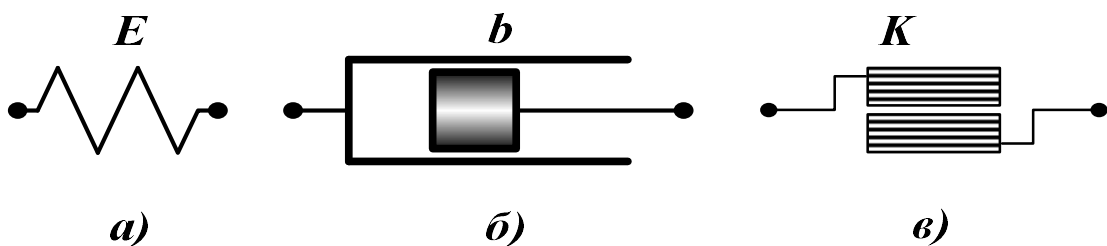


Рисунок 5.1. Механические аналогии упругой, линейной вязкой моделей деформации и модели Сен-Венана.

Двухэлементной модели Кельвина-Фойгта соответствует механический аналог, показанный на рисунке 5.2.

Двухэлементной модели Максвелла соответствует механический аналог, показанный на рисунке 5.3.

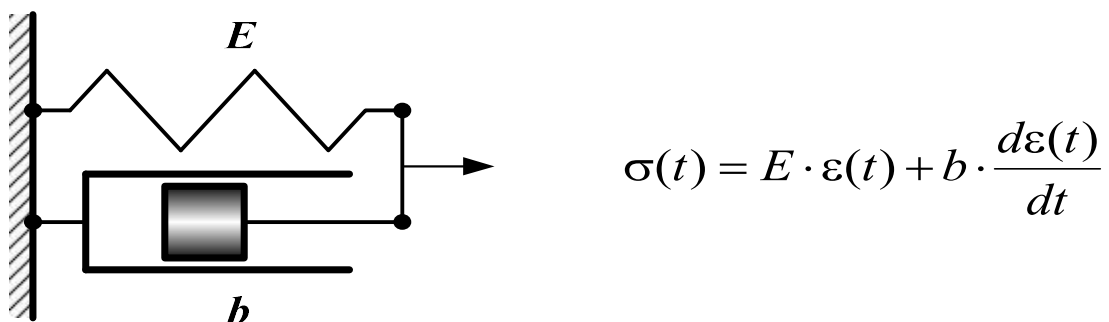


Рисунок 5.2. Механический аналог модели Кельвина-Фойгта

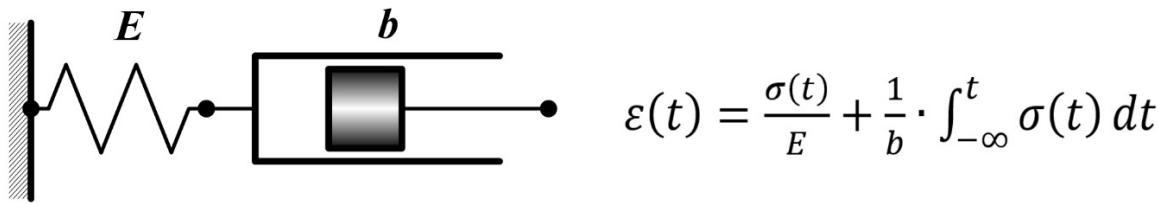


Рисунок 5.3. Механический аналог модели Максвелла

5.2. Особенности использования классических моделей деформации для описания свойств волокнистых материалов

Специфика волокнистых материалов (т.е. материалов, образованных природными и искусственного происхождения волокнами и нитями), применяемых для производства множества различных изделий, заключается в особенностях свойств этих волокон и нитей. Эти особенности состоят в широком (для натуральных волокон и нитей, например, хлопка, шерсти, льна, шелка) и более ограниченном (для искусственных и синтетических, химических волокон и нитей), однако существующем статистическом разбросе практически всех характеристик в пределах даже одной партии волокнистого материала: длины, тонины, формы поперечного сечения, разрывной нагрузки и разрывного удлинения, состояния поверхности и, как следствие, показателей цепкости и трения, извитости, упругости, и др.

Эти вероятностные вариации связаны с происхождением продукта – волокон и нитей – и не могут быть исключены какими-либо специальными методами обработки. Величина вариаций (от долей процента до десятков процентов по величине коэффициента вариации), по-видимому, превышает аналогичные характеристики вариаций у других материалов. Во всяком случае, в источниках практически отсутствует информация о влиянии этих вариаций на результаты использования классических моделей в приложениях.

Заметим, что указанные выше случайные вариации характеристик волокон и

нитей отображаются в моделях в вариациях их параметров, которые обычно оцениваются по результатам экспериментов с отдельными образцами.

Поэтому одной из целей работы явилось исследование особенностей поведения некоторых классических деформации при случайных вариациях их параметров. В частности, весьма важно установить пределы робастности (т.е. нечувствительности, устойчивости к вариациям) моделей к вариациям параметров. Решению этих задач и посвящены следующие разделы работы.

Модель Кельвина-Фойгта и ее статистические особенности

Модель Кельвина-Фойгта удобнее всего описать передаточной функцией для изображений по Лапласу функций напряжения $\sigma(t)$ и деформации $\varepsilon(t)$. Эта передаточная функция равна:

$$H(s) = \frac{\tilde{\varepsilon}(s)}{\tilde{\sigma}(s)} = \frac{1}{E + b \cdot s} = \frac{1}{E} \cdot \frac{1}{T \cdot s + 1}, T = \frac{b}{E} \quad (5.15)$$

Параметр T , заменивший коэффициент вязкого трения b , имеет размерность времени и определяет продолжительность нарастания деформации [214].

При ступенчатом приложении нагрузки S к образцу материала получим функцию нарастания его деформации во времени:

$$\tilde{\varepsilon}(s) = \frac{S}{Es} \cdot \frac{1}{T \cdot s + 1} \Rightarrow \varepsilon(t) = \frac{S}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right) \quad (5.16)$$

Соответствующие кривые показаны на рисунке 5.4. Кривые получены с помощью скрипта, приведенного ниже [214]:

```
clear, clc % очистка окна и памяти
%число точек и интервалы времени до и после "ступеньки"
N1=200; N2=800; T1mod=2; T2mod=8;
S=1; E=1; % напряжение и модуль упругости
t1=linspace (0, T1mod, N1); % переменные
```

```

t2=linspace (0, T2mod, N2); % времени по интервалам
sigma=S*[zeros (1, N1), ones (1, N2)]; % "ступенька" напряжения
t= [t1, t1(end)+t2]; % переменная времени
T=3; % постоянная времени модели Кельвина-Фойгта
SdE=S/E; % максимальное нарастание деформации
% функция динамики деформации во времени
epsilon= [zeros (1, N1), SdE*(1-exp(-t2/T))];
% уровень деформации структурного изменения
epsilonm=0.8*ones(1, N1+N2);
subplot(2,1,1); plot(t,sigma) % графики динамики действия напря-
жения и возникающей деформации
subplot (2,1,2); plot(t,epsilon,t,epsilonm)

```

Если нагрузка настолько велика, что деформация достигает границы структурного изменения (перехода процесса деформации в другую форму, например, в ползучесть или разрыв материала), то можно оценить время T_m достижения этого предела ε_m :

$$\varepsilon_m = \frac{S}{E} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{T_m}{T}\right)\right) \rightarrow T_m = -T \cdot \ln\left(1 - \frac{\varepsilon_m E}{S}\right) \quad (5.17).$$

Из формулы следует, что для достижения предельной, разрывной деформации необходимо, чтобы приложенная нагрузка (механическое напряжение) было не меньше, чем произведение $E \cdot \varepsilon_m$ [214-216].

Рассмотрим статистические аспекты модели Кельвина-Фойгта. Параметры модели в пределах образца материала подвержены случайным вариациям. Кроме того, они могут меняться по мере эксплуатации материала. Поэтому представляет интерес изучить, в какой степени эти вариации влияют на взаимосвязь между напряжением и деформацией, и в частности, на время достижения некоторой предельной деформации ε_m [214].

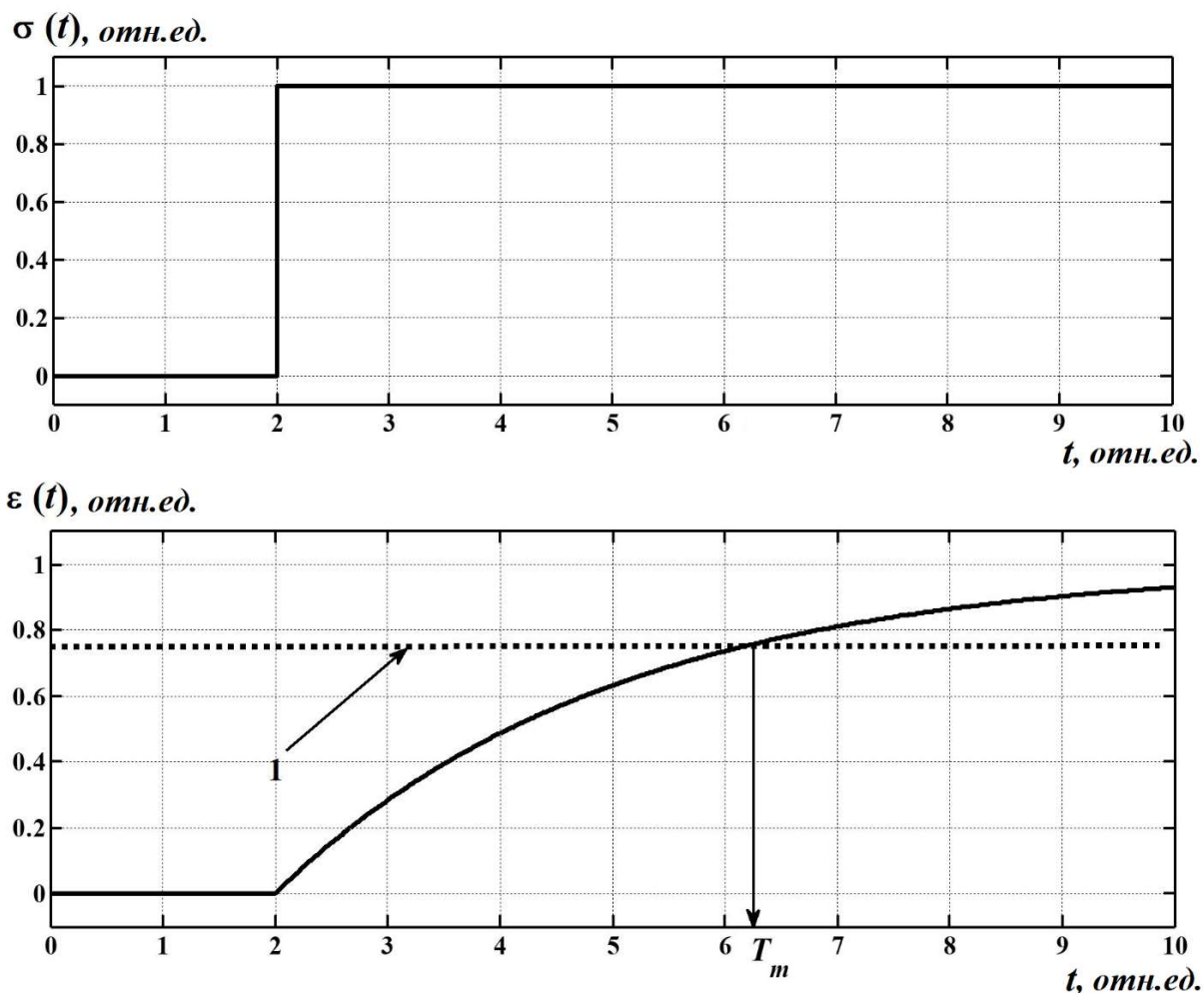


Рисунок 5.4. Ступенчатое изменение напряжения и деформация от него в модели Кельвина-Фойгта. Линия 1 – уровень деформации структурного изменения

На рисунке 5.5 показаны примеры четырех реализаций изменения относительной деформации во времени при ступенчатом нарастании напряжения для модели Кельвина-Фойгта при случайных значениях модуля упругости E и постоянной времени T . Эти значения генерировались как нормально распределенные числа с коэффициентами вариации $CvE = 10\%$ и $CvT = 10\%$. На рисунке видно, что даже 10%-е вариации параметров приводят к заметно разным кривым деформации и, соответственно, существенно разным значениям времени достижения уровня ε_m .

Поэтому следует изучить вопрос о влиянии таких случайных вариаций параметров на сопротивление механическому напряжению.

В модели Кельвина-Фойгта два параметра: E и b (или T). В формуле (5.17) величина ε_m прямо пропорциональна T [214].

Поэтому случайные вариации δT и случайные вариации δT_m пропорциональны:

$$\delta T_m = \delta T \cdot \ln \left(1 - \frac{\varepsilon_m - E}{s} \right) \quad (5.18).$$

В соответствии со свойствами случайных величин, известными из теории вероятностей, при нулевых вариациях δT вариации δT_m отсутствуют.

При ненулевых вариациях δT законы распределения у этих вариаций будут одинаковыми, но с разными параметрами. Например, согласно формулам теории вероятностей, дисперсия вариации δT_m связана с дисперсией вариации δT формулой:

$$D\delta T_m = D\delta T \cdot \left(\ln \left(1 - \frac{\varepsilon_m - E}{s} \right) \right)^2 \quad (5.19).$$

Рассмотрим теперь зависимость вариации δT_m от случайных вариаций параметра E . Поскольку параметр $T = b/E$, т.е. тоже зависит от T , то эту зависимость можно рассматривать при двух вариантах дополнительных условий: 1) $b = \text{const}$; 2) $T = \text{const}$ [200].

Рассмотрим последовательно оба варианта. При $b = \text{const}$ формулу (5.19) запишем в виде:

$$T_m = -\frac{b}{E} \cdot \ln \left(1 - \frac{\varepsilon_m \cdot E}{s} \right) \quad (5.20).$$

Разумно предположить, что случайные вариации δE относительно невелики, и их можно описать нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним и некоторым коэффициентом вариации:

$$CvE = sE/Esr \quad (5.21),$$

где sE – среднеквадратическое отклонение вариаций модуля E , а Esr – среднее значение этого модуля. Таким образом, считаем, что $E \sim \text{Norm}(Esr, sE)$ [214].

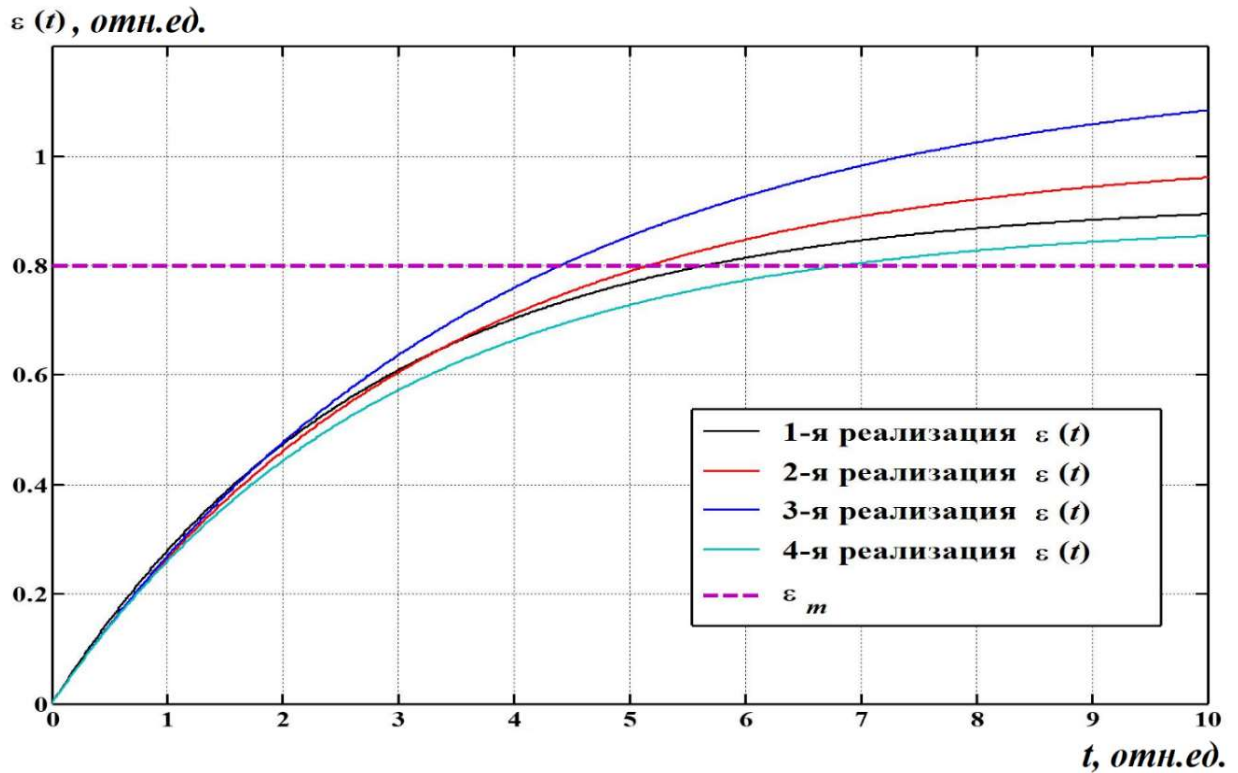


Рисунок 5.5. Динамика развития деформации при ступенчатом воздействии напряжения и случайных вариациях параметров модели Кельвина-Фойгта

Выберем также значения $S = 0.3 \cdot E$, значение $\varepsilon_m = 0,1$ и значение $b = 0,1$. Выбор этих значений обусловлен только удобствами анализа и путем введения масштабирующих множителей может быть легко переведен к реальным физическим значениям этих параметров для конкретного материала. При этом изменяется только масштаб представляемых результатов (единицы измерения), но не сами результаты и вытекающие из них выводы [214].

Ниже приведен скрипт для оценки распределения вариаций T_m вследствие вариаций модуля E :

```
clear, clc % очистка командного окна и памяти
% Задание значений параметрам
b=0.1; epsm=0.1; Esr=10;
S= 0.3*Esr; CvE=0.1;
sE=CvE*Esr; %среднеквадратическое отклонение E
N=100000; % число значений варьируемого параметра
% генерация значений варьируемого параметра
E=abs(normrnd(Esr, sE,N,1));
```

```

% расчет значений Tm для разных значений E
Tm=-b./E.*log(1-epsm*E/S);
% графики гистограмм E и Tm
Subplot (1,2,1); hist(E,50);
Subplot (1,2,2); hist(Tm,50);
% значение ТМ по среднему значению E
Tm0=-b./Esr.*log(1-epsm*Esr/S)
% оценка среднего значения Tm по его вариациям
Tmsr=mean(Tm)

```

Полученные гистограммы приведены на рисунке 5.6. Видно, что форма распределения практически не меняется, а среднее Tm может быть вычислено по формуле (5.21) заменой E на Esr , поскольку $Tm0 = 0.0041$ и $Tmsr = 0,0031$ совпадают [214].

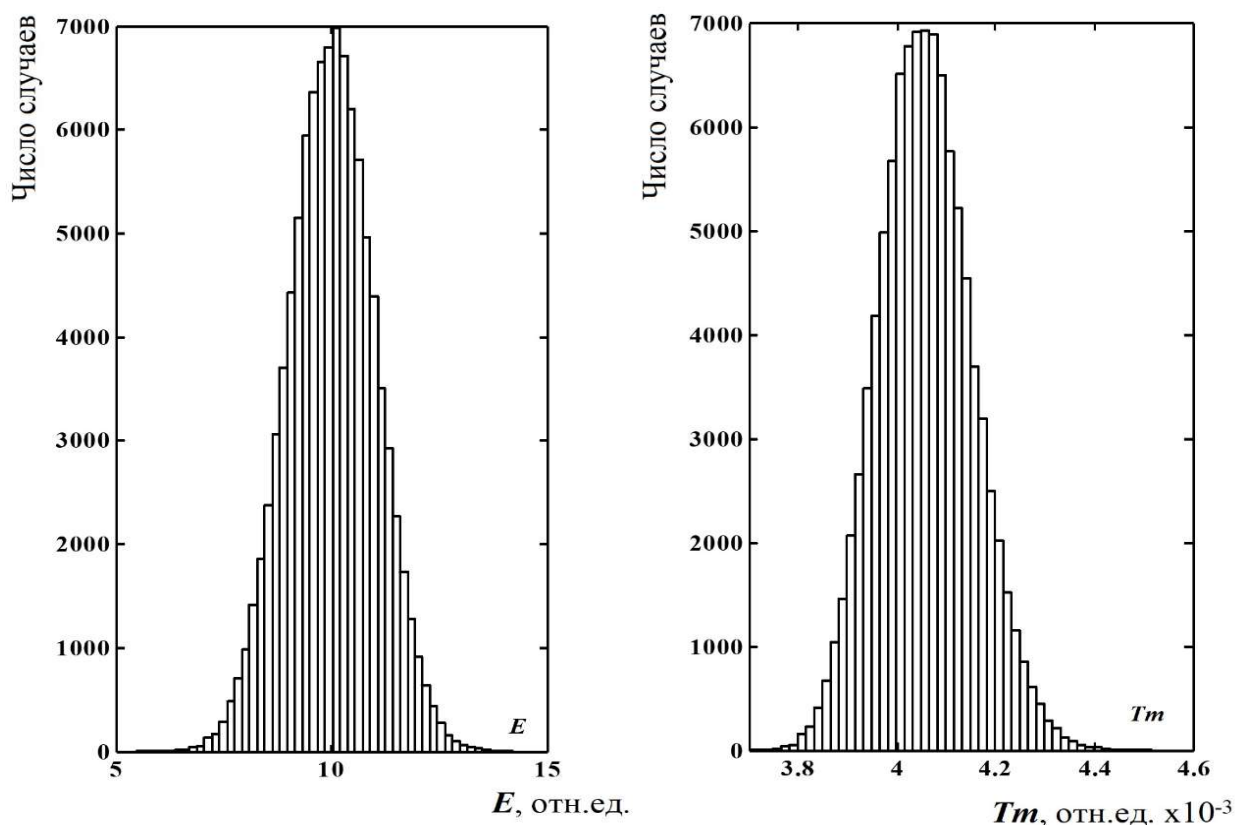


Рисунок 5.6. Оценки распределения вариаций коэффициента вязкости b и вызванных ими вариаций времени достижения разрывного удлинения Tm Для 2-го варианта ($T = \text{const}$) результат моделирования оказывается иным.

При $E_{sr} = 30$, $CvE = 0,1$ и $S = 0,15 \dots E$, $\varepsilon_m = 0,1$ и значении $T = 0,003$ скрипт для моделирования вариаций модуля E и получения соответствующих вариаций Tm приведен ниже:

```
clear, clc % очистка командного окна и памяти
% Задание значений параметрам
epsm=0.; Esr=10; S= 0.15*Esr;
CvE=0.1; sE=CvE*Esr;
b=0.1; T=b/Esr;
%среднеквадратическое отклонение E
N=100000; % число значений варьируемого параметра
% генерация значений варьируемого параметра
E=abs (normrnd(Esr, sE,N,1));
% расчет значений Tm для разных значений E
Tm=-T*log(1-epsm*E/S);
% графики гистограмм E и Tm
Subplot (1,2,1); hist(E,50);
Subplot (1,2,2); hist(Tm,50);
% значение ТМ по среднему значению E
Tm0=-T*log(1-epsm*Esr/S)
% оценка среднего значения Tm по его вариациям
Tmsr=mean(Tm)
```

Полученные гистограммы приведены на рисунке 5.6. Видно, что в рассматриваемом варианте существенно изменяется форма распределения: оно становится несимметричным, с большой правой асимметрией [214].

Это означает, что для оценки числовых параметров случайных вариаций Tm необходимо использовать не такие классические числовые характеристики, как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение, а робастные характеристики – медиану и интердецильный размах.

Хотя коэффициент вариации модуля относительно невелик: $C_v E = 10\%$, оценка коэффициента вариации Tm составляет 18-22%. Такой существенный разброс говорит о необходимости повторных опытов при натурных исследованиях на образцах материалов и усреднении их результатов [214].

Модель Максвелла и ее статистические особенности

В модели Максвелла зависимость деформации от напряжения описывается формулой:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{b} \cdot \int_{-\infty}^t \sigma(t) dt \quad (5.22).$$

Из формулы (5.22) следует, что при значениях напряжения одного знака, т.е. направленных в одну сторону, относительная деформация материала, описываемая моделью Максвелла, может достигать сколь угодно больших значений. Таким образом, эта модель может быть использована для описания эффектов текучести материала и его ползучести.

Как и для модели Кельвина-Фойгта, соотношение (5.22) для модели Максвелла удобно записать в изображениях по Лапласу:

$$h(s) = \frac{\varepsilon(s)}{\sigma(s)} = \frac{1}{E} + \frac{1}{b \cdot s} = \frac{1}{E} \cdot \frac{T \cdot s + 1}{T \cdot s}, T = \frac{b}{E} \quad (5.23).$$

Параметр T имеет размерность времени.

В этих формулах E – модуль упругости, b – коэффициент вязкости, T – постоянная времени, характеризующая скорость релаксации материала.

При воздействии на материал ступенчато меняющейся нагрузки с напряжением S относительная деформация материала также скачкообразно, в соответствии с законом Гука, возрастает до величины $\varepsilon_e = S / E$. Затем, в соответствии с (5.23), деформация нарастает со временем линейно со скоростью $v = 1 / b$. Аналитически эту динамику деформации для модели Максвелла можно выразить соотношениями [217]:

$$\begin{cases} \sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ S, & t \geq t_0 \end{cases} \\ \varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \varepsilon_e \cdot \left(1 + \frac{t}{T}\right), & t \geq t_0 \end{cases} \end{cases} \quad (5.24).$$

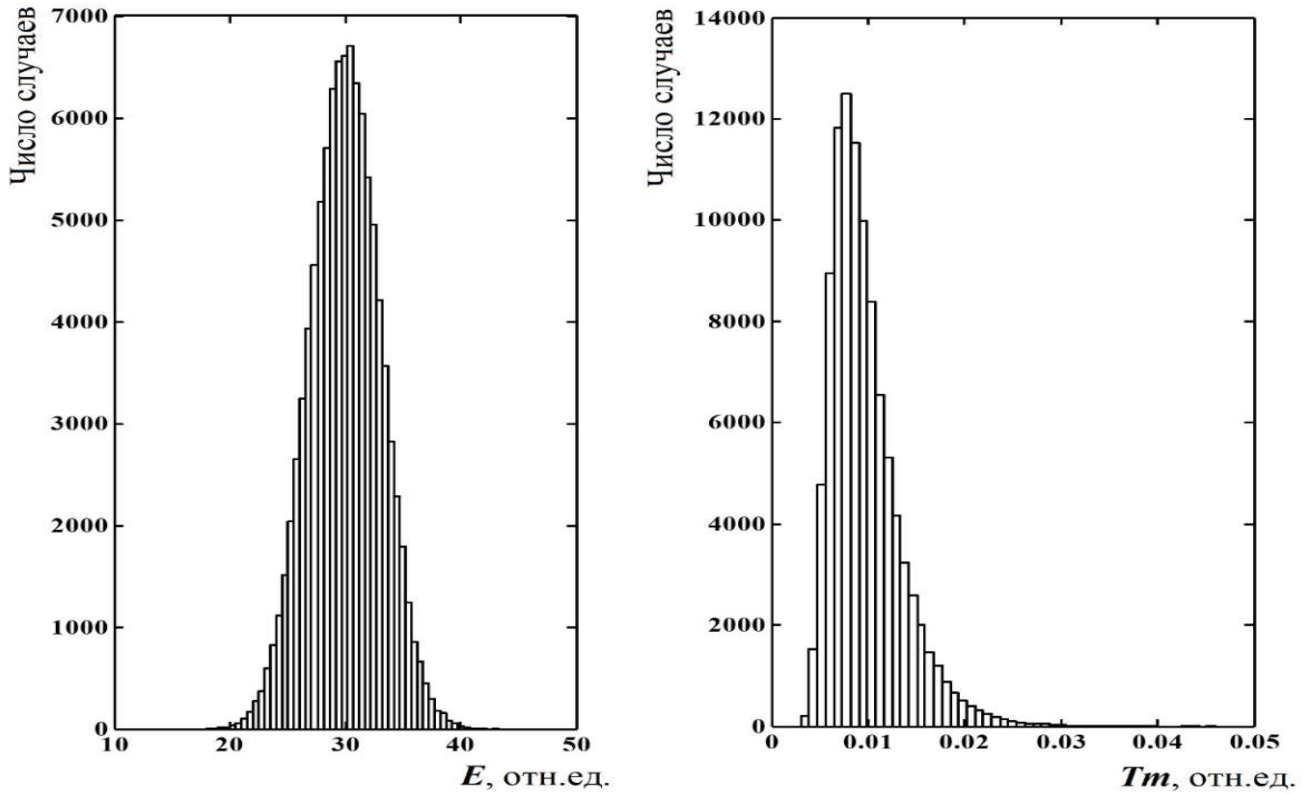


Рисунок 5.7. Оценки распределения вариаций модуля упругости E (в относительных единицах) и вызванных ими вариаций времени достижения разрывного удлинения Tm (в относительных единицах) [214, 217]

Наглядно графики этой динамики развития деформации показаны на рисунке 5.8.

Очевидно, что если $\varepsilon_m > \varepsilon_e$, то время достижения этой предельной деформации, согласно формуле (5.24), равно:

$$T_m = t_0 + T \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \quad (5.25).$$

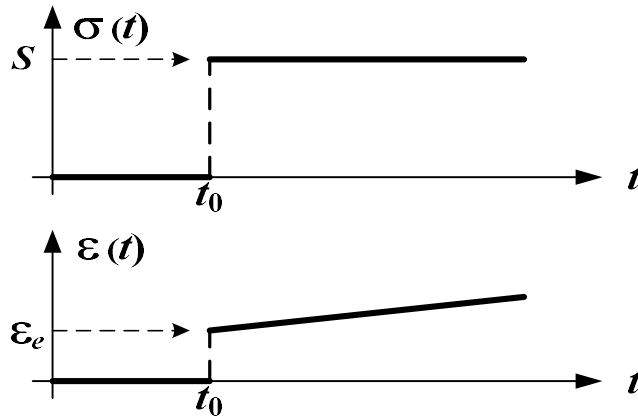


Рисунок 5.8. Динамика развития деформации при ступенчатом изменении напряжения в материале по модели Максвелла (переменные по осям координат показаны в относительных единицах) [214, 217]

Поскольку величина T_m пропорциональна параметру T модели, случайные вариации параметра T приводят к случайным вариациям величины T_m с распределением той же формы, но числовыми характеристиками: математическим ожиданием MT_m и дисперсией DT_m , равными:

$$MT_m = t_0 + MT \cdot \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_e}{\varepsilon_e}, \quad DT_m = DT \cdot \left(\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \right)^2 \quad (5.26).$$

В этих формулах MT и DT , соответственно, математическое ожидание и дисперсия параметра T .

Иная ситуация наблюдается для случайных вариаций параметра ε_e , поскольку T_m зависит от него по гиперболической зависимости. Для определения статистической зависимости распределения T_m от распределения ε_e . Для изучения этой зависимости используем скрипт:

```
clear, clc % очистка окна и памяти
t0=0; % момент ступенчатого напряжения
T=1; % Постоянная времени модели
epsm=0.1; % деформация структурного изменения
epseSr=0.1; % средняя упругая деформация
```

```

epsemin=0.1*epseSr; % минимальная упругая деформация
N=100000; % число повторных статистических испытаний
% генерация повторных случайных значений epse
epse=abs (unifrnd(0.1*epseSr, epsm,N,1));
Tm=T*(epsm./epse-1); % время достижения деформации epsm
% гистограммы epse и Tm
Subplot (1,2,1); hist(epse,50); subplot (1,2,2); hist(Tm,50)

```

Пример полученных гистограмм приведен на рисунке 5.9. В этом примере для генерации значений ε_e использовано равномерное распределение. При этом значения T_m имеют усеченное гиперболическое распределение. Вид распределения T_m зависит от формы распределения ε_e . В этом легко убедиться, заменив, например, в скрипте равномерное распределение ε_e на какое-нибудь другое подходящее распределение [217].

Для иллюстрации сказанного на рисунке 5.9 приведены гистограммы распределений тех же величин, что и на рисунке 5.8, но для альтернативного усеченного экспоненциального распределения ε_e . Для получения этих распределений в приведенном выше скрипте строка генерации повторных заменена на строки:

```

z=exprnd (0.1*epseSr, N,1);
z1=z(find(z<epsm));
epse=z1(find(z1>0.1*epseSr));

```

Этот компьютерный эксперимент показал, что форма распределения времени развития деформации до достижения некоторого предельного своего значения при случайных вариациях параметров зависит не только от числовых значений случайных вариаций этих параметров, но и от формы их распределения.

Предложенная модель исследования в виде приведенного выше скрипта дает возможность детально изучить эту зависимость и спрогнозировать поведение материала, пластическую деформацию которого можно описать моделью Максвелла [217].

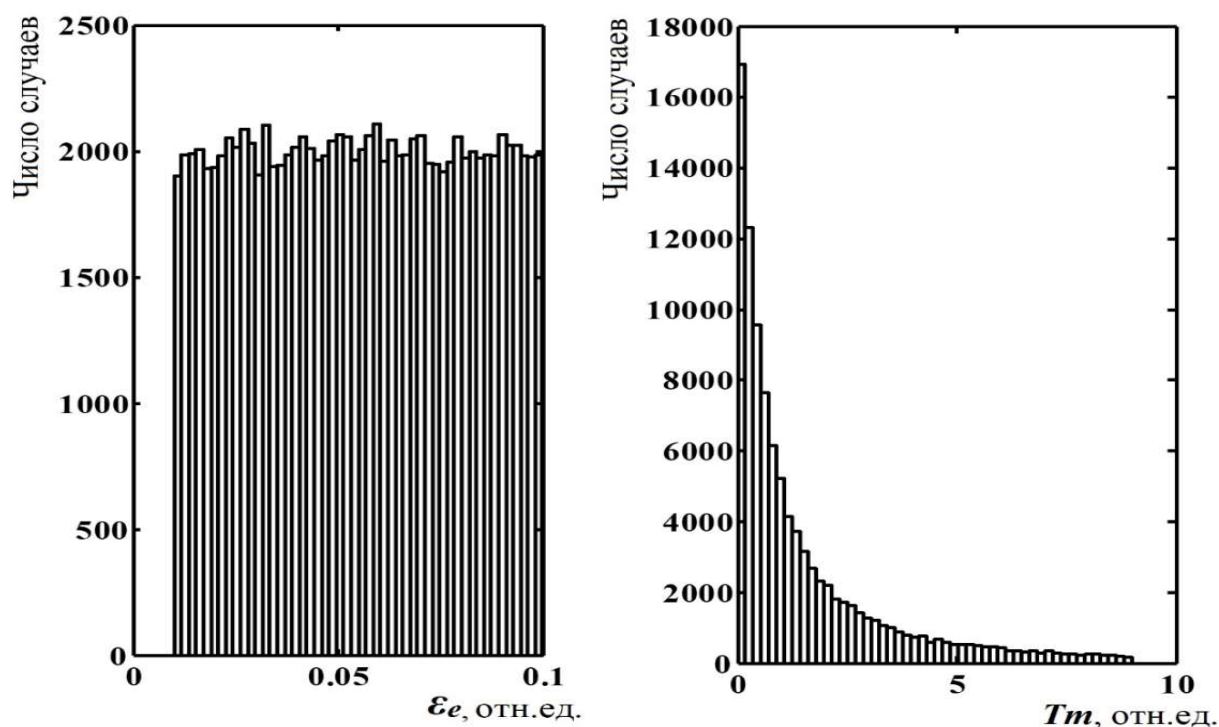


Рисунок 5.9. Модельное распределение упругой деформации ε_e и распределение времени T_m достижения граничной деформации ε_m (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

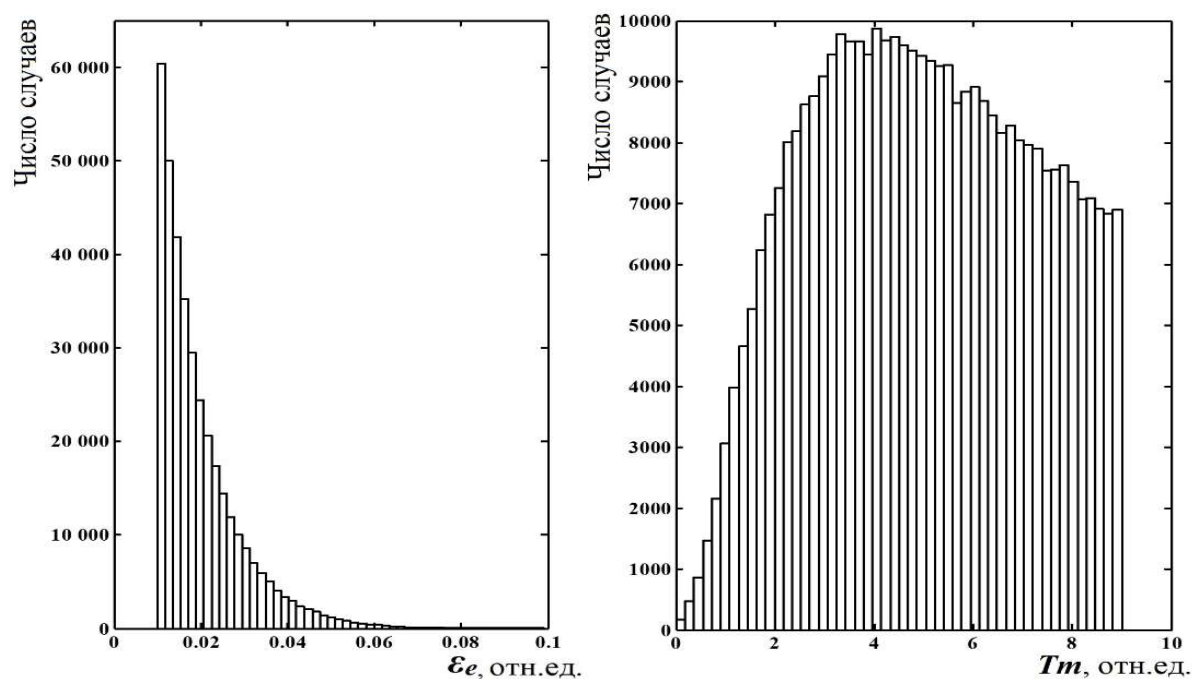


Рисунок 5.10. Альтернативное модельное распределение упругой деформации ε_e и распределение времени T_m достижения граничной деформации ε_m (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Модель Сен-Венана и ее статистическая динамика

Уникальной особенностью волокнистых материалов, связанной с их строением и структурой, является механическое взаимодействие отдельных волокон или нитей по соприкасающимся поверхностям. Благодаря этим взаимодействиям и переплетенности волокон материал и существует как единое целое.

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, в точности как это имеет место при взаимодействии неисчислимого количества атомов и молекул в веществе под действием их электромагнитных взаимодействий. Взаимодействия ансамблей атомов и молекул описывает и изучает статистическая динамика. В случае волокнистых материалов мы имеем дело со статистической динамикой волокон и/или нитей [201].

Исследуем, как преобразуется закономерность связи между механическими напряжениями и деформацией в волокнистом материале с учетом статистического разброса значений параметров этой связи [213].

В соответствии с формулой напишем Matlab – функцию, связывающую значения σm , v и σ со скоростью деформации $d\varepsilon/dt$:

```
function dedt = sv1 (v, sm, s);  
if abs (s) <= sm    dedt = 0; else    dedt = v * sign (s); end
```

Получим график зависимости скорости деформации от напряжения при относительных фиксированных значениях параметров $\sigma m = 10$, $v = 1$ и значениях σ в

диапазоне от $(-2 \cdot \sigma_m)$ до $(+2 \cdot \sigma_m)$. Соответствующий скрипт Matlab имеет вид:

```
% (файл p7.m)
clear, clc; % очистка командного окна и рабочей области
v = 1; % скорость деформации
sm = 10; % максимальное напряжение покоя
de = []; % накопитель значений деформации
% главный цикл расчета:
%изменение напряжения от -2 sm до +2 sm
for s = -2 * sm: 0.01 2 * sm
dedt = sv1 (v, sm, s); % вычисление скорости деформации
de = [de, dedt ]; % накопление значений скорости деформации
end % конец цикла
s = -2 * sm: 0.01: 2 * sm; % диапазон изменения напряжения
plot (s, de) % график зависимости скорости деформации от напря-
жения
```

На рисунке 5.11 показана зависимость скорости деформации материала Сен-Венана от напряжения в этом материале.

В волокнистом материале эта зависимость действует в актуальный момент времени на одном участке взаимодействия. В другие моменты времени и на других участках взаимодействие происходит по этой же модели, но с другими параметрами. В усредненном, интегральном виде для всего материала получим эффективную зависимость между напряжением и скоростью деформации, если вычислим эти зависимости для разных, случайных значений v и σ_m [213].

Заметим, что взаимодействие волокон и/или нитей в одномерном волокнистом материале в отличие от классической модели Сен-Венана происходит «с одним знаком», т.е. участки взаимодействия волокнистых поверхностей движутся, в основном, в одном направлении, в сторону удлинения одномерного материала. Относительные смещения в противоположном направлении, в сторону сокращения

длины одномерного материала, если и происходят, то только за счет упруго-эластической составляющей деформации. Пластическая деформация в этом направлении практически отсутствует, а значит, и соответствующая модель должна «работать» только в сторону удлинения одномерного волокнистого материала. Это замечание учтем при выборе законов распределения значений параметров ν и σt [213].

Поскольку распределения этих величин неизвестны и не поддаются экспериментальной оценке, то есть смысл смоделировать усредненную по многим участкам взаимодействия зависимость между напряжением и пластической деформацией для разных вариантов распределений, отличающихся как по форме, так и по значениям своих параметров.

Случайные значения ν и σt будем генерировать с помощью генератора случайных чисел по законам распределения с параметрами, которые приведены в таблице 5.1. Выбор законов распределения основан на следующих общих «естественных» соображениях:

- 1) ν , и σt являются положительно определенными величинами;
- 2) диапазон значений ν ограничен снизу нулем, а сверху некоторой предельной величиной, которую примем равной единице;
- 3) диапазон значений σt ограничен снизу нулем, а сверху практически неограничен [213].

Поэтому для моделирования значений ν выбираем бета-распределение. Оно определено на ограниченном интервале значений (от 0 до 1, при масштабировании – от 0 до любого заданного конечного значения). Параметры бета-распределения позволяют управлять его формой и получить широкий спектр кривых распределения разной формы. Его параметры a и b выбираем из принятых значений средней νSr и коэффициента вариации $CV\nu$. Как известно, $CV\nu^2 = D\nu / \nu Sr^2$. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, имеющей бета-распределение $B(a, b)$, выраженные через параметры этого распределения, равны [213]:

$$\nu Sr = \frac{a}{a+b} \quad D\nu = \frac{ab}{(a+b)(a+b+1)} \quad (5.27).$$

После тождественных алгебраических преобразований выразим параметры распределения через среднее и коэффициент вариации:

$$a = \frac{1-vSr}{CV^2} - vSr \quad b = \frac{a}{vSr} - a \quad (5.28).$$

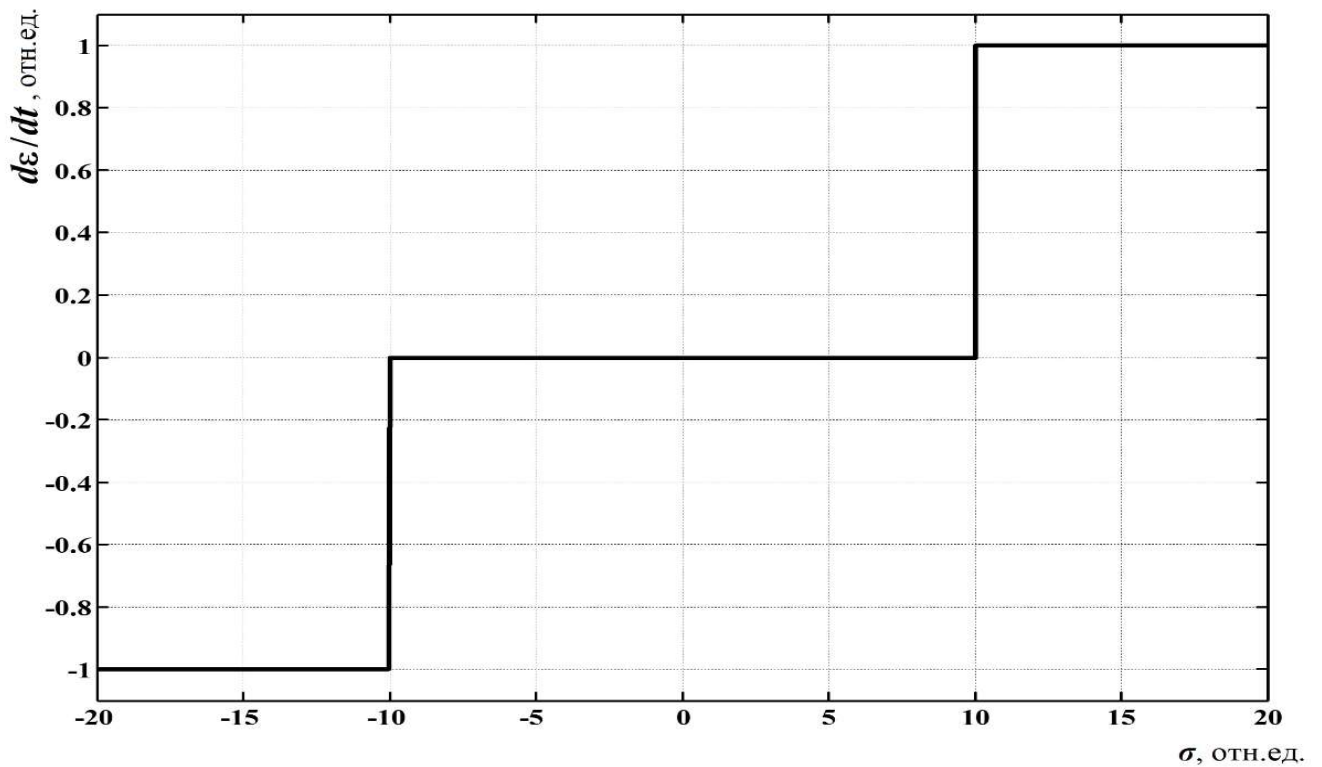


Рисунок 5.11. Зависимость между напряжением и скоростью деформации для модели Сен-Венана (переменные по осям координат показаны в относительных единицах) [213]

Для генерации значений sm выбираем гамма-распределение $\Gamma(k, \theta)$. Такой выбор обусловлен тем, что это унимодальное распределение положительно определенной случайной величины, причем форма распределения легко может быть изменена путем изменения параметров распределения. Его параметры связаны с математическим ожиданием $smSr$ и коэффициентом вариации $CVsm$ формулами:

$$k = \frac{1}{CVsm^2} \quad \theta = smSr \cdot CVsm^2 \quad (5.29).$$

Формулы (5.27) и (5.28) использованы в компьютерном эксперименте. Моделируемые варианты приведены в таблице 5.1 [213].

Таблица 5.1. Случайные значения ν и σm

Параметр модели ν Распределение В (a, b)	
№№	Параметры распределения νSr и $CV\nu$
1v	$\nu Sr = 0,5$ $CV\nu = 5\%$
2v	$\nu Sr = 0,5$ $CV\nu = 50\%$
3v	$\nu Sr = 0,9$ $CV\nu = 5\%$
	$\nu Sr = 0,9$ $CV\nu = 50\%$
Параметр модели σm Распределение $\Gamma (\kappa, \theta)$	
№№	Параметры распределения $smSr = 10$ и $CVsm$
1s	$CVsm = 5\%$
2s	$CVsm = 25\%$
3s	$CVsm = 50\%$
4s	$CVsm = 100\%$ (Экспоненциальное распределение)

Выбор вариантов позволяет исследовать для каждого из параметров модели влияние формы распределения и самого параметра на зависимость [213].

Поскольку исследование проводилось методом Монте-Карло (метод, как известно, заключается в многократном повторении решения задачи, т.е. прогонов модели, при разных значениях входящих в задачу случайных величин и последующем усреднении получаемых результатов с целью получения более точного решения), то значения параметров генерировались в соответствии с указанными в таблице 5.1. распределениями. Затем для этих значений вычислялась зависимость скорости деформации от напряжения. После выполнения всех повторных прогонов модели выполнялось усреднение полученной зависимости [213].

Ниже приведен базовый скрипт для эксперимента с моделью, сопровождаемый поясняющими комментариями:

```

clear, clc % очистка рабочей области и командного окна
% Параметры распределений
vSr=0.5; % средняя скорость скольжения (деформации)
CVv=0.05; % коэффициент вариации скорости скольжения
smSr=10; % среднее значение максимального напряжения покоя
CVsm=0.05; % коэффициент вариации максимального напряжения по-
коя
% расчет параметров бета - распределения
a=(1-vSr)/CVv^2-vSr; b=a/vSr-a;
% расчет параметров гамма - распределения
k=1/CVsm^2; teta=smSr*CVsm^2;
N=1000; % число повторных прогонов по методу Монте - Карло
ns=1000; % число точек зависимости скор. деформ. от напр.
demas=zeros(N,ns); % массив для накопления зависимостей
% генерация массива по модельному распределению
smm=gamrnd(k, teta,100*N,1); % гамма - распределение
% hist(smm,50) % вывод гистограммы распределения параметра
smax=max(smm); % наибольшее значение параметра в выборке
% smax=50; % вариант фиксированного наибольшего значения пара-
метра
s=linspace(-smax,smax,ns); % значения варьируемого напряжения
for j=1: N % начало циклов прогонов по методу Монте - Карло
% v = vSr; % вариант постоянного значения параметра v
v=betarnd(a,b); % бета - распределение v
sm=gamrnd(k,teta); % гамма - распределение sm
de = []; % контейнер для накопления зависимости в прогоне
for i = 1: ns % расчет зависимости
dedt = sv1(v,sm,s(1,i) );
de=[de,dedt]; % добавление значения в контейнер
end
demas(j,:)=de; % добавление зависимости j-го прогона в массив
end
% оценка усредненной по прогонам зависимости
deSr=mean(demas);
% график зависимости для модельного варианта
hold on, plot(s,deSr)

```

С этой компьютерной моделью был проведен однофакторный компьютерный эксперимент, в котором варьировалось значение коэффициента вариации скорости скольжения CV_v , которому задавались значения в диапазоне, намного превосходящем реально возможные значения:

$$CV_v = 5\%, 15\%, 25\%, 50\%, 75\%, 100\%, 125\% [213].$$

На рисунке 5.12 показаны полученные в эксперименте кривые, которые практически неразличимы для всех значений коэффициента вариации.

Можно сделать вывод, что случайные вариации скорости скольжения для многочисленных участков трения в волокнистом материале практически не влияют на форму зависимости скорости деформации от напряжения в соответствии с моделью Сен-Венана [213].

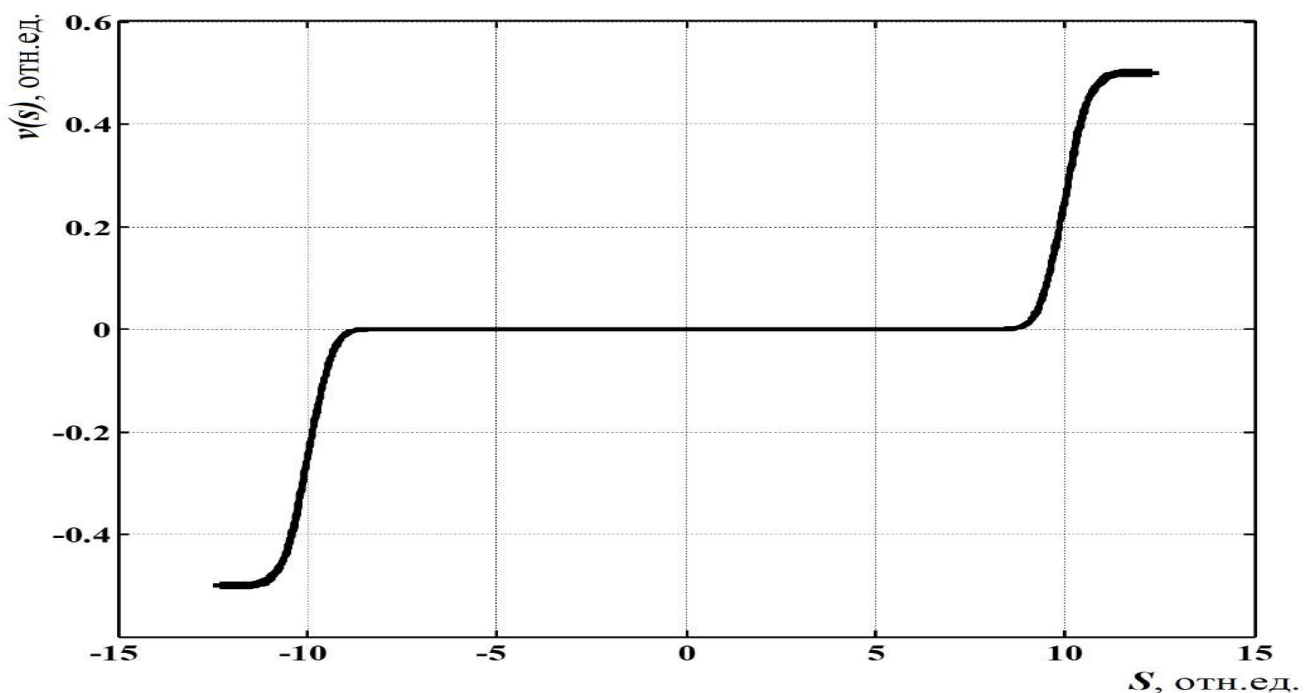


Рисунок 5.12. Зависимость скорости деформации от напряжения при разных коэффициентах вариации скорости скольжения (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Во втором компьютерном эксперименте с моделью варьировался коэффициент вариации максимального напряжения покоя, которому задавались значения:

$CV_{sm} = 5\%, 30\%, 75\%, 100\%$.

В эксперименте коэффициент вариации скорости скольжения имел постоянное значение $CV_v = 0,05$. Эксперимент показал, что зависимость скорости деформации v существенным образом меняет свой вид в зависимости от CV_{sm} (рисунок 5.13) [213].

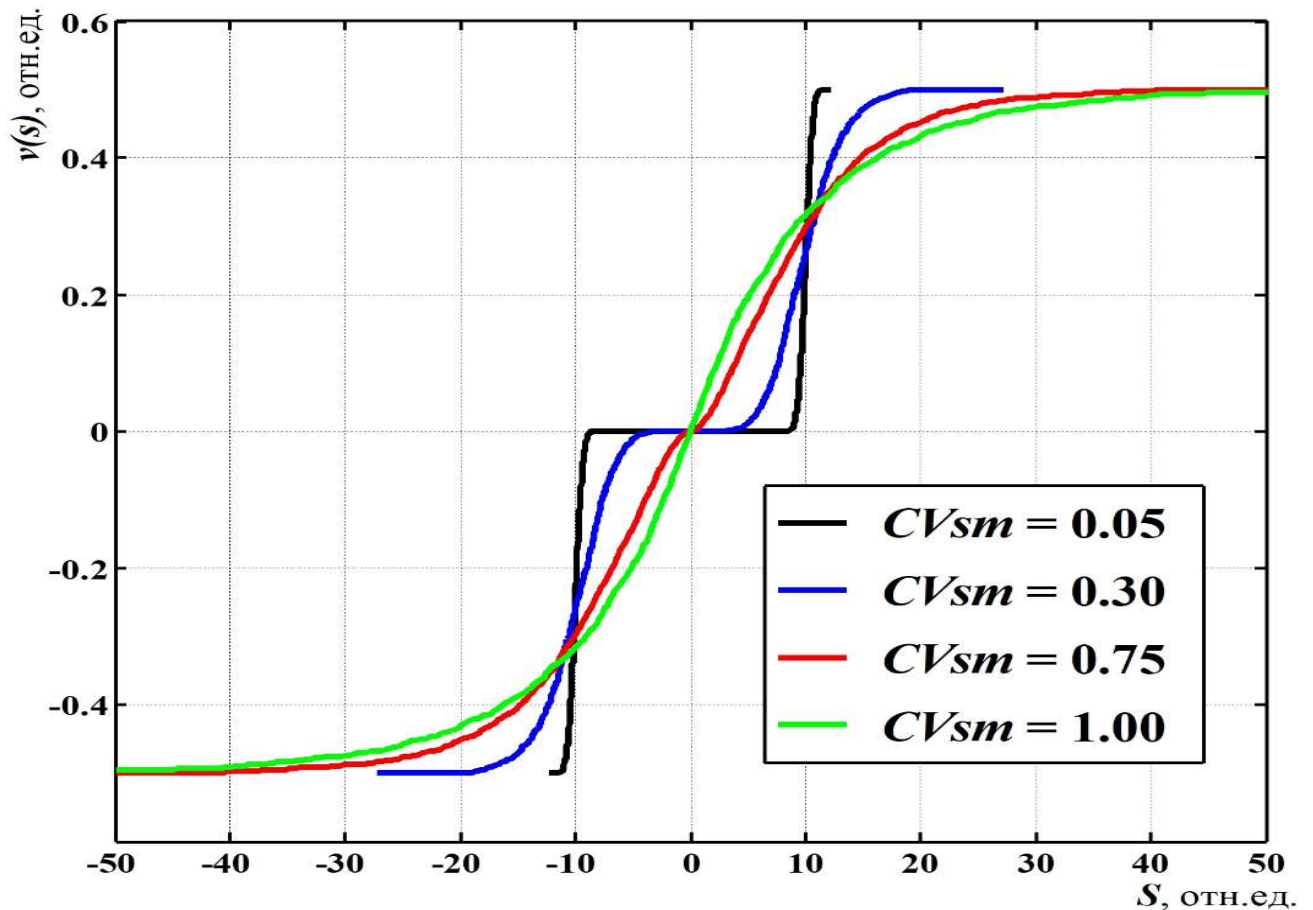


Рисунок 5.13. Зависимость скорости деформации от напряжения при разных коэффициентах вариации максимального напряжения покоя [213]

При малых значениях коэффициента вариации CV_{sm} (от 0 до 25%) зависимость сохраняет «ступенчатую» форму, которая, однако, с ростом CV_{sm} сглаживается. При $CV_{sm} > 30\%$ «ступенчатая» часть кривой практически исчезает, и зависимость скорости деформации от напряжения превращается в монотонно нарастающую, гладкую кривую, не отличающуюся от зависимости между напряжением и скоростью деформации для вязких материалов, которые описываются моделью

Ньютоновской жидкости [213].

Таким образом, эксперименты показали, что случайные вариации максимального напряжения покоя, которые на поверхностях касания волокон в волокнистом материале имеют большую величину, приводят к тому, что интегральная усредненная зависимость пластической деформации материала от действующего на него механического напряжения практически не отличается от линейной зависимости между скоростью деформации и напряжением, характерной для Ньютоновских вязких материалов:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = v(t) = -b \cdot \sigma(t) \quad (5.30).$$

Этот результат чрезвычайно важен, поскольку позволяет использовать простые линейные или линеаризованные модели деформации вместо нелинейных моделей [213].

5.3. Многозвенные модели и их статистические аспекты применения

Обобщением рассмотренных выше классических моделей деформации материала, описывающих зависимость между механическим напряжением и деформацией материала ε (σ), являются многозвенные модели, составленные из более, чем трех основных элементов. Примером такой модели может служить параллельно соединенные модели Максвелла и Кельвина-Фойгта, механическая аналогия которой показана на рисунке 5.14 [214, 215, 217].

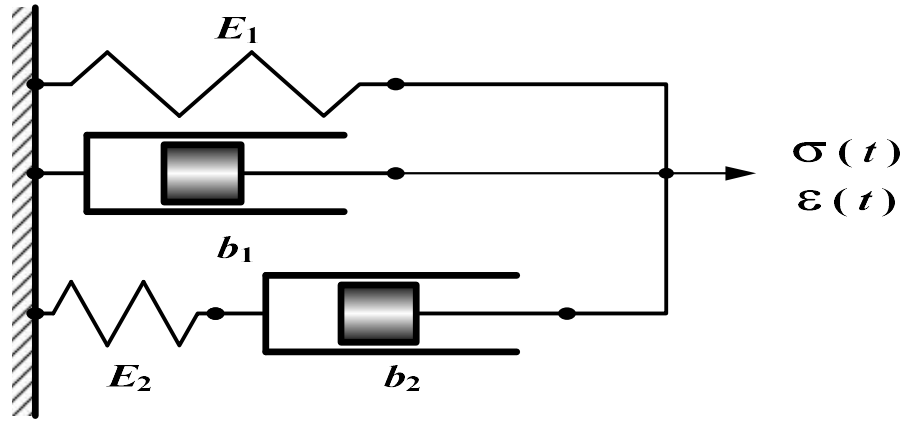


Рисунок 5.14. Механическая аналогия из параллельно соединенных моделей Максвелла и Кельвина-Фойгта

Каждый элемент модели имеет параметр, значение которого, вообще говоря, отлично от значения параметра других аналогичных элементов, т.е. $E_1 \neq E_2$, $b_1 \neq b_2$. Зависимость между напряжением и деформацией для таких составных моделей легко получить, используя формализм передаточных функций. Например, для модели на рисунке 5.14 можно получить эту зависимость как результат следующей цепи преобразований [215]:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\sigma}(s) &= \tilde{\sigma}_1(s) + \tilde{\sigma}_2(s) \\
 \tilde{\sigma}_1(s) &= \tilde{\varepsilon}(s) \cdot (E_1 + b_1 \cdot s) = \tilde{\varepsilon}(s) \cdot E_1 \cdot (1 + T_1 \cdot s) \\
 \tilde{\varepsilon}(s) &= \tilde{\sigma}_2(s) \cdot \left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{b_2 \cdot s} \right) = \frac{\tilde{\sigma}_2(s)}{E_2} \cdot \frac{T_2 \cdot s + 1}{T_2 \cdot s} \\
 \tilde{\sigma}_2(s) &= \tilde{\varepsilon}(s) \cdot E_2 \cdot \frac{T_2 \cdot s}{T_2 \cdot s + 1} \\
 \tilde{\sigma}(s) &= \tilde{\varepsilon}(s) \cdot \left(E_1 (1 + T_1 \cdot s) + E_2 \cdot \frac{T_2 \cdot s}{T_2 \cdot s + 1} \right) \\
 H_{\sigma \rightarrow \varepsilon}(s) &= \frac{\tilde{\sigma}(s)}{\tilde{\varepsilon}(s)} = E_1 \cdot (1 + T_1 \cdot s) + E_2 \cdot \frac{T_2 \cdot s}{T_2 \cdot s + 1}
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

Очевидно, что с увеличением числа параметров увеличивается гибкость модели. При большом числе параметров оптимальным подбором их значений можно обеспечить соответствие модели имеющимся экспериментальным данным для любого конкретного материала из широкого ассортимента [215].

С увеличением количества звеньев передаточная функция $H_{\sigma \rightarrow \varepsilon}(s)$ приводится к форме отношения двух полиномов оператора Лапласа:

$$H_{\sigma \rightarrow \varepsilon}(s) = H_o \cdot \frac{\sum_{k=0}^m a_k \cdot s^k}{\sum_{j=0}^n b_j \cdot s^j} \quad (5.32).$$

Полиномы в числителе и знаменателе передаточной функции (5.32) всегда могут быть представлены в виде произведений разностей оператора Лапласа s и корней соответствующего полинома [215]:

$$H_{\sigma \rightarrow \varepsilon}(s) = H_o \cdot \frac{\prod_{k=0}^m (s - p_k)^k}{\prod_{j=0}^n (s - s_j)^j} \quad (5.33).$$

Отсюда следует, что оригиналом функции $\varepsilon(t)$ – реакции на ступенчатое изменение напряжения – является сумма экспоненциальных функций времени t . Скорость их нарастания или убывания с увеличением времени определяется корнями s_j [215].

Поэтому, если ставится цель смоделировать динамику изменения деформации материала как его реакцию на механическое напряжение, включая эффекты упругой, эластической, пластической деформаций и ползучести материала, имеет смысл брать в качестве подходящих аналитических конструкций алгебраические суммы нескольких экспонент, например,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot (1 + A(1 - \exp(-a \cdot t)) + B(1 - \exp(-b \cdot t))), t > t_0 \quad (5.34).$$

В этой формуле σ_0 – величина действующего в материале, начиная с момента $t = t_0$, механического напряжения, E – значение мгновенного модуля упругости, коэффициенты A , a , B , b – параметры эластической, пластической составляющих деформации и ползучести материала [215].

Покажем вид зависимости (5.34) для некоторых относительных значений перечисленных параметров.

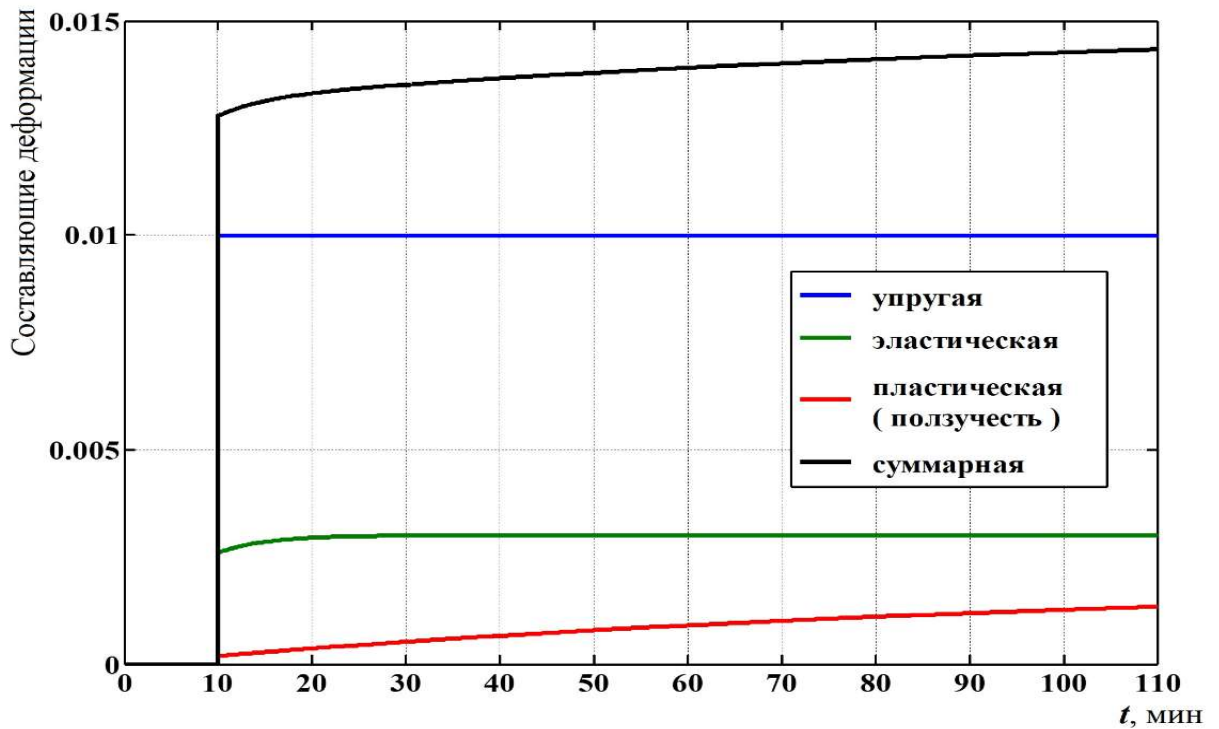


Рисунок 5.15. Составляющие упругой, эластической и пластической (ползучести) деформаций [202].

Кривые получены при: $\sigma_0 = 1$; $E = 100$; $t_0 = 10$; $A = 0,3$; $B = 0,2$; $a = 0,2$; $b = 0,01$
с помощью скрипта:

```
clear, clc % очистка окна и памяти
% задание значений параметрам модели
s0=1; E=100;
A=0.3; a=0.2;
B=0.2; b=0.01;
% задание интервала времени моделирования
T0=10; Tmod=100;
% задание числа точек дискреты времени
N0=100; Nmod=1000;
t0=linspace (0, T0, N0);
t=linspace(T0, T0+Tmod,Nmod);
epstu= [zeros (1, N0), s0/E*ones (1, Nmod)];
epste= [zeros(1, N0), s0/E*A*(1-exp(-a*t))];
```

```

epstp= [zeros(1, N0), s0/E*B*(1-exp(-b*t))];
epst=epstu+epste+epstp; tm= [t0, t];
plot (tm, epstu, tm, epste, tm, epstp, tm, epst) [202].

```

Как следует из формулы (5.34) и рисунка 5.15, параметры A и B задают наибольшие величины соответствующих составляющих деформации, а параметры a и b – скорости нарастания этих деформаций [215].

Исследуем, как случайные вариации параметров A , B , a и b отражаются на величине относительной деформации материала к концу моделируемого отрезка времени T_{mod} действия напряжения. Поскольку к этому моменту функции экспоненты в модели (рисунок 5.15) практически равны нулю, то вариации параметров a и b никак не проявятся в конечных значениях относительной деформации. Относительно параметров A и B модель (рисунок 5.15) является линейной: значения относительной деформации прямо пропорциональны этим параметрам. Поэтому случайные вариации параметров приводят к пропорциональным случайным вариациям относительной деформации [215].

Модель (5.15) описывает процесс ползучести материала за счет включения в нее экспоненциального слагаемого с очень малой скоростью изменения экспоненты – параметра b . Однако недостатком модели является существование некоторой предельной деформации, больше которой не может быть при постоянных значениях параметров A , B , a и b . Это предельное значение равно:

$$\varepsilon(\infty) = \sigma_0/E(1 + A + B) \quad (5.35).$$

Между тем ползучесть материала предполагает возможность нарастания относительной деформации до практически неограниченных значений. Один из путей учета в простых аналитических моделях состоит во включении в них неограниченных, например, степенных функций. Вот возможный вид такой модели:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot (1 + A \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t)) + B \cdot t^r) \quad (5.36).$$

Очевидно, что при любой положительной степени r данная модель покажет

нарастание относительной деформации до сколь угодно большой величины. Поскольку диапазон времени наблюдения всегда конечен, то в пределах этого диапазона можно подобрать такие оценки параметров, которые будут удовлетворительно описывать наблюдаемые в эксперименте результаты [215].

Переход от модели (5.35) к модели (5.36) можно рассматривать как замену экспоненциальной функции $B(1 - \exp(-b \cdot t))$ на ее аппроксимацию элементом степенного ряда $B \cdot t^r$. На рисунке 5.16 показана кривая нарастания относительной деформации, построенная при тех же значениях параметров, что и кривая на рисунке 5.15, но по модели (5.36) для значений параметра $r = 0,3; 0,8; 1; 1,3$.

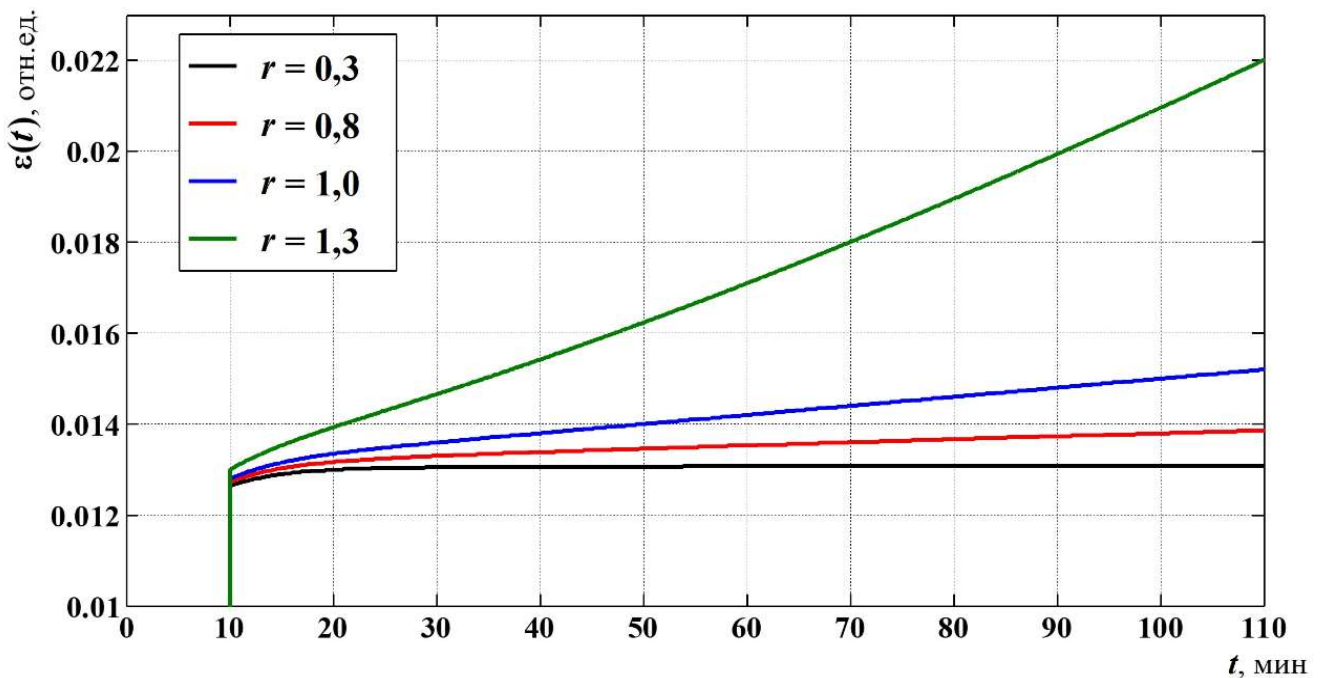


Рисунок 5.16. Деформация ползучести материала по модели (5.36) при разных значениях параметра r (переменные по осям координат показаны в относительных единицах) [215]

Таким образом, модификация аналитической модели (5.36) позволяет описать ползучесть материала в согласии с теми результатами экспериментов с образцами волокнистого материала, которые обычно имеются в распоряжении исследователя.

Другой вариант адаптации модели (5.36) заключается в переходе от постоянных, «глобальных» значений параметров A , B , a и b , не меняющихся со временем, к параметрам, которые медленно меняют свои значения во времени. Применение цифровых технологий при моделировании позволяет устранить вычислительные проблемы такого варианта адаптации [215].

5.4. Модели с переменными параметрами

Принципиальным недостатком рассмотренных выше однозвенных и многозвенных моделей является их динамическая линейность, которая выражается в пропорциональности между изображениями деформации и напряжения: увеличение напряжения в миллион раз приводит (по модели) к увеличению в миллион раз деформации, что, конечно, не соответствует действительности. Между тем, реальные материалы не обладают такими свойствами или обладают ими в ограниченном диапазоне варьирования напряжений [211, 219].

Так, например, современные иглопробивные прессовые сукна должны обладать малой засоряемостью, иметь сеточную структуру, позволяющую засоряющим ее волокнам и примесям свободно проникать через сукно, без потери его фильтрующей способности. Целесообразно их использование в каркасах иглопробивных сукон полипропиленовых пленочных нитей, имеющих более высокий, по сравнению с иными видами, модуль растяжения и обладающих более высокой изгибостойчивостью. Наиболее рациональной структурой каркасных нитей является мультифиламентная нить из скрученных и строченных полипропиленовых пленочных нитей, обладающая равновесностью и круглой формой [216].

Для устранения этого недостатка рассмотренных моделей рассмотрим возможности использования другого, альтернативного класса моделей. Это нелинейные модели, в которых деформация зависит от напряжения не прямо пропорционально, а через некоторый нелинейный динамический оператор. Обычно такие модели записывают в обобщенной интегральной форме [211, 219]:

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t R(t, t_1, \sigma(t_1), \varepsilon(t_1)) dt_1 \quad (5.37).$$

Подынтегральную функцию $R(t, t_1, \sigma(t_1), \varepsilon(t_1))$ называют ядром преобразования $\sigma(t) \rightarrow \varepsilon(t)$. В случае линейного преобразования это ядро имеет вид $R(t, t_1, \sigma(t), \varepsilon(t_1)) = R(t - t_1, p(t_1)) \cdot \sigma(t_1)$, т.е. ядро прямо пропорционально механическому напряжению, действующему на материал. Функции $p(t_1)$ – набор параметров ядра, которые, вообще говоря, являются функциями времени. В рассмотренных выше частных случаях линейных динамических моделей эти параметры – постоянные величины.

Как уже отмечалось, к сожалению, эта модель не является адекватной наблюдаемым свойствам нитей: упругая составляющая существенно отличается от линейного закона Гука, а эластические свойства не укладываются в простую зависимость. Поэтому, хотя на качественном уровне она правдоподобно описывает поведение отдельной нити, но для количественных оценок она в большинстве случаев не пригодна [211, 219].

Более популярными являются модели, построенные в виде цепочки связанных, более простых линейных или нелинейных моделей. В качестве экспериментальных данных чаще всего получают кривые, отображающие нарастание удлинения нити во времени под действием постоянной нагрузки. Эти кривые чаще всего имеют вид, представленный на рисунке 5.17. В течение часа волокна находились под действием постоянной растягивающей нагрузки, которая затем была снята, и начался процесс релаксации растяжения.

Аналогичная кривая для первого этапа получена на модели из двух моделей с передаточной функцией:

$$W_{ps}(s) = \frac{\varepsilon'(s)}{\sigma'(s)} = \frac{1}{E} + \frac{1}{K_1} \frac{1}{1+T_1s} + \frac{1}{K_2} \frac{1}{1+T_2s} \quad (5.38),$$

при значениях $E = 1/8$; $K_1 = 1/6$; $T_1 = 1$; $K_2 = 1$; $T_2 = 100$. [198, 211]

Согласно уравнению (6.36) суммарная деформация нити складывается из

упругой составляющей с коэффициентом упругости E и эластической составляющей, моделируемой двумя последовательно соединенными блоками (5.38) с коэффициентами $K_1; T_1; K_2; T_2$. Функция, описывающая изменение удлинения под действием постоянной нагрузки $\sigma = 1$, легко определяется аналитически методами операционного исчисления, и имеет вид:

$$\varepsilon(t) = 8 + 6(1 - \exp(-t)) + \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{100}\right)\right), t > 0 \quad (5.39).$$

График этой функции приведен на рисунке 5.17. Рассматривая эти данные как результат натурного эксперимента, найдем оценки параметров $K_1; T_1; K_2; T_2$. Для этого воспользуемся нелинейным методом наименьших квадратов [211, 217].

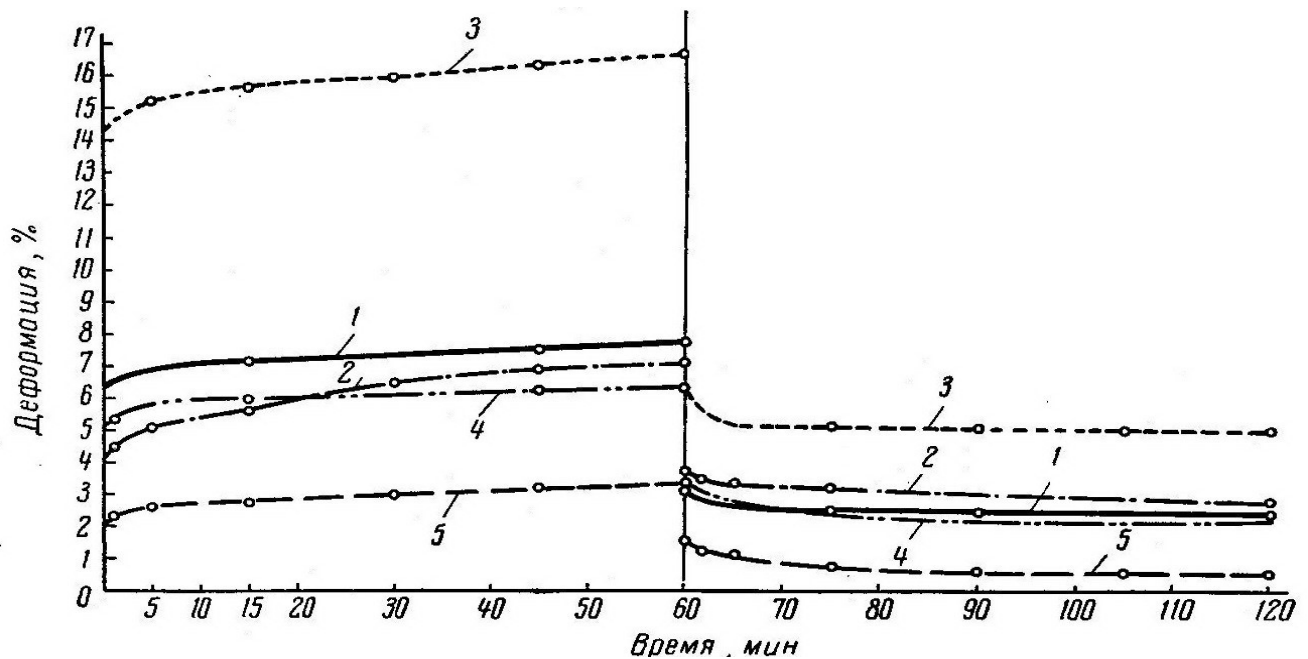


Рисунок 5.17. Кривые, отображающие нарастание удлинения нити во времени под действием постоянной нагрузки (1 – тонкая шерсть, 64к; 2 – вискозные волокна, 435 мтекс; 3 – капроновое волокно 344 мтекс; 4 – полиэфиговое волокно 357 мтекс; 5 – нитроновое волокно 333 мтекс), [211, 217]

Найденные оценки равны: $x(1) = 8,0623$; $x(2) = 4,2247$; $x(3) = 1,4491$; $x(4) = 2,1217$; $x(5) = 0,3004$.

Как видно, все оценки, кроме первой, довольно далеки от истинных значений. Однако график оценочной кривой $y_1(t)$ (см. рисунок 5.18) удовлетворительно аппроксимирует функцию $y(t)$. Остаточная сумма квадратов rn равна 2,198.

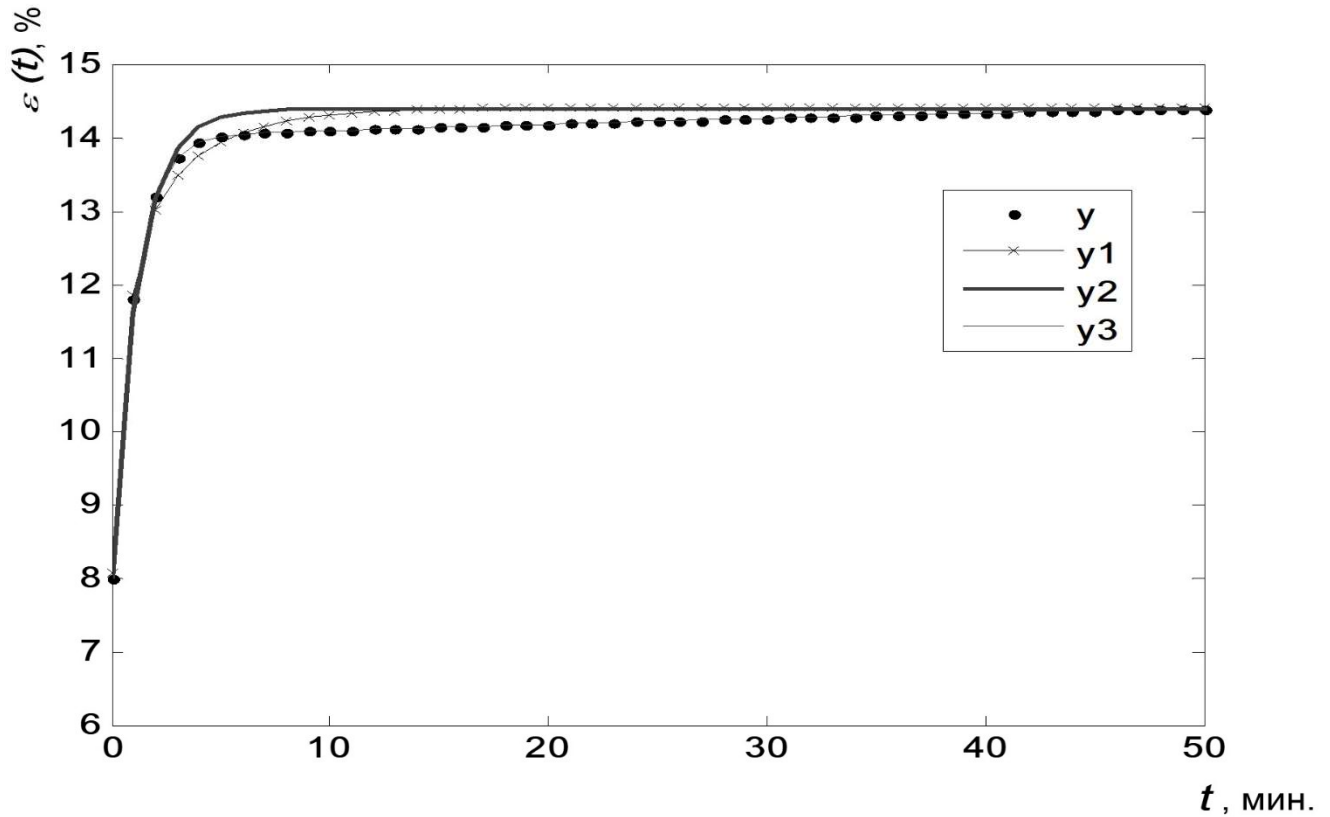


Рисунок 5.18. График оценочной кривой $y_1(t)$, аппроксимирующий функцию $y(t)$ [211, 217]

Заметим, что непосредственно из экспериментальных данных (рисунок 5.18) довольно точно можно найти оценку параметра $x(1)$. В нашем модельном случае $x(1)$ равно 8. Это сокращает длительность поиска. Кроме того, важно удачно задать начальные условия поиска. Если принять, что $x_0 = [1, 1, 1, 0]$, то при этих новых начальных значениях получим новые оценки параметров с остаточной суммой квадратов rn , равной 2,3054 и значениями параметров $x = [3,8165, 1,6999, 2,5874, 0,3561]$ [211].

Соответствующая им функция имеет вид:

$$y_2 = 8 + 3,8165(1 - \exp(-1,7t)) + 2,5874(1 - \exp(-0,3561t)) \quad (5.40).$$

Ее график функции, приведенный на рисунке 5.18, показывает согласие с экспериментальными данными $y(t)$, как и первоначальная кривая $y_1(t)$ [211, 217].

Таким образом, хотя формально кривую деформации нити можно аппроксимировать достаточно удовлетворительно, точность оценки параметров аппроксимирующей функции, даже если ее структура совпадает с модельной кривой, может оказаться низкой, а оценки – далеки от истинных значений.

Роль правильного выбора начальной точки поиска в нелинейном методе наименьших квадратов весьма велика. Например, если вернуться к пяти неизвестным параметрам $x = [x(1), \dots, x(5)]$ и задать в качестве начальной точки $x_0 = [10, 5, 1, 1, 0]$, то оценки параметров равны $x = [8,0332; 5,9592; 0,9990; 0,9418; 0,0112]$ при rn , равном 0,0018 и весьма близки к точным модельным значениям: $[8; 6; 1; 1; 0,01]$. Им соответствует аппроксимирующая кривая y_3 (рисунок 5.18). Она практически совпадает с точками модельных экспериментальных данных. Результаты оценивания приведены в таблице 5.2 и обозначены как Variant 1 [211].

Экспериментальные данные часто имеют вид кривых, представленных на рисунке 5.19. В них присутствуют как этап удлинения под действием приложенной постоянной нагрузки, так и этап релаксации после снятия нагрузки. Предполагая, что на обоих этапах нить описывается одной и той же моделью, можно воспользоваться этими данными, надеясь получить более точные оценки за счет использования большего объема данных.

Для выбранных модельных данных в соответствии с моделью (5.39) первый этап удлинения нити описывается функцией (5.40). Для второго этапа удлинения нити с помощью операционного исчисления также можно найти функцию, описывающую уменьшение удлинения нити (релаксацию) после снятия нагрузки в момент $t_a = 50$. Объединяя эти две функции, получим модельную зависимость удлинения нити на обоих этапах:

– при нагрузке:

$$\varepsilon(t) = 8 + 6(1 - \exp(-t)) + \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{100}\right)\right), \quad 0 < t \leq t_a \quad (5.41);$$

– после ее снятия:

$$\varepsilon(t) = 6 \exp(-(t - t_a)) + \exp\left(-\frac{t-t_a}{100}\right), t \geq t_a \quad (5.42).$$

Заметим, что при $t = t_a$ функция имеет разрыв на величину упругой деформации $\varepsilon_u = 8$. На рисунке 5.19 график функции (5.40) обозначен точками как Var. 2 [211, 217].

Оценки параметров аппроксимирующих функций (таблица 5.2):

– Variant 1

$$\varepsilon(t) = x(1) + x(2)(1 - \exp(-x(3)t)) + x(4)(1 - \exp(-x(5)t)), t > 0 \quad (5.43),$$

– Variant 2

$$\varepsilon(t) = x(1) + x(2)(1 - \exp(-x(3)t)) + x(4)(1 - \exp(-x(5)t)), 0 < t \leq t_a$$

$$\varepsilon(t) = x(2)\exp(-x(3)(t - t_a)) + x(4)\exp(-x(5)(t - t_a)), t_a \leq t \quad (5.44).$$

Оценки вычислялись для двух векторов x_0 начальных значений оцениваемых параметров [211, 217, 219].

Сравнение полученных оценок еще раз подтверждает вывод, что точность оценивания зависит не столько от объема данных, сколько от удачного подбора вектора x_0 начальных значений.

Это связано, по-видимому, с тем, что критерий оптимальности метода наименьших квадратов не является выпуклой функцией. В результате поиск оптимальных значений параметров «застревает» в одном из локальных минимумов критерия, удаленном от точного решения [211, 217, 219].

Результаты аппроксимации (Variant 1) и оценки параметров аппроксимирующих функций представлены в таблице 5.2.

Отметим, что при правильном выборе структуры моделируемой функции нелинейный метод наименьших квадратов даже для разрывных функций привел к высокому качеству аппроксимации [211, 217].

Таблица 5.2. Результаты аппроксимации (Variant 1). Оценки параметров аппроксимирующих функций:

Variant	$\varepsilon(t)$						
	x0	x(1)	x(2)	x(3)	x(4)	x(5)	rn
	---	8	6	1	1	0.01	0
1	[1,1,1,1,1]	8,0623	4,2247	1,4491	2,1217	0,3004	2,1984
	[10,5,1,1,0]	8,0332	5,9592	0,9990	0,9418	0,0112	0,0018
2	[1,1,1,1,1]	8,0508	4,8085	1,4237	1,4511	0,1896	3,6283
	[10,5,1,1,0]	8,0235	5,9722	1,0006	0,9626	0,0107	0,0016

На рисунке 5.19 приведены результаты аппроксимации, которые обозначены через y_1 для двух вариантов аппроксимации (var.1 и var.2) и двух векторов x_0 начальных значений. Графики модельных функций и их аппроксимаций иллюстрируют и подтверждают сделанные выводы.

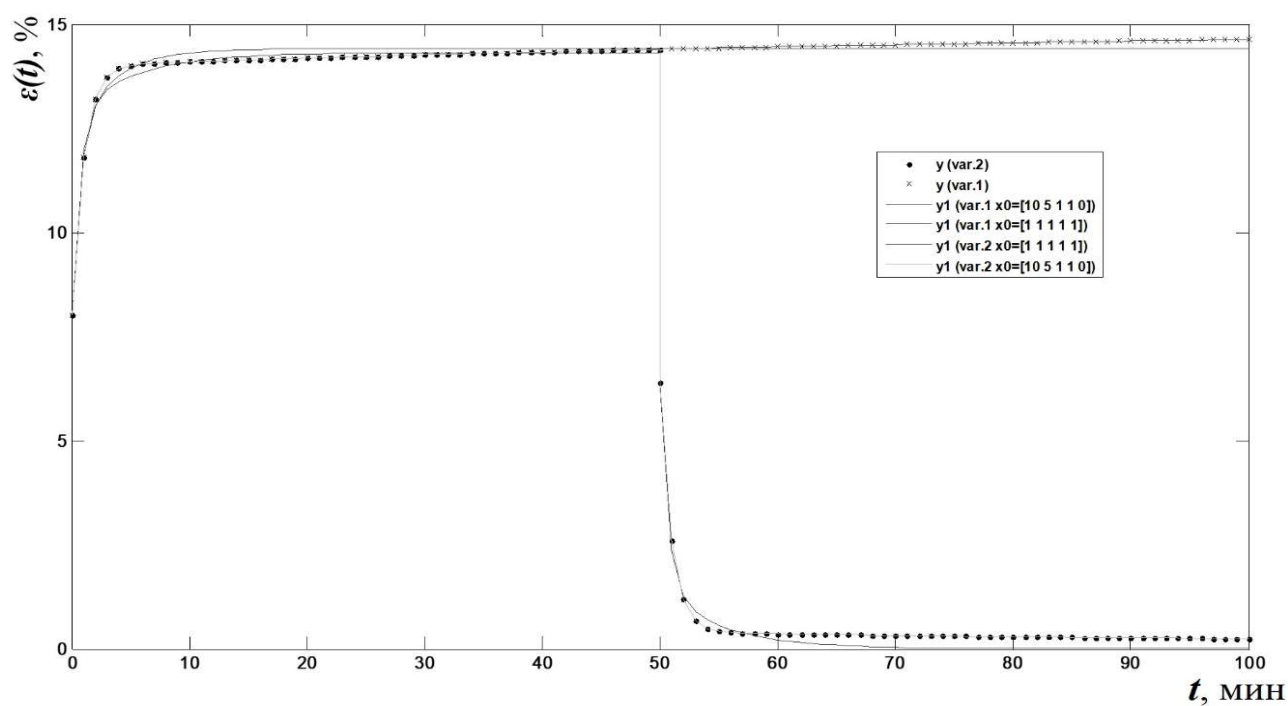


Рисунок 5.19. Результаты аппроксимации

Необратимая пластическая составляющая деформации нити практически неотличима от эластической составляющей с очень большими временами релаксации. В рассмотренном модельном примере специально были выбраны два слагаемых со значительно отличающимися временами релаксации. Первое слагаемое характеризовалось временем релаксации $T_1 = 1$, а второе – $T_2 = 100$. Такая особенность эластической деформации с большим временем релаксации позволяет исключить из модели элементы, имитирующие только пластическую составляющую и тем самым упростить модель, построив ее из математически более однородных элементов [211, 217].

Таким образом, эффект статистического усреднения результатов позволяет перейти от сложных нелинейных моделей к более простым линейным моделям. Хотя линейные динамические модели удлинения нитей не учитывают эффектов старения и разрушения под действием растягивающих нагрузок, но для определенного класса деформаций вполне адекватно описывают наблюдаемые данные и могут быть использованы в том же диапазоне деформаций при моделировании пучков нитей.

5.5. Модели с ограниченными случайными вариациями параметров

При моделировании деформации волокнистого материала под действием внешних нагрузок и возникающих в материале под их действием механических напряжений параметры моделей оцениваются по результатам экспериментов с образцами материала. Эти оценки являются приближенными значениями параметров. Сами параметры могут со временем менять свои значения. Поэтому актуальной задачей является исследование чувствительности анализируемых моделей к вариациям параметров. Главным инструментом такого исследования является выбранный закон распределения для случайных вариаций параметра [215, 219].

По физическому смыслу параметров они, как правило, могут быть только положительными и варьировать в ограниченных пределах. Обозначим P некоторый

варьируемый параметр, и P_{min} и P_{max} его минимальное и максимальное значения. Возможное распределение $f(P)$, удовлетворяющее желаемым требованиям, может быть получено "усечением" нормального распределения $N(m, s)$ со средним m и среднеквадратическим отклонением s :

$$f(P) = \begin{cases} 0, & \text{при } P < P_{min} \text{ и } P > P_{max} \\ C \cdot \exp\left(-\frac{(P-m)^2}{2s^2}\right), & \text{при } P_{min} \leq P \leq P_{max} \end{cases} \quad (5.45)$$

В этой формуле нормировочная константа C подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие нормировки распределения (5.45):

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(P) dP = 1 \quad (5.46).$$

Вычисление интеграла (5.46) приводит к следующему выражению для нормировочной константы через стандартную функцию ошибок $erf(X)$:

$$C^{-1} = s \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left(erf\left(\frac{P_{max}-m}{s\sqrt{2}}\right) - erf\left(\frac{P_{min}-m}{s\sqrt{2}}\right) \right),$$

$$\text{где } erf(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^X \exp(-t^2) dt \quad (5.47).$$

Генерация значений параметра P выполняется с помощью встроенного в Matlab генератора нормально распределенных случайных чисел `normrnd`:

```
n = 0; P = [];
while n < Nmod
z = normrnd (m, s);
if z >= Pmin && z <= Pmax P = [ P, z]; n = n + 1; end end
```

Этот алгоритм генерирует N_{mod} случайных чисел с нормальным распределением, собранных в массив P . Заметим, что как частный случай, верхняя граница P_{max} может быть равна бесконечности. Для этого из алгоритма достаточно исключить условие `&& z <= Pmax`.

К сожалению, этот алгоритм оказался весьма медленным. Поэтому можно использовать значительно более быстрый алгоритм:

clear, clc

m = 10; s = 5; Nmod = 10^6; z = normrnd(m, s, Nmod, 1);

P = z (find (z > 0)); hist (P, 100)

В этом алгоритме заранее неизвестно, сколько будет получено значений параметра P . Однако, за счет несравнимо большей скорости генерации их можно получить заведомо больше, чем необходимо, и затем использовать нужную часть выборки.

На рисунке 5.20 показана гистограмма значений P , полученная с помощью приведенного алгоритма для $P_{min} = 0$, $P_{max} = \infty$, $m = 10$ и $s = 5$ для $N_{mod} = 10^6$ выборочных значений.

Параметры m , s нормального распределения, конечно, в случае усеченного распределения (5.47) не являются соответственно математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением для P . Эти числовые характеристики могут быть, например, оценены по выборке. Большой объем выборки позволяет получить оценки с достаточной для практического применения точностью.

Другой, более удобный и, возможно, более универсальный вариант получения случайных вариаций параметра может быть реализован с помощью бета-распределения:

$$f(z|a, b) = \frac{1}{B(a, b)} \cdot z^{a-1} \cdot (1 - z)^{b-1}, 0 \leq z \leq 1 \quad (5.48).$$

В этой формуле $B(a, b)$ – бета-функция Эйлера с параметрами распределения a и b . Важными преимуществами этого распределения являются: ограниченная область определения – от 0 до 1; возможность управления формой распределения – правая, левая асимметрия, симметрия, островершинность, – за счет задания подходящих значений параметров распределения a и b . Основные числовые характеристики бета-распределения известны:

$$\begin{aligned}
M_z &= \frac{a}{(a+b)} & D_z &= \frac{a \cdot b}{(a+b+1) \cdot (a+b)^2} \\
M_{OZ} &= \frac{a-1}{a+b-2}, a > 1, b > 1 \\
CV_z &= \sqrt{\frac{b}{a \cdot (a+b+1)}}
\end{aligned}
\tag{5.49}.$$

При $a < b$ бета-распределение имеет правую асимметрию, при $a > b$ распределение имеет левую асимметрию, при $a = b$ распределение симметрично. При $a = b = 1$ бета-распределение превращается в равномерное распределение.

Для получения значений параметра P в пределах от P_{min} до P_{max} можно использовать линейное преобразование:

$$P = P_{min} + z \cdot (P_{max} - P_{min}) \tag{5.50}.$$

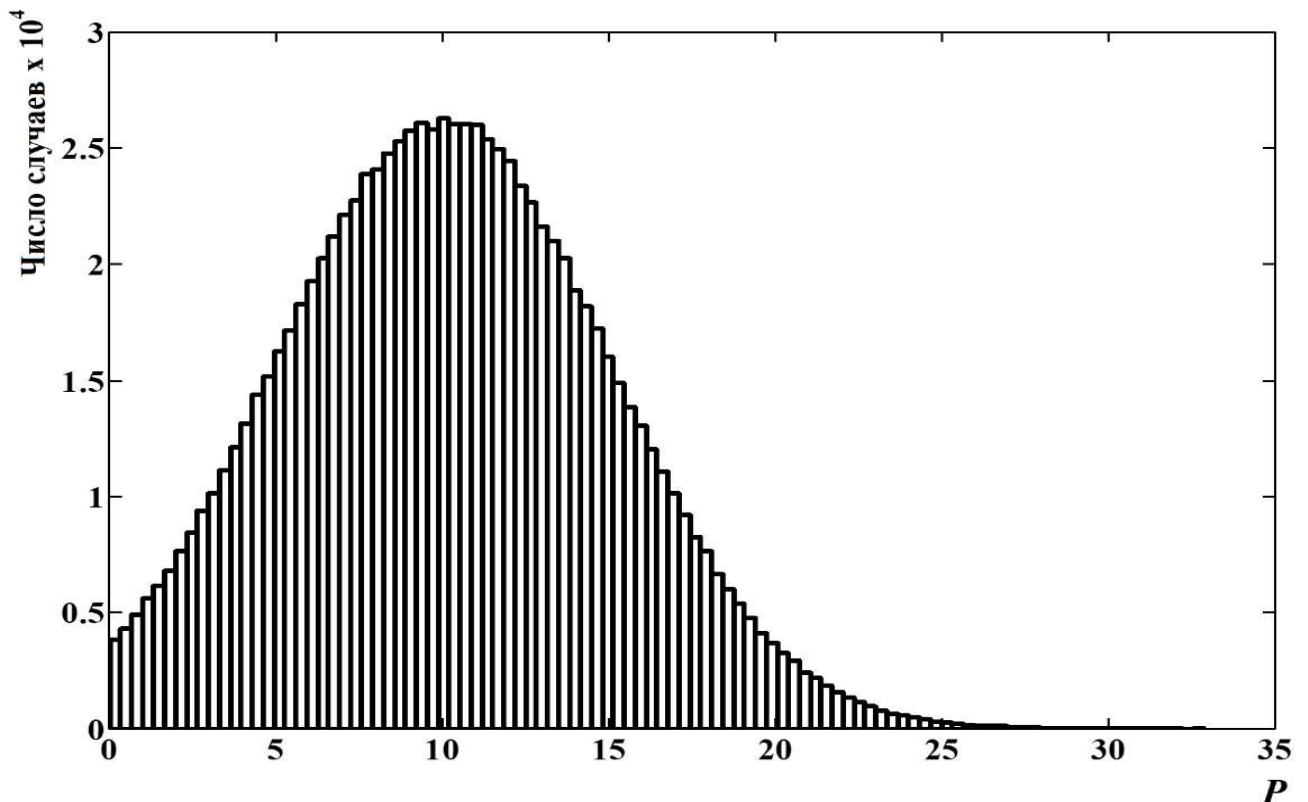


Рисунок 5.20. Гистограмма значений параметра P

Числовые характеристики распределения вариаций параметра P при этом, разумеется, изменятся, но благодаря линейности преобразования (5.50) они легко

определяются по характеристикам бета-распределения по формулам теории вероятностей.

Ниже приведен пример генерации двух выборок параметра P , полученных с помощью бета-распределений при следующих значениях параметров распределений: $N_{mod} = 10^6$, $P_{min} = 5$, $P_{max} = 10$, $a_1 = 3$, $b_1 = 2$, $a_2 = 2$, $b_2 = 3$.

```
clear, clc
```

```
Nmod = 1000000; Pmin = 5; Pmax = 10;
```

```
a1 = 6; b1 = 3; a2 = 3; b2 = 6;
```

```
P1 = Pmin + (Pmax - Pmin) * betarnd ( a1, b1, Nmod, 1);
```

```
P2 = Pmin + (Pmax - Pmin) * betarnd ( a2, b2, Nmod, 1);
```

```
hist (P1, 100); hold on, hist (P2, 100)
```

Соответствующие гистограммы показаны на рисунке 5.21.

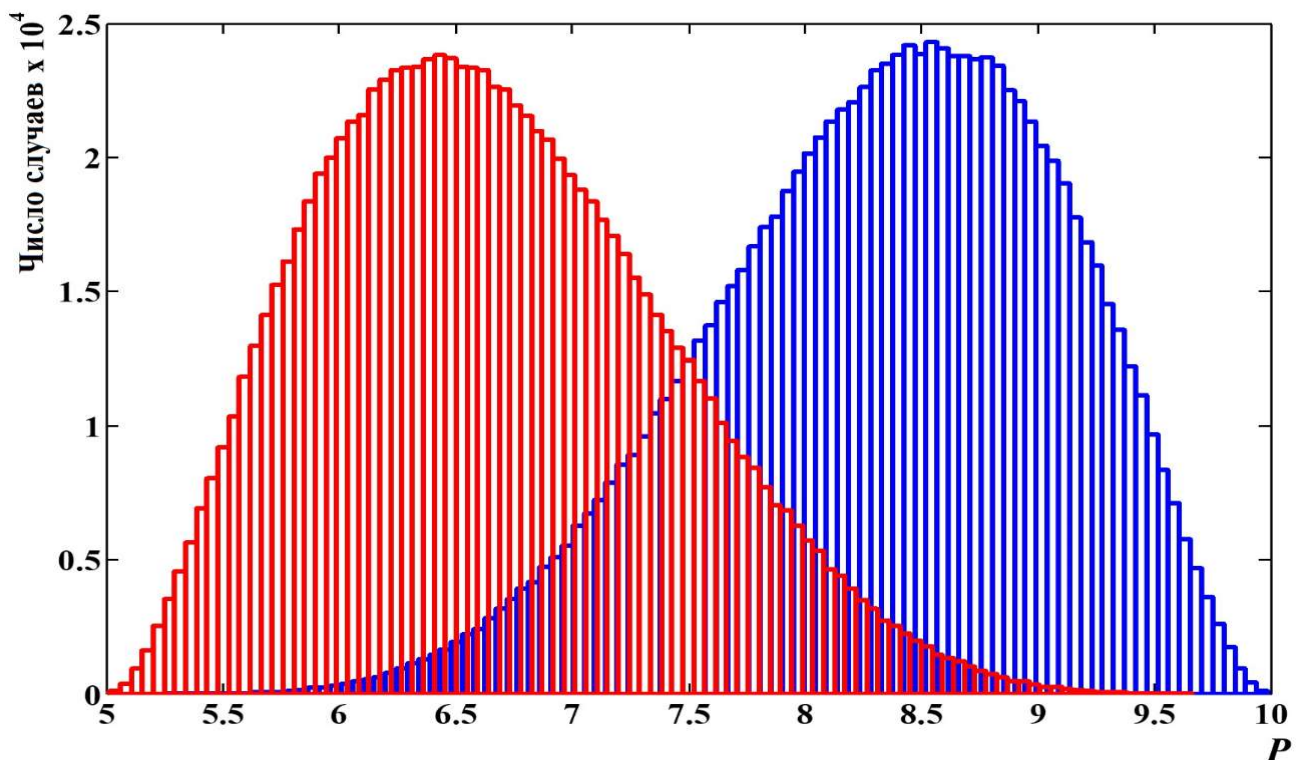


Рисунок 5.21. Гистограммы модельных выборок для вариаций параметра s применением бета-распределения

Выводы по главе 5

1. Осуществлен анализ классических и современных многопараметрических моделей связи между нагрузкой и деформацией различных материалов: линейно упругих, нелинейно упругих, эластических, пластических. Модели рассмотрены с точки зрения возможности их применения для описания механических свойств волокнистых материалов при одномерных деформациях и нагрузках.

2. С учетом статистического рассеяния значений параметров моделей и неопределенности их значений для многих материалов методами статистического компьютерного моделирования выполнено исследование зависимости механических характеристик материала, описываемых разными моделями, от случайных вариаций этих параметров. Установлено, что статистический разброс значений параметров моделей: коэффициентов упругости, вязкости, времени релаксации, и др. — приводит к асимметричным распределениям величин деформации образцов. Поэтому предложено при обработке результатов экспериментов вместо традиционно используемых средних значений использовать медианные оценки, а вместо среднеквадратических оценок рассеивания использовать более робастные оценки интердецильного размаха.

3. При статистическом моделировании зависимостей "нагрузка — деформация" установлено, что результаты деформации материала зависят не только от усредненных показателей, но и от формы распределения. Отсюда получен вывод о необходимости при изучении свойств материала оценивать не только числовые характеристики, но и их распределения.

4. Статистическое моделирование деформации с помощью модели Сен-Венана показало, что статистический разброс параметров приводит к результатам, не сильно отличающимся от результатов для модели Ньютоновской жидкости, т.е. модели вязкого трения. Это позволяет заменить в моделях волокнистых материалов нелинейную модель Сен-Венана на линейную модель Ньютона, что упрощает исследование процесса деформации материала.

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛУЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из наиболее часто используемых методов экспериментального исследования механических свойств волокнистого продукта является так называемое полуцикловое испытание. Образец материала, как правило, прямоугольной формы помещается в зажимы испытательного прибора (разрывной машины). Один из зажимов – неподвижный, второй – подвижный. При полуцикловом испытании подвижный зажим перемещается в одном направлении, и образец удлиняется. Как правило, удлинение образца производится до его разрыва.

По ходу испытания осуществляется регистрация нескольких показателей. Это, например, могут быть величины удлинения образца, поперечной ширины образца, силы сопротивления образца удлинению, времени регистрации каждого значения, работы сил сопротивления удлинению, и др. Список регистрируемых показателей и форма представления результатов зависят от возможностей измерительного прибора, вторичных автоматических систем, встроенных в прибор, и условий испытания, заданных исследователем.

В зависимости от конструкции прибора перемещение подвижного зажима во времени может производиться по-разному. Например, испытание производится при постоянной скорости удлинения. В этом случае абсолютная деформация растяжения образца нарастает линейно во времени, сила же сопротивления, а, следовательно, и механическое напряжение в испытываемом образце, изменяется во времени в зависимости от механических свойств материала.

В другом варианте эксперимента сила, удлиняющая образец, остается постоянной за все время испытания. При этом удлинение образца изменяется в зависимости от механических свойств и способности образца сопротивляться действию приложенной силовой нагрузки. Возможен и вариант испытания, при котором нагрузка монотонно линейно нарастает, а величины деформации и другие характеристики регистрируются во времени по мере роста нагрузки.

Заметим, что условия всех видов испытаний законодательно регламентируются соответствующими ГОСТами и ТУ. Вместе с тем, для целей научного исследования условия испытаний образцов могут отличаться от этих регламентов, если испытательный прибор позволяет реализовать эти другие условия эксперимента.

6.1. Методика обработки полученных результатов статистическими методами

При исследовании механических свойств текстильных материалов в соответствии с ГОСТ или ТУ на проведение таких исследований испытанию подвергается несколько образцов, отобранных по описанным в этих стандартах условиям. При этом типичной моделью результатов этих испытаний являются так называемые парные выборки, т.е. конечные последовательности значений двух измеренных величин, например, относительного удлинения и относительного сопротивления образца этому удлинению [218-220]. Такие парные выборки удобно представить в виде:

$$\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_1 \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_2 \quad \dots \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{nj} \right\}_j, j = 1, \dots, N$$

В этом выражении x и y – парные значения двух переменных, зависимость между которыми исследуется; N – количество испытанных образцов; nj – количество пар значений, полученных при испытании j -го образца [220-225].

Отметим, что во многих случаях современные испытательные приборы позволяют получать одновременно не парные, а множественные выборки, когда для одного и того же значения переменной x получают значения сразу для нескольких показателей $y, u, v, \dots$

Специфика получаемых экспериментальных данных состоит в том, что для однородных образцов и при одинаковых условиях испытаний как количество элементов в каждой парной выборке nj , так и сами значения x и y отличаются. Однако при этом точки $(x; y)$ на плоскости, как правило, для каждого образца ложатся на достаточно гладкую, закономерную кривую, причем, хотя эти кривые для разных образцов могут сильно расходиться между собой, общий вид этих кривых и закономерность, которую они описывают, являются близкими, подобными [220-225]. Это явление обуславливает необходимость и возможность специфического под-

хода к обработке данных по результатам эксперимента с целью повышения их точности и извлечения максимума информации из полученных значений.

В связи со сказанным предлагается следующая методика обработки этих результатов испытаний (парных выборок):

– Для каждой парной выборки (для каждого образца) методами регрессионного анализа (линейного или нелинейного) [225] подбирают наиболее близкую эмпирическую регрессионную модель, описывающую зависимость переменной y от x с минимальным числом неизвестных коэффициентов регрессии. При этом для всех парных выборок, т.е. для всех испытанных образцов используют одну и ту же форму регрессионной модели, которые для разных образцов будут отличаться только оценками коэффициентов регрессии и качеством подбора модели.

– Найденные точечные, а в некоторых случаях и интервальные оценки коэффициентов регрессии усредняют по образцам и тем самым получают усредненную модель регрессионной зависимости y от x для испытываемого типа материала. Такие оценки получаются более точными, чем при объединении всех парных выборок в одно множество и оценивание регрессионной модели непосредственно по всему этому множеству значений для всех образцов. Это объясняется меньшим разбросом оценок коэффициентов по сравнению с разбросом отдельных данных.

– Для обеспечения большей близости данных для разных образцов имеет смысл предварительно, до проведения регрессионного анализа данных, подвергнуть результаты испытаний, т.е. парную выборку, кодированию и масштабированию. Кодирование предполагает переход к безразмерным переменным, а масштабирование предполагает перевод экспериментальных значений в диапазон от 0 до 1. Обе операции могут быть выполнены одновременно с помощью формул преобразования [225]:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{i=1, \dots, nj} \{x_{ij}\}}{\max_{i=1, \dots, nj} \{x_{ij}\} - \min_{i=1, \dots, nj} \{x_{ij}\}}, i = 1, \dots, nj; j = 1, \dots, N$$

$$Y_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_{i=1, \dots, nj} \{y_{ij}\}}{\max_{i=1, \dots, nj} \{y_{ij}\} - \min_{i=1, \dots, nj} \{y_{ij}\}}, i = 1, \dots, nj; j = 1, \dots, N$$
(6.1),

Очевидно, что при таком преобразовании экспериментальных данных при любой размерности переменных x и y и любом диапазоне их значений кодированные и отмасштабированные переменные X и Y будут безразмерными и варьировать в диапазоне от 0 до 1 [225].

– При выборе регрессионной модели исходили из высказанных выше предположений: зависимость x и y должна во всем диапазоне физически актуальных значений описывается одним аналитическим выражением с минимально возможным количеством неизвестных коэффициентов регрессии, которые необходимо оценивать по экспериментальным данным.

Описанная методика может быть формализована следующим образом. Обозначим $Y_p = \Phi(x, C_1, \dots, C_k)$ регрессионную модель зависимости y от x с неизвестными коэффициентами регрессии $C_1, \dots, C_k$. Тогда в соответствии с методом наименьших квадратов точечные оценки этих коэффициентов получим, решая задачу поиска минимума квадратичного критерия качества подбора регрессионной модели [225]:

$$Wq_i(C_{1i}, \dots, C_{ki}) = \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \Phi(x_{ij}, C_{1i}, \dots, C_{ki}))^2 \rightarrow \min_{C_{1i}, \dots, C_{ki}} \quad (6.2).$$

Как известно, критерий наименьших квадратов оптимален в случае чисто случайных и нормально распределенных ошибок наблюдения. Поскольку гарантировать не только соблюдение, но и проверку этих требований в условиях реальных экспериментов невозможно, вместо критерия наименьших квадратов рекомендуется использовать альтернативные робастные критерии [220-225]:

критерий наименьших абсолютных разностей:

$$Wa_i(C_{1i}, \dots, C_{ki}) = \sum_{j=1}^n |y_{ij} - \Phi(x_{ij}, C_{1i}, \dots, C_{ki})| \rightarrow \min_{C_{1i}, \dots, C_{ki}} \quad (6.3),$$

или минимаксный критерий:

$$Wm_i(C_{1i}, \dots, C_{ki}) = \max_{j=1 \dots n} |y_{ij} - \Phi(x_{ij}, C_{1i}, \dots, C_{ki})| \rightarrow \min_{C_{1i}, \dots, C_{ki}} \quad (6.4),$$

которые менее чувствительны к «выбросам» отдельных значений « y ».

Поскольку регрессионные модели $Y_{pi} = \Phi(x_i, C_{1i}, \dots, C_{ki})$, скорее всего, являются нелинейными функциями относительно коэффициентов регрессии $C_{1i}, \dots, C_{ki}$, решение задачи минимизации критерия (6.2), (6.3) или (6.4) выполняется численными методами, для которых в большинстве случаев аналитическая форма критерия не имеет принципиального значения.

Если оценки коэффициентов регрессии одной и той же регрессионной модели, полученные по экспериментальным значениям для разных образцов исследуемого материала, оказываются близкими, то для вычисления усредненной оценки каждого коэффициента можно использовать среднее арифметическое значение:

$$C_{1,\dots,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{(1,\dots,k)i} \quad (6.5).$$

Если разброс оценок коэффициентов регрессии вызывает подозрение в неоднородности оценок (большой разброс оценок или асимметричный разброс), то для вычисления усредненной оценки предпочтительнее использовать не среднее арифметическое значение оценок, а их медианное значение.

Поскольку для однородных значений медиана и среднее арифметическое практически совпадают, то медианная оценка усредненного значения оценки коэффициента регрессии является в любом случае более предпочтительной [220-225]:

$$C_{1,\dots,k} = \underset{i=1,\dots,N}{median}(C_{(1,\dots,k)i}) \quad (6.6).$$

Ниже приведены примеры применения описанной методики к результатам полцикловых испытаний некоторых текстильных материалов на прочность до разрыва при одномерном растяжении прямоугольных образцов.

Поскольку количество образцов, как правило, незначительно (десять и менее), то полученных оценок недостаточно для надежного осредненного оценивания. В этих случаях рекомендуется применять метод размножения выборок – так называемый бутстреп-метод (bootstrap-method) [222]. Суть бутстреп-метода заключается в увеличении объема выборки за счет размножения значений исходной выборки и получения по размноженным выборкам уточненных оценок. Поскольку

размножение выборки и ее обработка – это чисто машинная (компьютерная) процедура, то и осуществляется она с помощью компьютерных программ, обычно встроенных в программные средства обработки данных. Мы использовали для этих целей программные инструменты системы Matlab [225].

6.2. Статистическое моделирование экспериментальных данных

В качестве примера для разработки компьютерной статистической модели имитации результатов натурных исследований текстильных материалов рассмотрим результаты полуцикловых испытаний нетканого материала. Сведения о нетканом материале приведены в таблице 6.1 [225].

Таблица 6.1. Механические характеристики нетканого материала

Нетканое полотно «Слайтекс»	ФРЗ – 200 г. м ² – 1.0 п.м. Дата испытаний 19.01.2022	
Наименование показателя, ед. изм.	Результат	Метод испытаний
Вид и массовая доля волокон, %	Окисленное полиакрилонитрильное волокно – 78.8 ПЭ – 21.2	ГОСТ ИСО 1833-2001
Разрывная нагрузка, Н		ГОСТ 15902.3-79
– по длине	26,5	
– по ширине	8,3	
Удлинение при разрыве, %		ГОСТ 15902.3-79
– по длине	22,5	
– по ширине	38,3	
Неровнота по массе, %	3,1	ГОСТ 15902.2-2003
Устойчивость к многократному сжатию, %	92,2	ГОСТ Р 57027-2016 п.7.7
Миграция волокон утеплителя через ткань СТ-31Ф ОП (100% хлопок + антистатическая нить) на площади 150 см ² , количество	2	ГОСТ 12.4.303-2016, п.6.16

На рисунке 6.1 приведены диаграммы испытаний 10 образцов нетканого материала. Образцы Д1-Д4 испытывались по длине материала, образцы Ш1-Ш6 испытывались по ширине материала. Начальная длина образцов 100 мм. По оси абсцисс отложено длина образца в мм при удлинении, по оси ординат – сила сопротивления образца удлинению в Н.

Рисунок 6.1 наглядно отображает отмеченные выше особенности подлежащих обработке экспериментальных результатов. Для компьютерного моделирования такого рода экспериментальных данных использовано базовое математическое выражение в виде дробно-степенной функции:

$$P = A \frac{E \cdot S - S^B}{1 + C \cdot S^D} \quad (6.7).$$

В этой формуле P – сила сопротивления деформации, S – величина абсолютного удлинения образца, $A, \dots, E$ – постоянные параметры модели. Большое число параметров позволяет смоделировать унимодальные кривые, подобные, приведенным на рисунке 6.1, с различными особенностями формы.

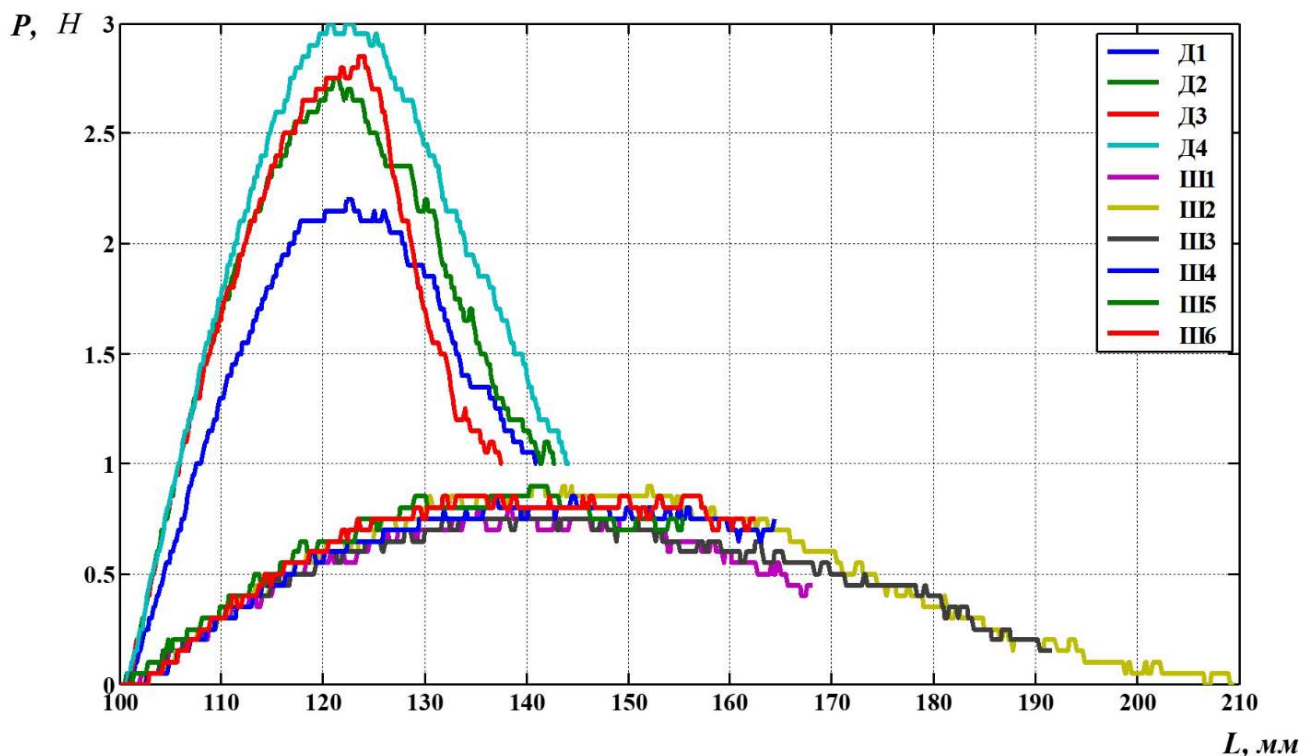


Рисунок 6.1. Диаграммы испытаний 10 образцов нетканого материала [210]

Например, для $0 \leq S \leq 1$ при $A=0.5$; $B=3$; $C=10$; $D=30$; $E=4$ получим кривую 1, при $A=2$; $B=4$; $C=3$; $D=2$; $E=2$ получим кривую 2, а при $A=0.1$; $B=1.1$; $C=20$; $D=80$; $E=15$ – кривую 3, представленные на рисунке 6.2.

Для получения случайных вариаций в модельных значениях достаточно добавить случайную аддитивную компоненту к величинам P и значениям S . Моделирующий скрипт в системе Matlab имеет вид:

```
% модель полуциклового испытания
clear, clc; S=0:0.01:1; A=0.5; B=3; C=10; D=15; E=4;
P = A*(E*S-S.^B). / (1 + C*S.^D);
% рандомизация данных
zS=unifrnd (-0.3,0.3); zP=normrnd(0,0.05*P);
Sr1=S*(1+zS); Pr1=P+zP;
zS=unifrnd(-0.3,0.36); zP=normrnd(0,0.05*P);
Sr2=S*(1+zS); Pr2=P+zP;
zS=unifrnd (-0.3,0.3); zP=normrnd(0,0.05*P);
Sr3=S*(1+zS); Pr3=P+zP;
Plot (S, P, Sr1, Pr1, Sr2, Pr2, Sr3, Pr3)
```

В этом скрипте абсолютное удлинение образца S лежит в пределах от 0 до 1. Случайные вариации в значения удлинения имитируются генератором равномерно распределенных случайных чисел (функция `unifrnd`) в диапазоне от -0.3 до +0.3. Эти случайные значения задают долю увеличения (или уменьшения, если $zS < 0$) величины приращения для моделируемого образца.

Случайные вариации zP силы сопротивления образца удлинению имитируются генератором нормально распределенных случайных чисел (функция `normrnd`) при нулевом среднем значении и коэффициенте вариации, равном $0.05 = 5\%$. Эти значения случайны на каждом этапе удлинения, и значений генерируется столько же, сколько моделируется значений S и, соответственно, P . Они добавляются к базовым модельным значениям функции P и дают рандомизированные значения Pz . В приведенном выше скрипте рандомизация повторяется трижды, для трех моделируемых образцов.

Полученный с помощью скрипта модельный график показан на рисунке 6.3. На нем изображены базовая модельная функция зависимости $P(S)$ и три рандомизированные реализации модели.

Для перехода к кодированным значениям и масштабирования модельных значений преобразуем модельные данные в соответствии с формулами (6.7). После этих преобразований графики реализаций, показанные на рисунок 6.3, приобретают вид, показанный на рисунке 6.4.

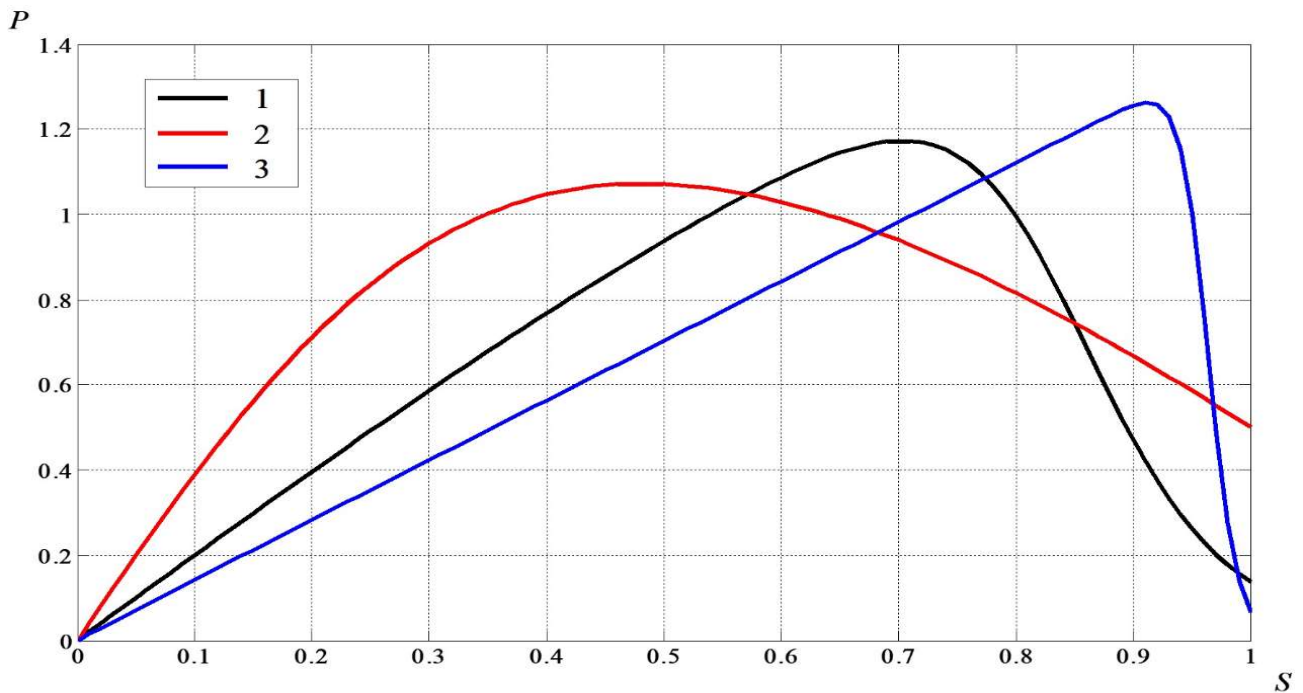


Рисунок 6.2. Случайные вариации для $0 \leq S \leq 1$ при $A=0.5$; $B=3$; $C=10$; $D=30$; $E=4$ получим кривую 1, при $A=2$; $B=4$; $C=3$; $D=2$; $E=2$ получим кривую 2, а при $A=0.1$; $B=1.1$; $C=20$; $D=80$; $E=15$ – кривую 3 (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Поскольку масштабирование размещает каждую кривую в границах квадрата со сторонами $(0 - 1)$, то рандомизированные реализации оказываются ниже базовой кривой. Масштабирование показывает, что реализации описываются одинаковыми функциональными зависимостями, а влияние рандомизации может быть если не исключено, то, по крайней мере, ослаблено.

Результаты компьютерного имитационного эксперимента в исходном ($Sr1$; $Pr1$) и кодированном ($Sc1$; $Pc1$) виде для реализации 1 представлены в таблице 6.2.

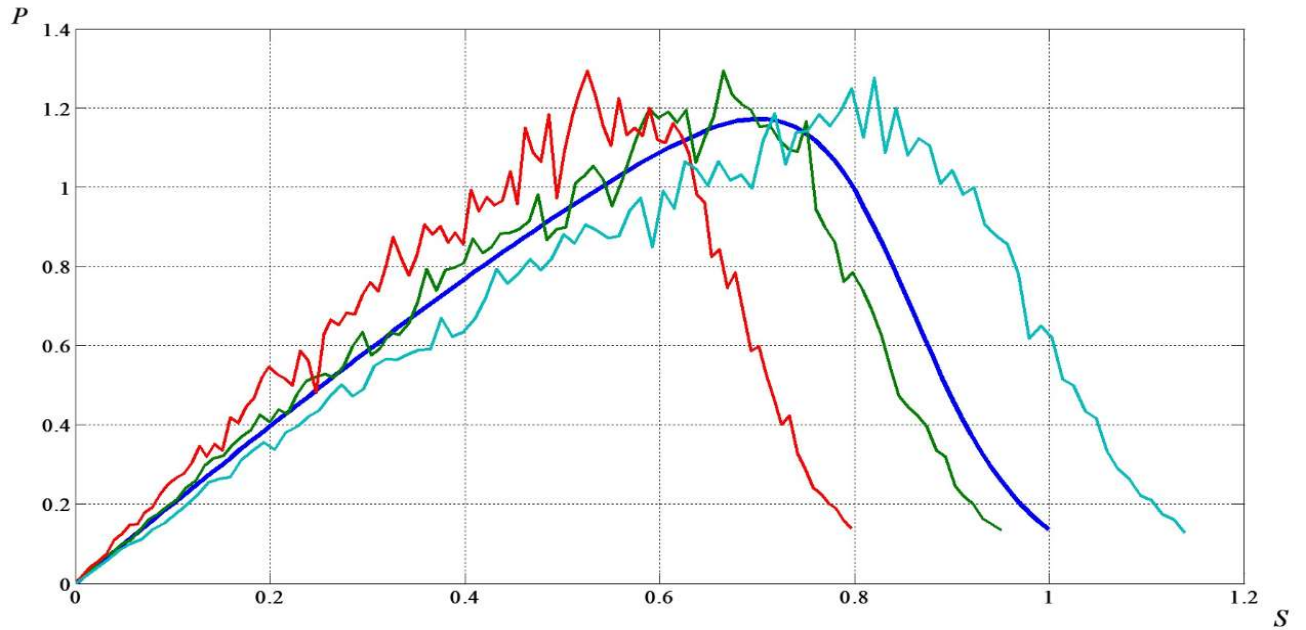


Рисунок 6.3. Изображение базовой модельной функция зависимости $P(S)$ и три рандомизированные реализации модели (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

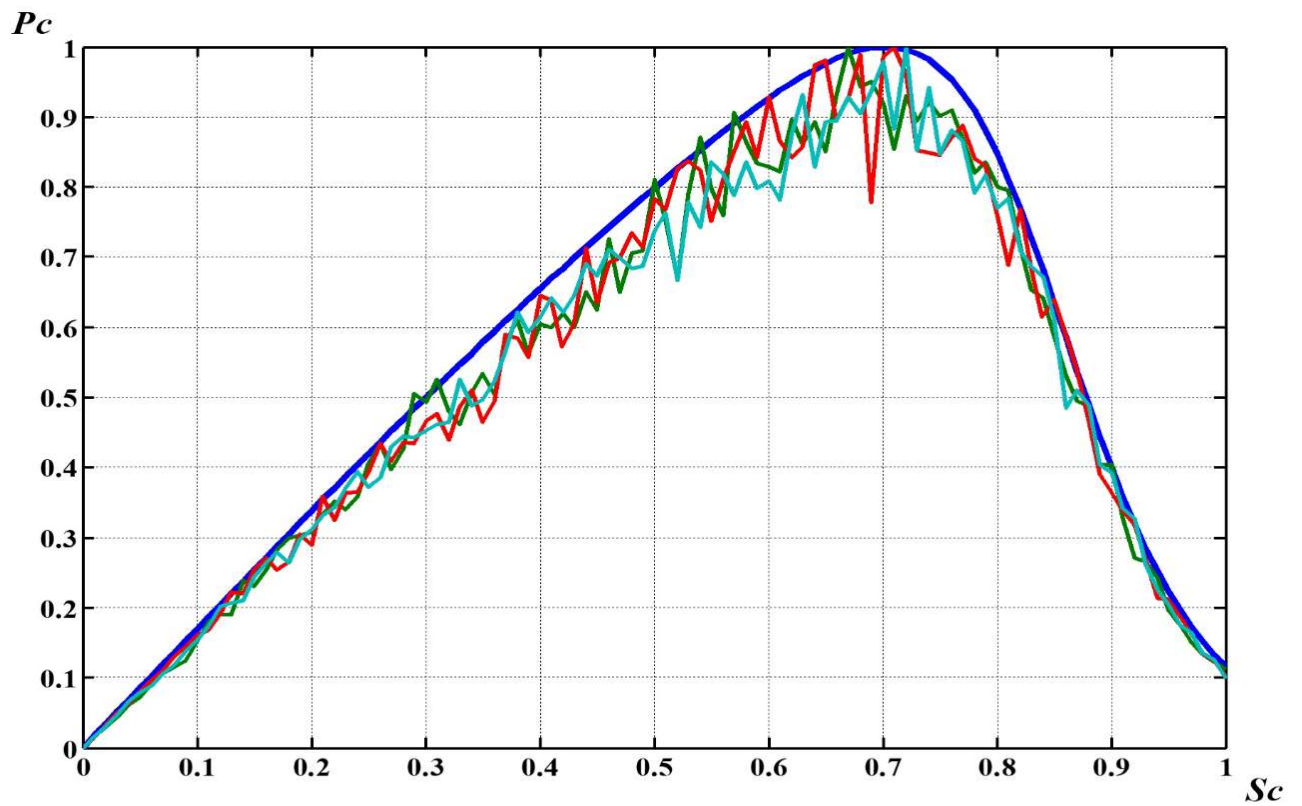


Рисунок 6.4. Преобразование кодированных значений и масштабирования модельных значений (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Таблица 6.2. Результаты компьютерного имитационного моделирования для образца 1

Sr1	Pr1	Sc1	Pc1	Sr1	Pr1	Sc1	Pc1
1	2	3	4	5	6	7	8
0,000	0,000	0,000	0,000	0,516	1,027	0,500	0,810
0,010	0,020	0,010	0,016	0,526	0,956	0,510	0,754
0,021	0,038	0,020	0,030	0,536	0,847	0,520	0,668
0,031	0,056	0,030	0,044	0,547	1,001	0,530	0,789
0,041	0,079	0,040	0,062	0,557	1,106	0,540	0,872
0,052	0,090	0,050	0,071	0,567	1,013	0,550	0,798
0,062	0,116	0,060	0,091	0,578	0,963	0,560	0,759
0,072	0,134	0,070	0,106	0,588	1,149	0,570	0,906
0,083	0,147	0,080	0,116	0,598	1,098	0,580	0,865
0,093	0,158	0,090	0,125	0,609	1,057	0,590	0,833
0,103	0,195	0,100	0,153	0,619	1,051	0,600	0,828
0,113	0,227	0,110	0,179	0,629	1,044	0,610	0,823
0,124	0,240	0,120	0,189	0,639	1,136	0,620	0,896
0,134	0,242	0,130	0,190	0,650	1,093	0,630	0,861
0,144	0,303	0,140	0,239	0,660	1,133	0,640	0,893
0,155	0,293	0,150	0,231	0,670	1,079	0,650	0,850
0,165	0,322	0,160	0,254	0,681	1,180	0,660	0,930
0,175	0,358	0,170	0,282	0,691	1,269	0,670	1,000
0,186	0,379	0,180	0,299	0,701	1,197	0,680	0,943
0,196	0,383	0,190	0,302	0,712	1,205	0,690	0,949
0,206	0,391	0,200	0,308	0,722	1,168	0,700	0,921
0,217	0,423	0,210	0,333	0,732	1,084	0,710	0,854
0,227	0,447	0,220	0,352	0,743	1,181	0,720	0,931
0,237	0,432	0,230	0,340	0,753	1,136	0,730	0,895
0,248	0,454	0,240	0,358	0,763	1,168	0,740	0,921
0,258	0,514	0,250	0,405	0,774	1,144	0,750	0,902
0,268	0,550	0,260	0,433	0,784	1,153	0,760	0,909
0,278	0,503	0,270	0,396	0,794	1,103	0,770	0,869

Окончание Таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8
0,289	0,540	0,280	0,426	0,804	1,041	0,780	0,821
0,299	0,640	0,290	0,505	0,815	1,060	0,790	0,836
0,309	0,626	0,300	0,493	0,825	1,015	0,800	0,800
0,320	0,666	0,310	0,525	0,835	1,009	0,810	0,795
0,330	0,608	0,320	0,479	0,846	0,905	0,820	0,714
0,340	0,586	0,330	0,462	0,856	0,828	0,830	0,653
0,351	0,644	0,340	0,508	0,866	0,813	0,840	0,641
0,361	0,677	0,350	0,534	0,877	0,746	0,850	0,588
0,371	0,639	0,360	0,504	0,887	0,673	0,860	0,530
0,382	0,734	0,370	0,579	0,897	0,627	0,870	0,494
0,392	0,773	0,380	0,609	0,908	0,617	0,880	0,486
0,402	0,713	0,390	0,562	0,918	0,513	0,890	0,405
0,413	0,767	0,400	0,605	0,928	0,511	0,900	0,403
0,423	0,760	0,410	0,599	0,939	0,415	0,910	0,327
0,433	0,786	0,420	0,619	0,949	0,344	0,920	0,271
0,443	0,761	0,430	0,600	0,959	0,337	0,930	0,266
0,454	0,825	0,440	0,650	0,969	0,306	0,940	0,241
0,464	0,792	0,450	0,624	0,980	0,250	0,950	0,197
0,474	0,921	0,460	0,726	0,990	0,222	0,960	0,175
0,485	0,825	0,470	0,650	1,000	0,191	0,970	0,150
0,495	0,895	0,480	0,705	1,011	0,170	0,980	0,134
0,505	0,900	0,490	0,709	1,021	0,154	0,990	0,122
				1,031	0,143	1,000	0,112

В качестве подходящей регрессионной модели для данных, показанных на рисунке 6.3, можно использовать выражение, более простое, чем базовая модель (6.7) [225]:

$$P = a \frac{s}{1+b \cdot s^c} \quad (6.8).$$

Для построения этой модели используем численные методы, например, инструментальный cftool системы Matlab.

На рисунке 6.5 показаны экспериментальные значения для первого образца $\{Sr, Pr\}$, взятые из рисунка 6.3 и таблицы 6.2, построенная по ним линия регрессионной модели и верхняя и нижняя границы 95%-е доверительной области для этой модели.

Из протокола регрессионного анализа следует, что модель имеет вид:

$$P_c = 1.47 \frac{Sc}{1 + 10,9 \cdot Sc^{13,8}} \quad (6.9).$$

Для коэффициентов регрессии получены точечные и интервальные оценки, показанные в таблице 6.3.

Качество подбора модели оценивалось по квадрату коэффициента детерминации, который для данной модели равен $R^2 = 0,987$. Значение этого критерия, близкое к 1, говорит о том, что более 98% всей вариабельности функции отклика учтено и описывается построенной регрессионной моделью.

По каждому образцу для всех данных, т.е. для всех уровней фактора подбираем одну и ту же аналитическую зависимость (нелинейную регрессионную модель), описывающую достаточно точно эти данные, но с разными оценками параметров (коэффициентов регрессии). Если в качестве оценки вариабельности данных использовать оценку остаточной дисперсии, то при этом можно получить не только точечные оценки этих коэффициентов, но и их интервальные оценки. Наличие интервальных оценок по каждому образцу позволяет найти оценки параметров в целом для испытываемого материала и сделать научно обоснованные выводы о его механических характеристиках.

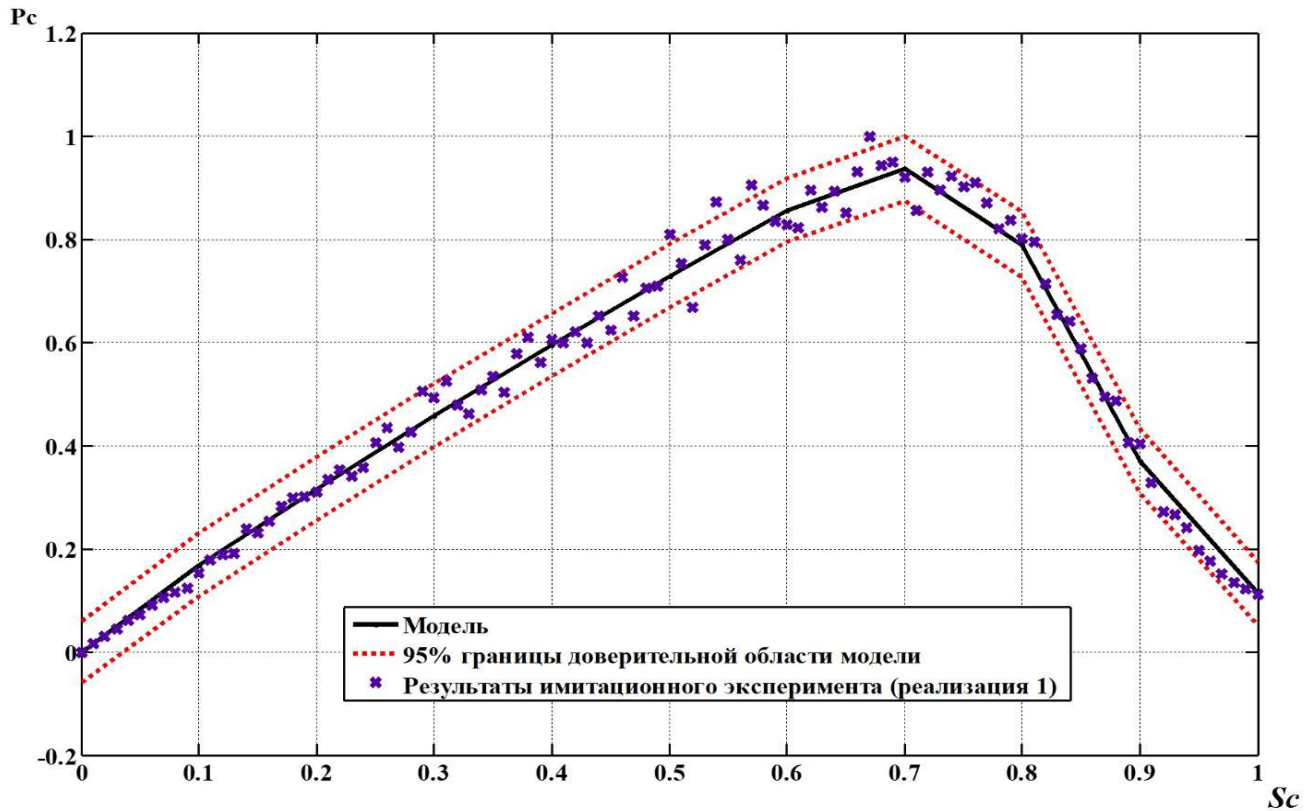


Рисунок 6.5. Экспериментальные значения для первого образца $\{Sr, Pr\}$, взятые из рисунка 6.3 и таблицы 6.2 (1-я реализация) (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Таблица 6.3. Значения коэффициентов регрессии

Коэффициент	Точечная оценка	95%-е интервальные оценки
a	1.466	(1.445, 1.487)
b	10.89	(9.504, 12.28)
c	13.78	(12.98, 14.58)

Повторим эту обработку для второго образца с данными из таблицы 6.4. Графически результаты моделирования данных и регрессионного анализа показаны на рисунке 6.6.

Таблица 6.4. Результаты компьютерного имитационного моделирования для образца 2

Sr2	Pr2	Sc2	Pc2	Sr2	Pr2	Sc2	Pc2
1	2	3	4	5	6	7	8
0,000	0,000	0,000	0,000	0,396	0,961	0,510	0,767
0,008	0,018	0,010	0,015	0,403	1,035	0,520	0,827
0,016	0,041	0,020	0,033	0,411	1,049	0,530	0,838
0,023	0,063	0,030	0,050	0,419	1,031	0,540	0,823
0,031	0,080	0,040	0,064	0,427	0,941	0,550	0,752
0,039	0,100	0,050	0,080	0,434	1,016	0,560	0,811
0,047	0,121	0,060	0,097	0,442	1,065	0,570	0,850
0,054	0,138	0,070	0,110	0,450	1,117	0,580	0,892
0,062	0,163	0,080	0,130	0,458	1,055	0,590	0,843
0,070	0,180	0,090	0,144	0,465	1,162	0,600	0,928
0,078	0,202	0,100	0,162	0,473	1,085	0,610	0,867
0,085	0,210	0,110	0,168	0,481	1,054	0,620	0,842
0,093	0,240	0,120	0,192	0,489	1,073	0,630	0,857
0,101	0,277	0,130	0,222	0,496	1,218	0,640	0,973
0,109	0,275	0,140	0,220	0,504	1,227	0,650	0,980
0,116	0,318	0,150	0,254	0,512	1,120	0,660	0,894
0,124	0,338	0,160	0,270	0,520	1,160	0,670	0,926
0,132	0,317	0,170	0,253	0,528	1,238	0,680	0,989
0,140	0,332	0,180	0,265	0,535	0,973	0,690	0,778
0,147	0,381	0,190	0,305	0,543	1,233	0,700	0,985
0,155	0,362	0,200	0,289	0,551	1,252	0,710	1,000
0,163	0,448	0,210	0,358	0,559	1,203	0,720	0,961
0,171	0,407	0,220	0,325	0,566	1,068	0,730	0,853
0,178	0,454	0,230	0,363	0,574	1,063	0,740	0,849
0,186	0,457	0,240	0,365	0,582	1,058	0,750	0,845
0,194	0,492	0,250	0,393	0,590	1,090	0,760	0,871
0,202	0,544	0,260	0,434	0,597	1,113	0,770	0,889
0,209	0,511	0,270	0,408	0,605	1,052	0,780	0,840

Окончание Таблицы 6.4

1	2	3	4	5	6	7	8
0,217	0,545	0,280	0,436	0,613	1,040	0,790	0,831
0,225	0,545	0,290	0,435	0,621	0,950	0,800	0,758
0,233	0,583	0,300	0,466	0,628	0,862	0,810	0,689
0,240	0,597	0,310	0,477	0,636	0,962	0,820	0,768
0,248	0,550	0,320	0,439	0,644	0,857	0,830	0,684
0,256	0,608	0,330	0,486	0,652	0,769	0,840	0,615
0,264	0,640	0,340	0,511	0,659	0,800	0,850	0,639
0,272	0,582	0,350	0,465	0,667	0,735	0,860	0,587
0,279	0,620	0,360	0,495	0,675	0,675	0,870	0,539
0,287	0,737	0,370	0,589	0,683	0,581	0,880	0,464
0,295	0,732	0,380	0,585	0,690	0,490	0,890	0,391
0,303	0,698	0,390	0,558	0,698	0,460	0,900	0,367
0,310	0,808	0,400	0,645	0,706	0,423	0,910	0,338
0,318	0,798	0,410	0,638	0,714	0,397	0,920	0,317
0,326	0,716	0,420	0,572	0,721	0,337	0,930	0,270
0,334	0,757	0,430	0,604	0,729	0,266	0,940	0,213
0,341	0,892	0,440	0,712	0,737	0,264	0,950	0,211
0,349	0,794	0,450	0,634	0,745	0,234	0,960	0,187
0,357	0,868	0,460	0,693	0,752	0,204	0,970	0,163
0,365	0,875	0,470	0,699	0,760	0,168	0,980	0,134
0,372	0,919	0,480	0,734	0,768	0,156	0,990	0,125
0,380	0,893	0,490	0,713	0,776	0,128	1,000	0,102
				0,396	0,961	0,510	0,767

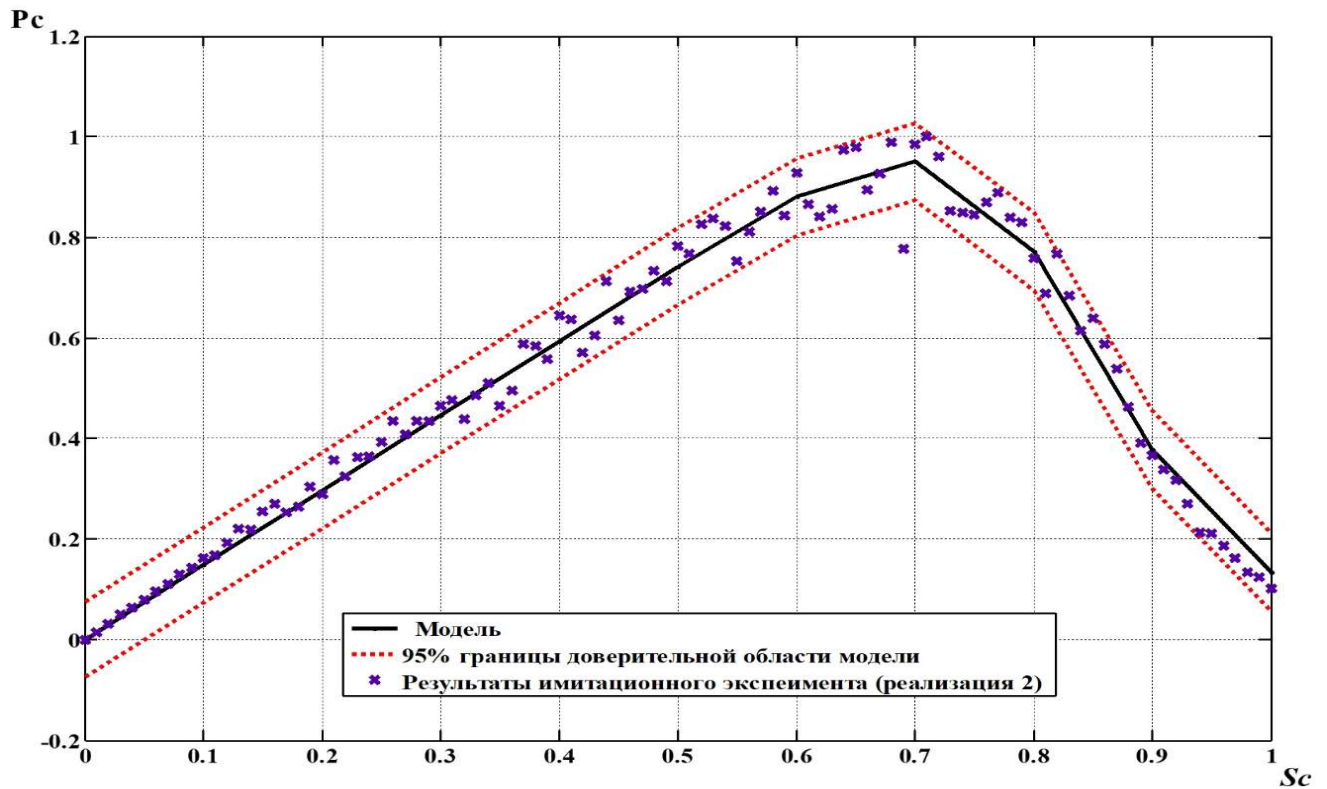


Рисунок 6.6. Результаты моделирования данных и регрессионного анализа для образца 2. (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для этого образца приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для образца 2

Коэффициент	Точечная оценка	Интервальная оценка
a	1.486	(1.461, 1.51)
b	10.10	(8.722, 11.48)
c	13.13	(12.28, 13.97)

Качество подбора модели оценивалось по квадрату коэффициента детерминации, который для данной модели равен $R^2 = 0,9835$. Значение этого критерия, близкое к 1, говорит о том, что $\sim 87\%$ всей вариабельности функции отклика учтено и описывается построенной регрессионной моделью.

Полученная модель имеет вид:

$$Pc = \frac{1.486 \cdot Sc}{1 + 10.1 \cdot Sc^{13.3}} \quad (6.10).$$

Выполним теперь аналогичную обработку данных из таблицы 6.6 для третьего образца.

Таблица 6.6. Результаты компьютерного имитационного моделирования для образца 3

Sr3	Pr3	Sc3	Pc3	Sr3	Pr3	Sc3	Pc3
1	2	3	4	5	6	7	8
0,000	0,000	0,000	0,000	0,396	0,961	0,510	0,767
0,008	0,018	0,010	0,015	0,403	1,035	0,520	0,827
0,016	0,041	0,020	0,033	0,411	1,049	0,530	0,838
0,023	0,063	0,030	0,050	0,419	1,031	0,540	0,823
0,031	0,080	0,040	0,064	0,427	0,941	0,550	0,752
0,039	0,100	0,050	0,080	0,434	1,016	0,560	0,811
0,047	0,121	0,060	0,097	0,442	1,065	0,570	0,850
0,054	0,138	0,070	0,110	0,450	1,117	0,580	0,892
0,062	0,163	0,080	0,130	0,458	1,055	0,590	0,843
0,070	0,180	0,090	0,144	0,465	1,162	0,600	0,928
0,078	0,202	0,100	0,162	0,473	1,085	0,610	0,867
0,085	0,210	0,110	0,168	0,481	1,054	0,620	0,842
0,093	0,240	0,120	0,192	0,489	1,073	0,630	0,857
0,101	0,277	0,130	0,222	0,496	1,218	0,640	0,973
0,109	0,275	0,140	0,220	0,504	1,227	0,650	0,980
0,116	0,318	0,150	0,254	0,512	1,120	0,660	0,894
0,124	0,338	0,160	0,270	0,520	1,160	0,670	0,926
0,132	0,317	0,170	0,253	0,528	1,238	0,680	0,989
0,140	0,332	0,180	0,265	0,535	0,973	0,690	0,778
0,147	0,381	0,190	0,305	0,543	1,233	0,700	0,985
0,155	0,362	0,200	0,289	0,551	1,252	0,710	1,000

Окончание Таблицы 6.6.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,163	0,448	0,210	0,358	0,559	1,203	0,720	0,961
0,171	0,407	0,220	0,325	0,566	1,068	0,730	0,853
0,178	0,454	0,230	0,363	0,574	1,063	0,740	0,849
0,186	0,457	0,240	0,365	0,582	1,058	0,750	0,845
0,194	0,492	0,250	0,393	0,590	1,090	0,760	0,871
0,202	0,544	0,260	0,434	0,597	1,113	0,770	0,889
0,209	0,511	0,270	0,408	0,605	1,052	0,780	0,840
0,217	0,545	0,280	0,436	0,613	1,040	0,790	0,831
0,225	0,545	0,290	0,435	0,621	0,950	0,800	0,758
0,233	0,583	0,300	0,466	0,628	0,862	0,810	0,689
0,240	0,597	0,310	0,477	0,636	0,962	0,820	0,768
0,248	0,550	0,320	0,439	0,644	0,857	0,830	0,684
0,256	0,608	0,330	0,486	0,652	0,769	0,840	0,615
0,264	0,640	0,340	0,511	0,659	0,800	0,850	0,639
0,272	0,582	0,350	0,465	0,667	0,735	0,860	0,587
0,279	0,620	0,360	0,495	0,675	0,675	0,870	0,539
0,287	0,737	0,370	0,589	0,683	0,581	0,880	0,464
0,295	0,732	0,380	0,585	0,690	0,490	0,890	0,391
0,303	0,698	0,390	0,558	0,698	0,460	0,900	0,367
0,310	0,808	0,400	0,645	0,706	0,423	0,910	0,338
0,318	0,798	0,410	0,638	0,714	0,397	0,920	0,317
0,326	0,716	0,420	0,572	0,721	0,337	0,930	0,270
0,334	0,757	0,430	0,604	0,729	0,266	0,940	0,213
0,341	0,892	0,440	0,712	0,737	0,264	0,950	0,211
0,349	0,794	0,450	0,634	0,745	0,234	0,960	0,187
0,357	0,868	0,460	0,693	0,752	0,204	0,970	0,163
0,365	0,875	0,470	0,699	0,760	0,168	0,980	0,134
0,372	0,919	0,480	0,734	0,768	0,156	0,990	0,125
0,380	0,893	0,490	0,713	0,776	0,128	1,000	0,102
				0,396	0,961	0,510	0,767

Графически результаты моделирования и регрессионного анализа для третьего образца показаны на рисунке 6.7.

Высокие значения коэффициентов детерминации говорят о хорошем качестве подобранных моделей и их соответствии экспериментальным данным.

Изложенная методика пригодна для анализа любых аналогичных зависимостей, в том числе и тех, что получены для упомянутых образцов ткани.

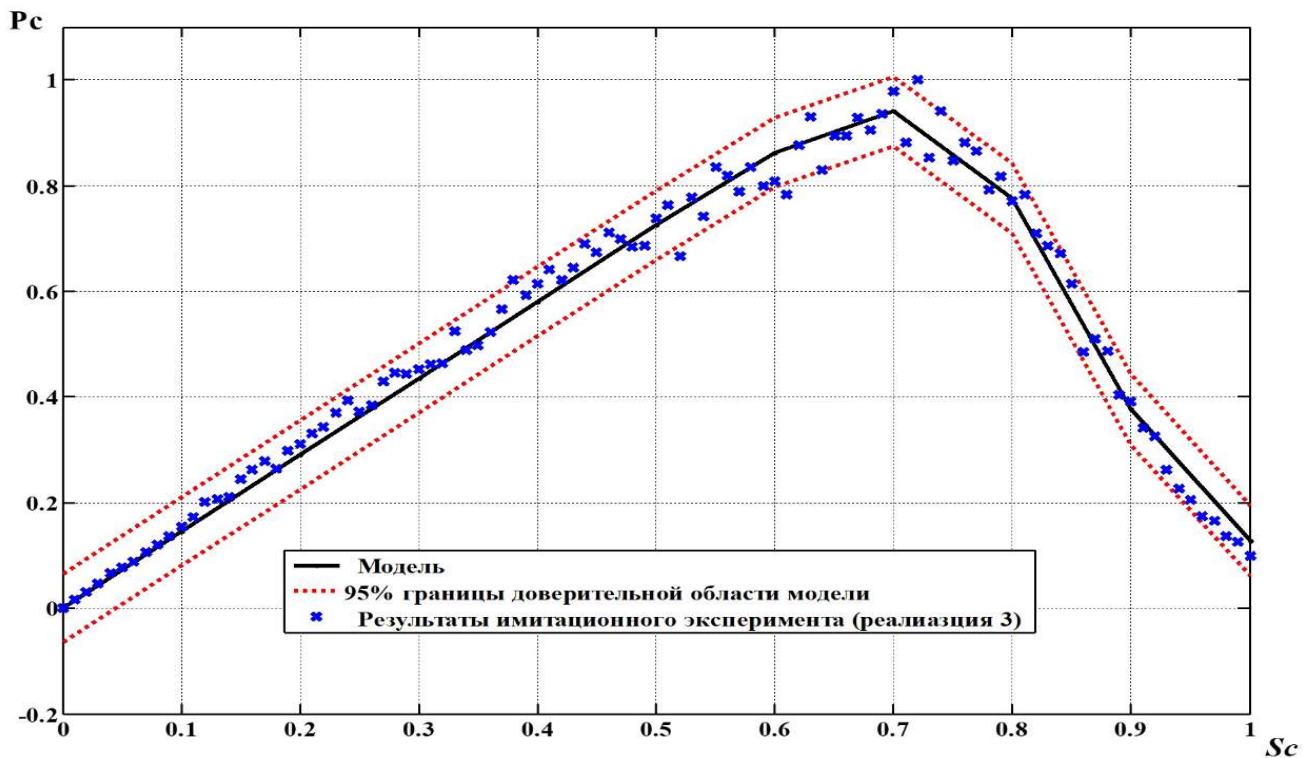


Рисунок 6.7. Результаты моделирования данных и регрессионного анализа для образца 3. (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для этого образца приведены в таблице 6.7.

Качество подбора модели оценивалось по квадрату коэффициента детерминации, который для данной модели равен $R^2 = 0,989$. Значение этого критерия, близкое к 1, говорит о том, что $\sim 98\%$ всей вариабельности функции отклика учтено и описывается построенной регрессионной моделью. По графикам видно, что наибольшее расхождение между моделью и экспериментальными данными – на

втором участке испытания, участке разрушения и разрыва образца.

Таблица 6.7. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для образца 3

Коэффициент	Точечная оценка	Интервальная оценка
a	1,451	(1,431; 1,472)
b	10,37	(9,096; 11,65)
c	13,62	(12,84; 14,4)

Полученная модель имеет вид:

$$Pc = \frac{1.45 \cdot Sc}{1 + 10.4 \cdot Sc^{13.6}} \quad (6.11).$$

Объединим результаты по образцам в таблицу 6.8 и найдем усредненные оценки [225].

Таблица 6.8. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для трех образцов

Коэфф-ты регрессии	Точечная оценка по трем образцам			Средняя оценка	Медианная оценка	Бутстреп- оценка
	1	2	3			
a	1,466	1,486	1,451	1,4677	1,4660	1,4678
b	10,89	10,10	10,37	10,4533	10,3700	10,4371
c	13,78	13,13	13,62	13,5100	13,6200	13,5567

Ввиду большого разброса оценок по образцам для оценивания усредненного значения используем медианные оценки. Поскольку количество образцов ограничено ($N = 3$ образца), для получения оценок используем бутстреп-метод (bootstrap) размножения выборок и уточнения оценок. В таблице 6.8 приведены все три усредненные оценки: «Средн.» – среднее арифметическое, «Мед.» – медианная оценка,

«Бутстр.» – оценка по бутстреп-методу. Сравнение оценок показывает, что в рассматриваемом примере различие в оценках незначительно [225].

Приведенные оценки получены с помощью следующих команд системы Matlab:

```
>> a = [1.4660 1.4860 1.4510]
a = 1.4660 1.4860 1.4510
>> [bootstat, bootsam] = bootstrap(100, @median, a);
>> mean(a)
ans = 1.4677
>> median()
ans = 1.4660
>> mean(bootstat)
ans = 1.4678
>> b = [10.8900 10.1000 10.3700]
b = 10.8900 10.1000 10.3700
>> [bootstat, bootsam] = bootstrap(100, @median, b);
>> mean(b)
ans = 10.4533
>> median(b)
ans = 10.3700
>> mean(bootstat)
ans = 10.4371
>> c = [13.7800 13.1300 13.6200]
c = 13.7800 13.1300 13.6200
>> mean(c)
ans = 13.5100
>> median(c)
ans = 13.6200
>> [bootstat, bootsam] = bootstrap(100, @median, c);
>> mean(bootstat)
ans = 13.5567
```

6.3. Апробация и оценка адекватности предложенной математической методики обработки результатов полумоментных испытаний на различных текстильных материалах

Исследование механических свойств нетканого волокнистого материала методом полумоментных испытаний

В таблице 6.9 приведены сведения о нетканом полотне, результаты испытаний которого обрабатываем согласно предлагаемой методике. Исходные данные прямоугольного образца нетканого материала с начальными размерами: длина $L = 100$ мм, ширина $W = 50$ мм, толщина 4,49 мм [225].

В таблице 1 (Приложение Б) приведены измеренные значения длины образца l в миллиметрах (L , мм), абсолютной нагрузки в Н (P , Н), время с момента начала испытания в миллисекундах (t , мс). Для наглядности фрагмент таблицы (одна страница) приведен ниже (таблица 6.9).

Легко убедиться, что в приведенных данных переменные L и T – пропорциональны. Поэтому далее переменная T исключена из рассмотрения.

Переменная L преобразована в переменную S – абсолютное удлинение – исключением из массивов значений L и P первых 9 значений, при которых $P = 0$, и вычитанием из остальных значений L величины $L(9,1)$. В итоге получена парная выборка значений $\{Sa; PSa\}$.

Аналогичное преобразование выполнено для всех четырех образцов. По результатам этих преобразований получены парные наборы значений $\{S1; PS1\}$, $\{S2; PS2\}$, $\{S3; PS3\}$, $\{S4; PS4\}$. По этим данным построены графики зависимости силы сопротивления PSa удлинению от абсолютного удлинения Sa образца для всех четырех образцов, показанные на рисунке 6.8.

В приведенном примере отчета результаты фиксировались до момента, когда сила сопротивления снижалась до величины 1 Н.

Рассмотрение приведенных графиков образцов материала, испытанных при одинаковых условиях, приводит к ряду выводов, которые являются общими для

данного класса испытаний (таблица 6.9).

Таблица 6.9. Исходные данные образца нетканого материала в зависимости от приложенной силы

Сила Р, дН	Длина L, мм	Время t, мс	Сила Р, дН	Длина L, мм	Время t, мс
1	2	3	4	5	6
0	100	0	2,15	120,575	12911
0	100	93	2,15	120,77	12989
0	100,125	171	2,15	120,96	13067
0	100,125	250	2,15	120,96	13145
0	100,315	328	2,15	121,105	13224
0	100,51	406	2,15	121,295	13302
0	100,655	484	2,15	121,295	13380
0	100,655	562	2,15	121,485	13458
0,05	100,85	640	2,15	121,63	13536
0,05	101,04	718	2,15	121,82	13614
0,05	101,04	797	2,15	121,82	13692
0,05	101,185	875	2,15	122,01	13771
0,05	101,38	953	2,15	122,155	13849
0,1	101,57	1031	2,15	122,155	13927
0,1	101,57	1109	2,2	122,345	14005
0,1	101,71	1187	2,2	122,535	14083
0,15	101,9	1265	2,2	122,535	14161
0,15	101,9	1344	2,2	122,68	14239
0,15	102,05	1422	2,2	122,87	14318
0,2	102,24	1500	2,15	123,065	14396
0,25	102,43	1578	2,15	123,065	14474
0,25	102,43	1656	2,15	123,21	14552
0,25	102,575	1734	2,15	123,405	14630
0,25	102,765	1812	2,15	123,55	14708
0,25	102,765	1891	2,15	123,55	14786
0,3	102,955	1969	2,1	123,745	14865

Окончание Таблицы 6.9.

1	2	3	4	5	6
0,3	103,105	2047	2,1	123,935	14943
0,35	103,31	2125	2,1	123,935	15021
0,35	103,31	2203	2,1	124,08	15099
0,35	103,505	2281	2,1	124,275	15177
0,4	103,645	2359	2,1	124,275	15255
0,4	103,645	2438	2,1	124,47	15333
0,4	103,84	2516	2,1	124,665	15412
0,45	104,03	2594	2,1	124,81	15490
0,45	104,18	2672	2,1	124,81	15570
0,45	104,18	2750	2,15	125	15648
0,5	104,375	2828	2,1	125,2	15726

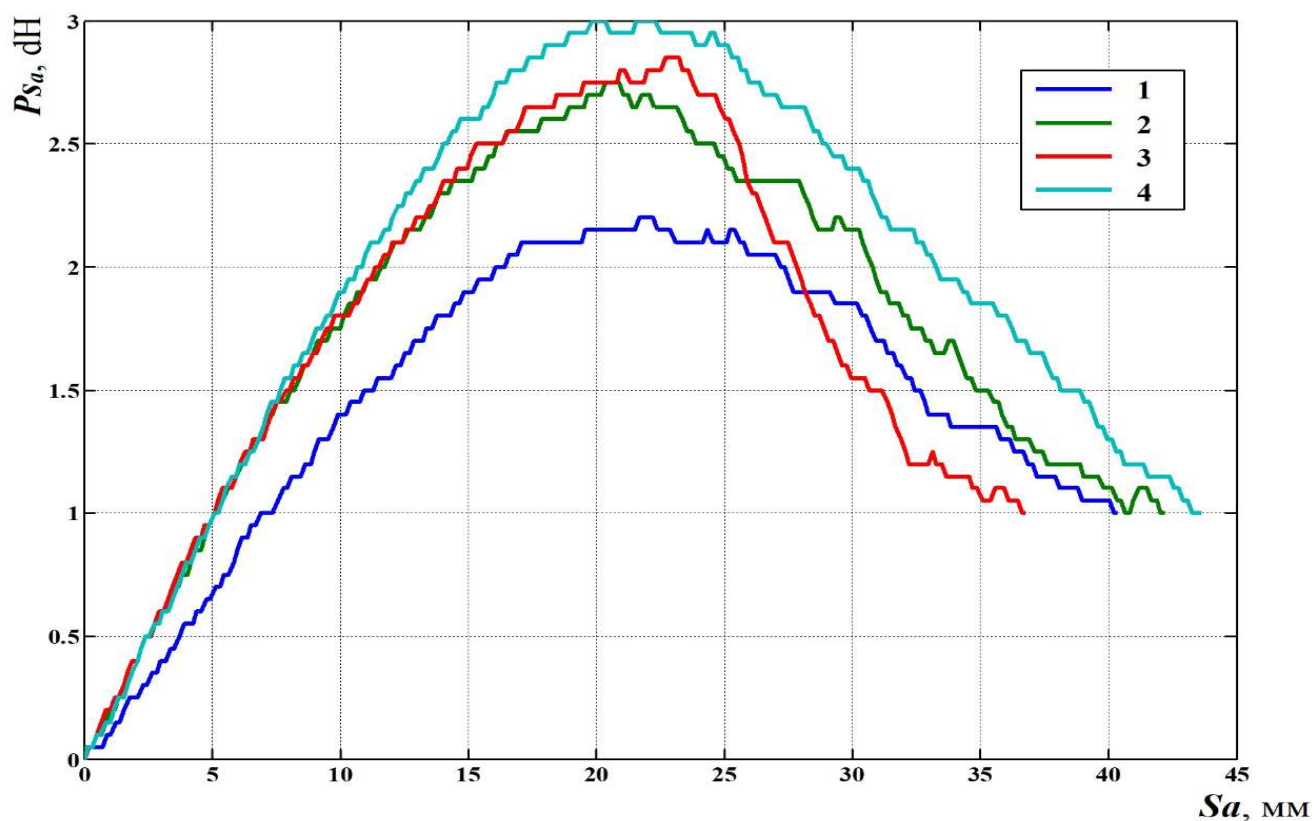


Рисунок 6.8. Зависимость силы сопротивления удлинению

Зависимые переменные, такие, как абсолютная сила сопротивления, механическое напряжение и относительная прочность образца имеют один и тот же вид

зависимости от удлинения, отличающийся только масштабом и единицами размерности. Поэтому достаточно рассматривать лишь зависимость одной из переменных. Принято рассматривать зависимость механического напряжения (Stress) от относительного удлинения (Strain) – так называемые S - S – кривые.

Рассмотренные экспериментальные зависимости могут существенно отличаться от образца к образцу одного и того же материала. Эти отличия, при сохранении формы кривых, весьма существенны, что говорит о существовании значительного статистического разброса в свойствах материала в пределах одного и того же исследуемого образца.

В таблице 2 (Приложение В) приведены данные по четырем образцам, полученные после описанной выше процедуры преобразования результатов из отчетов их испытаний. Для наглядности ниже показана первая страница – таблица 6.10.

Таблица 6.10. Зависимости механического напряжения (Stress) от относительного удлинения (Strain) по 4 образцам

s1	Ps1	s2	Ps2	s3	Ps3	s4	Ps4
1	2	3	4	5	6	7	8
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,002	0,050	0,002	0,050	0,002	0,050	0,001	0,050
0,004	0,050	0,002	0,050	0,003	0,050	0,003	0,050
0,004	0,050	0,003	0,050	0,005	0,100	0,005	0,100
0,005	0,050	0,005	0,050	0,005	0,100	0,005	0,100
0,007	0,050	0,005	0,100	0,007	0,150	0,006	0,100
0,009	0,100	0,007	0,100	0,008	0,200	0,008	0,150
0,009	0,100	0,008	0,100	0,008	0,200	0,008	0,150
0,011	0,100	0,010	0,150	0,010	0,200	0,010	0,150
0,012	0,150	0,010	0,200	0,012	0,250	0,012	0,200
0,012	0,150	0,012	0,200	0,014	0,250	0,014	0,250
0,014	0,150	0,014	0,200	0,014	0,250	0,014	0,250
0,016	0,200	0,014	0,250	0,016	0,300	0,016	0,250

Окончание Таблицы 6.10.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,018	0,250	0,016	0,250	0,017	0,350	0,017	0,300
0,018	0,250	0,017	0,300	0,017	0,350	0,017	0,300
0,019	0,250	0,019	0,300	0,019	0,400	0,019	0,350
0,021	0,250	0,019	0,350	0,021	0,400	0,021	0,400
0,021	0,250	0,021	0,350	0,022	0,450	0,022	0,450
0,023	0,300	0,022	0,400	0,022	0,450	0,022	0,450
0,025	0,300	0,022	0,450	0,024	0,500	0,024	0,500
0,027	0,350	0,024	0,450	0,026	0,500	0,026	0,500
0,027	0,350	0,026	0,500	0,026	0,500	0,026	0,500
0,028	0,350	0,028	0,500	0,028	0,550	0,028	0,550
0,030	0,400	0,028	0,550	0,030	0,600	0,029	0,550
0,030	0,400	0,030	0,550	0,031	0,600	0,031	0,600
0,032	0,400	0,031	0,600	0,031	0,600	0,031	0,600
0,034	0,450	0,031	0,600	0,033	0,650	0,033	0,600
0,035	0,450	0,033	0,600	0,035	0,700	0,035	0,650
0,035	0,450	0,035	0,650	0,035	0,700	0,035	0,650
0,037	0,500	0,037	0,700	0,036	0,750	0,036	0,700
0,039	0,550	0,037	0,700	0,038	0,800	0,038	0,750
0,039	0,550	0,038	0,700	0,040	0,800	0,040	0,800
0,041	0,550	0,040	0,750	0,040	0,800	0,040	0,800
0,043	0,550	0,040	0,750	0,042	0,850	0,042	0,800
0,044	0,600	0,042	0,750	0,044	0,900	0,043	0,850
0,044	0,600	0,044	0,800	0,044	0,900	0,043	0,850
0,046	0,600	0,046	0,850	0,046	0,900	0,045	0,900
0,048	0,650	0,046	0,850	0,047	0,950	0,047	0,900
0,048	0,650	0,047	0,850	0,049	0,950	0,049	0,950
0,049	0,650	0,049	0,900	0,049	0,950	0,049	0,950
0,051	0,700	0,049	0,950	0,051	1,000	0,051	1,000

На рисунке 6.9 показаны те же кривые, что и на рисунке 6.3, но перестроенные в кодированных (безразмерных и отмасштабированных на диапазон от 0 до 1) единицах: $\{S; P_s\} \rightarrow \{\text{Strain}; \text{Stress}\}$.

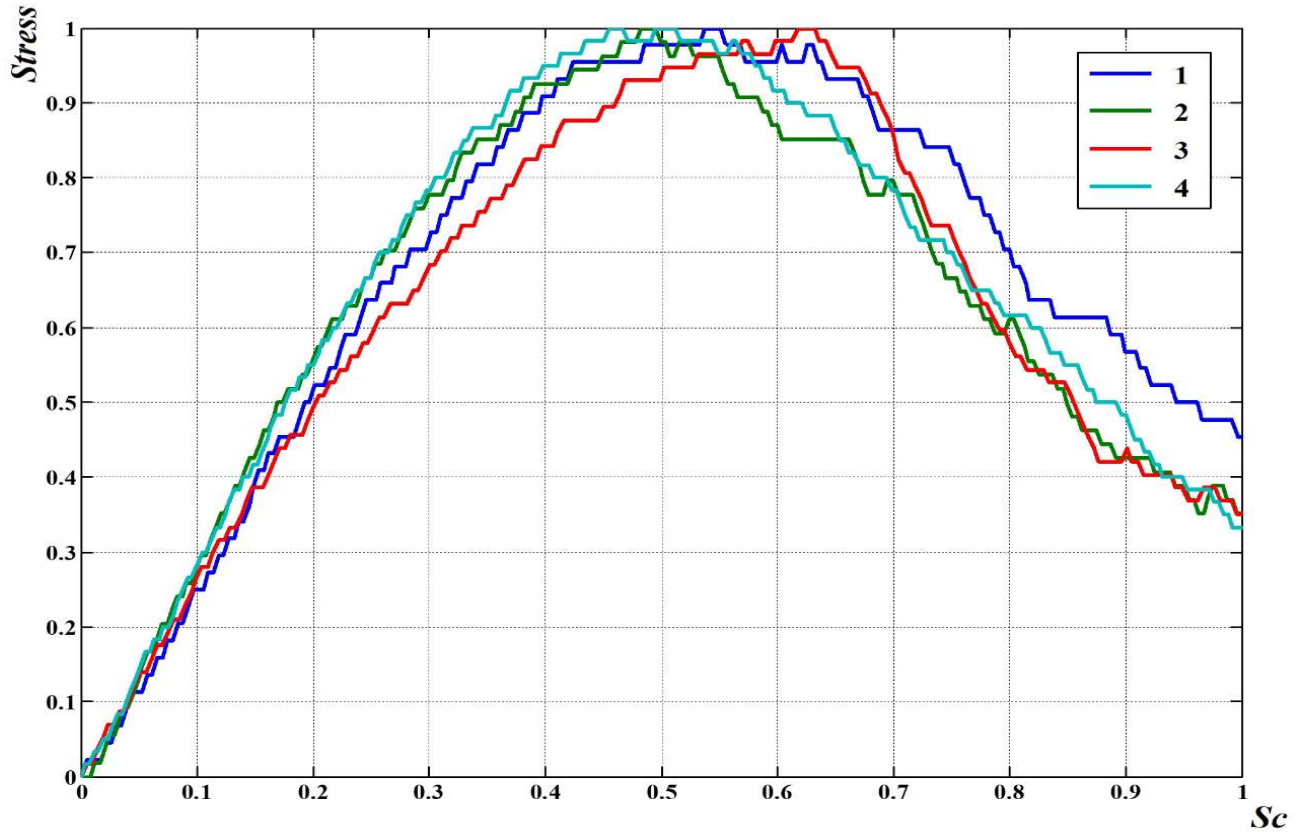


Рисунок 6.9. Зависимости механического напряжения (Stress) от относительного удлинения (Strain – Sc) по 4 образцам перестроенные в кодированных (безразмерных и отмасштабированных на диапазон от 0 до 1)

Как следует из рассмотрения кривых на рисунках 6.8, 6.9 кодирование переменных сблизило одноименные зависимости четырех образцов, что позволяет использовать их для дальнейшей статистической обработки.

Отметим характерные особенности рассматриваемых кривых:

1. На первом участке испытания, до достижения экстремальной точки, все образцы деформируются по закону, близкому к линейному, причем для всех образцов линии практически совпадают: можно считать, что на этом участке рассматриваемый материал подчиняется закону Гука.

2. При переходе от линейного участка к криволинейному участку кривые постепенно расходятся.

3. Участок предельных напряжений у исследуемого материала достаточно протяженный, как и участок разрушения, на котором напряжение снижается до минимального значения, зарегистрированного прибором.

Поэтому возникает задача обработки таких объединенных статистических данных, отличающихся не только значениями зависимой переменной Sf , но и значениями аргументов у каждой реализации (у каждого испытанного образца).

Можно выделить две типичные задачи обработки такого рода экспериментальных данных:

- 1) подбор аналитического описания наблюдаемых экспериментальных зависимостей;
- 2) исследование распределения экстремальных точек кривых, соответствующих началу разрушения образца.

Рассмотрим сначала первую задачу.

Эта задача является типичной задачей регрессионного анализа при наличии повторных результатов. Ее отличие от классической задачи регрессионного анализа в том, что повторные результаты испытаний получены не для одних и тех же значений варьируемого фактора, а для разных образцов одного и того же материала при одинаковых условиях испытаний [211]. Эта особенность приводит к необходимости разработки специальных методов обработки данных эксперимента.

Выполним подбор нелинейной регрессии с помощью процедуры `sftool` системы Matlab, как это делалось выше для модельных данных. Результаты точечного и интервального оценивания коэффициентов a , b , c регрессионной модели:

$$Pd_c = a \frac{s_c}{1+b \cdot s_c^c} \quad (6.12),$$

для четырех образцов и усредненные значения приведены в таблице 6.11.

Таблица 6.11. Результаты точечного и интервального оценивания коэффициентов a , b , c регрессионной модели для четырех образцов [225]

№№	Оценки	a	b	c
1	Точечная	2.501	4.54	4.126
	Интервальная	(2.485, 2.516)	(4.485, 4.595)	(4.076, 4.176)
2	Точечная	2.706	6.789	4.143
	Интервальная	(2.686, 2.725)	(6.69, 6.889)	(4.092, 4.194)
3	Точечная	2.253	6.364	5.412
	Интервальная	(2.228, 2.277)	(6.165, 6.562)	(5.283, 5.541)
4	Точечная	2.73	6.534	4.174
	Интервальная	(2.718, 2.742)	(6.476, 6.592)	(4.143, 4.206)
Средняя оценка		2.5475	6.0568	4.4638
Медианная оценка		2.6035	6.4490	4.1585
Бутстреп-оценка		2.5609	6.2461	4.2808

Как видно из таблицы, оценки усредненных коэффициентов регрессии, полученные разными способами, близки друг к другу. Это позволяет построить усредненную модельную кривую зависимости Pd_{cm} (S_{cm}). Используем для этого бутстреп-оценки [220, 225]:

$$Pd_{cm} = 2.561 \frac{S_{cm}}{1 + 6.246 \cdot S_{cm}^{4.281}} \quad (6.13).$$

На рисунке 6.10 показаны экспериментальные значения в кодированной форме, кривые регрессии для каждого из образцов (обозначены fit1 – fit4) и усредненная регрессионная модель [225].

Преимуществом предложенного выше и рассмотренного на примерах типа нелинейных регрессионных моделей является возможность описания одним аналитическим выражением экспериментальных данных на всем протяжении эксперимента.

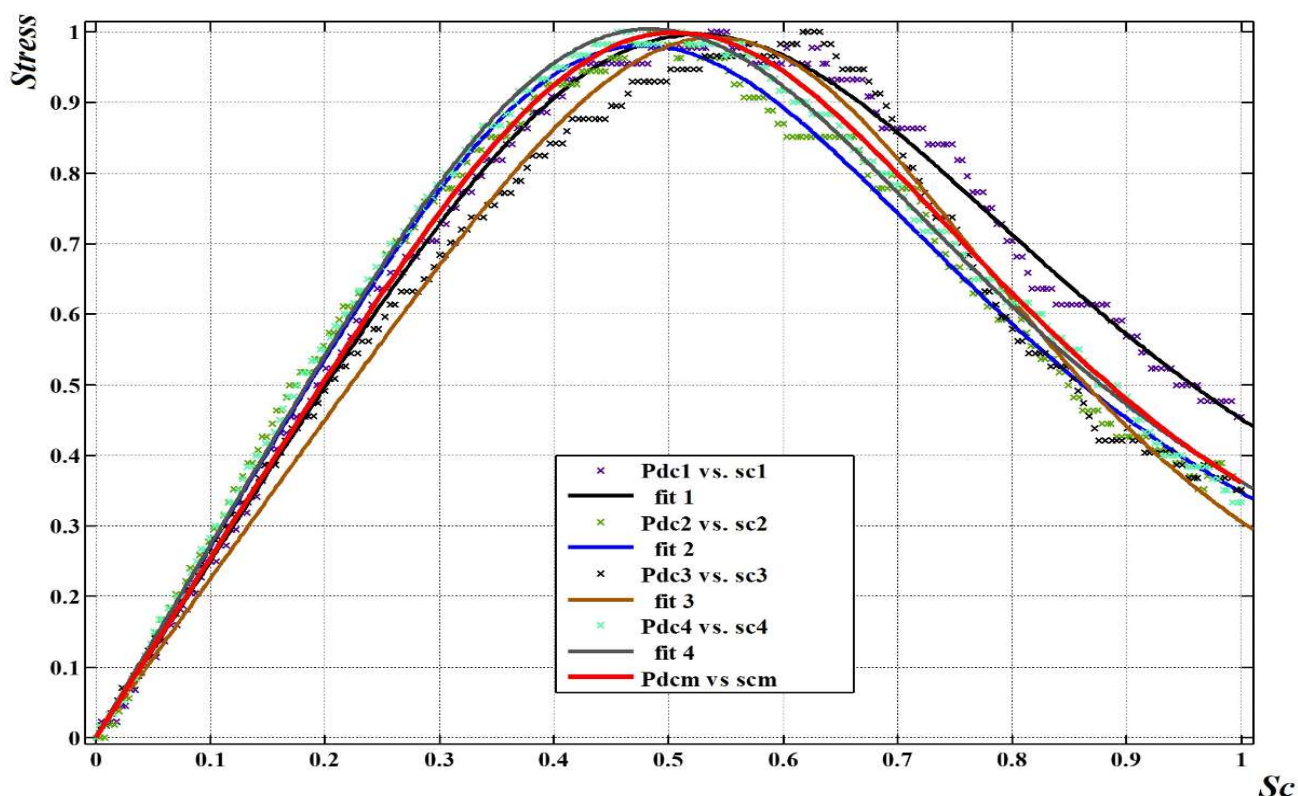


Рисунок 6.10. Экспериментальные значения в кодированной форме, кривые регрессии для каждого из образцов (обозначены fit1 – fit4) и усредненная регрессионная модель (переменные по осям координат показаны в относительных единицах) [225]

Исследование механических свойств полиамидной ткани методом полцикловых испытаний

Пять образцов полиамидной ткани подвергались удлинению на разрывной машине до разрыва образца. Ткань полиамидная 1000D, цвет черный. Испытания по ГОСТ 3811-72. Код образца 66-1. Поверхностная плотность 317,4 г/м². Разрывная нагрузка полоски ткани, Н: – по основе 3346, по утку 2617, стойкость к истиранию, циклы более 15000, водоотталкивание, усл. ед. – 70. Начальные размеры образца 200 мм x 100 мм.

Испытательный прибор: ИТ-3М, разрывная машина РТ-250, шкала нагрузок ±1 мм.

В процессе удлинения каждого образца регистрировались: время от начала испытания, абсолютное удлинение, мм образца вдоль нитей основы и абсолютное значение силы сопротивления удлинению, Н.

Результаты испытаний для пяти образцов приведены в таблице 3 (Приложение Г).

В первой колонке таблицы приведены значения длины образца L , мм от начала испытаний до момента разрыва. Во второй колонке таблицы приведены значения силы сопротивления (напряжения) образца удлинению P , дН.

Результаты испытаний были преобразованы в кодированные (безразмерные и отмасштабированные в диапазон от 0 до 1 значения) переменные в соответствии с приведенными выше формулами кодирования. Зависимости между кодированными значениями S и P (Strain- Stress зависимости для ткани из полиамидных нитей по основе) для пяти образцов показаны на рисунке 6.11.

Рассмотрение графиков показывает, что при общей монотонной зависимости между переменными S и P вид этой зависимости заметно различается у разных образцов даже в кодированных переменных. Три образца (на рисунке второй, третий и четвертый) практически идентичны и не различимы. Первый образец имеет кривую зависимости между S и P существенно отличающуюся от перечисленных трех образцов. Пятый образец имеет кривую удлинения, скорее всего, такую же, что и образцы 2, 3 и 4, но из-за особенности в области разрыва (образец порвался не сразу, а «дорывался» в два этапа) возникло различие в кривых.

Следует отметить, что все пять образцов разорвались практически сразу, протяженность области разрыва у исследуемого материала можно считать равной нулю. В связи с этими особенностями для данного вида материала решено у всех образцов оставить область испытания от начала до момента начала разрыва и вывести эти результаты в графическом виде для проверки идентичности образцов.

После «отсечения» областей разрыва получаем кривые зависимости между S и P в виде, показанном на рисунке 6.12. Рассмотрение рисунка показывает, что четыре образца, за исключением первого, под действием растягивающей нагрузки ведут себя практически одинаково.

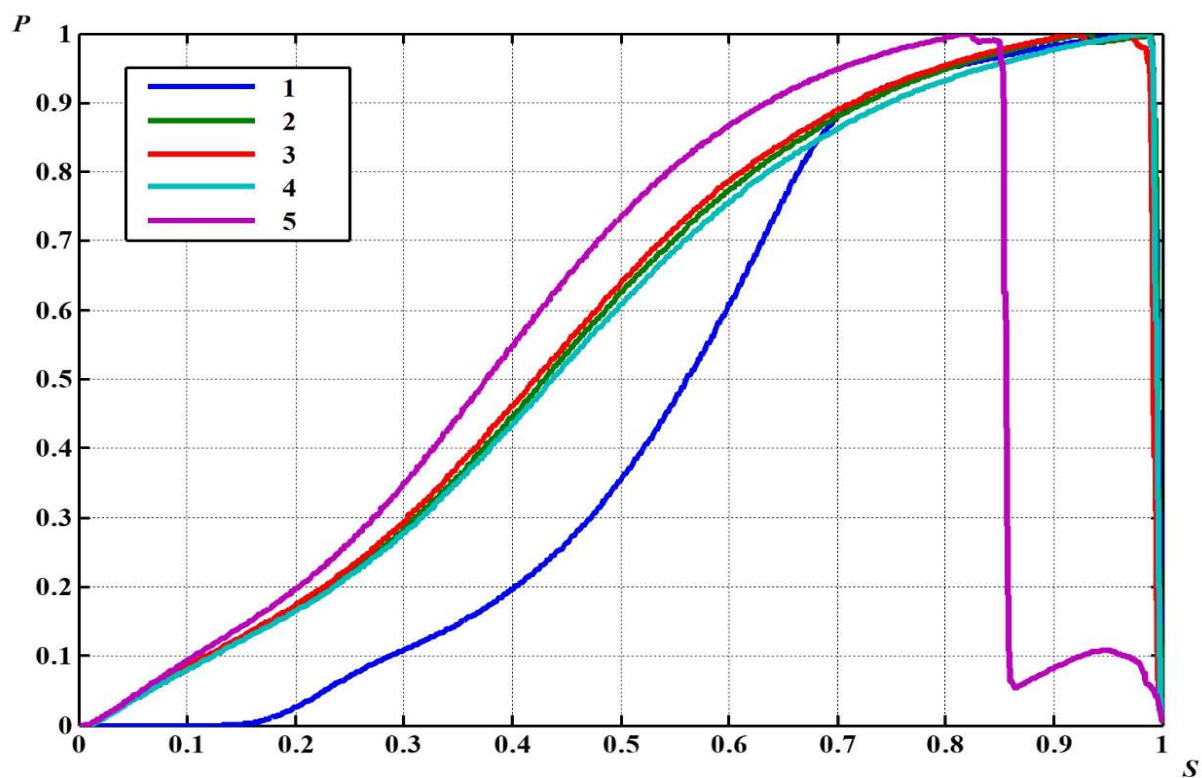


Рисунок 6.11. Зависимость напряжения от удлинения в кодированных и масштабированных переменных для пяти образцов ткани из полиамидных нитей при испытании вдоль основы (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

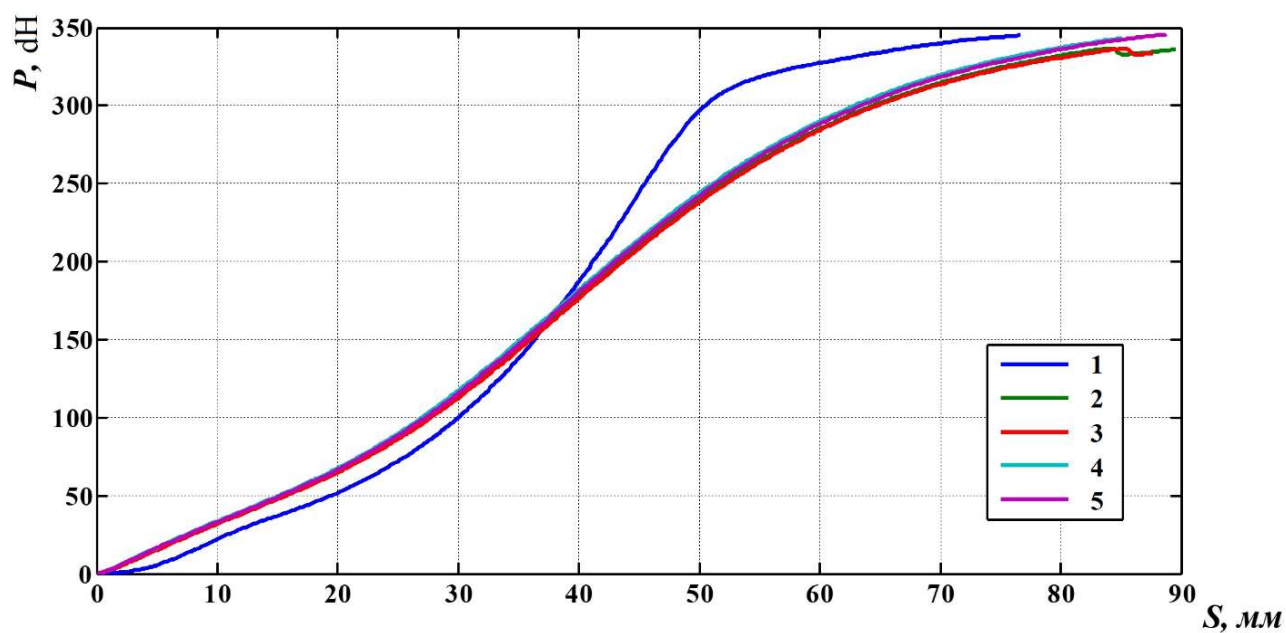


Рисунок 6.12. Области разрыва получаемых кривых зависимости между S и P после «отсечения» правой части

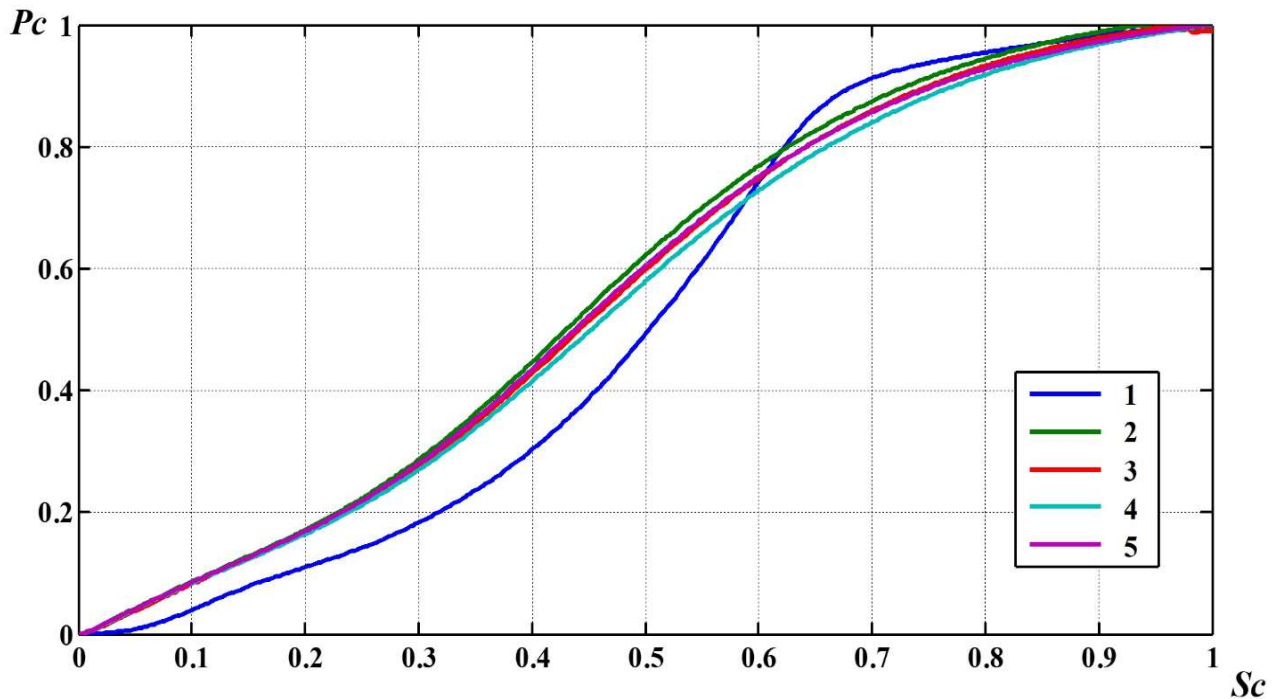


Рисунок 6.13. Графики зависимости между S и P после перехода к кодированным переменным

Переход к кодированным переменным и вывод графиков зависимости между S и P показан на рисунке 6.13. Видно, что кодирование хотя и «подтянуло» результаты по первому образцу к результатам по остальным образцам, однако первый образец остается «выпадающим» из результатов исследования.

Подбор регрессионной модели для кривых на рисунке 6.12 или рисунке 6.13 не представляет трудностей. Наиболее простой и очевидной регрессионной моделью в данном случае является полиномиальная модель. Наличие перегиба у кривых подсказывает необходимость использования в модели полинома, как минимум, третьего порядка:

$$Pc(Sc) = C_1 + C_2 \cdot Sc + C_3 \cdot Sc^2 + C_4 \cdot Sc^3 \quad (6.14).$$

Для получения оценок коэффициентов C_1 , C_2 , C_3 , C_4 регрессионной модели по результатам испытаний из таблицы 3 (Приложение Г) воспользуемся инструментарием `sftool` программной математической системы Matlab. Обработке были

подвергнуты не непосредственно данные из таблицы, а усеченные и закодированные подмножества данных, по которым были построены кривые, показанные на рисунке 6.13.

Ниже приведены полученные точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для испытанных пяти образцов полиамидной ткани.

Образец 1.

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии приведены в таблице 6.12. Из таблицы следует, что все коэффициенты регрессии значимы.

Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.992$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

Таблица 6.12. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии

Коэфф.	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_1	0.06214	(0.0513, 0.07298)
C_2	-0.9383	(-1.032, -0.8446)
C_3	5.658	(5.44, 5.875)
C_4	-3.828	(-3.97, -3.685)

В таблице 6.13 приведены прогнозные точечные P_c ($Sc1m$) и нижние Low P_c ($Sc1m$) и верхние Up P_c ($Sc1m$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc1m$

На рисунке 6.14 приведены экспериментальные значения (обозначены * – P_c), кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы линии (практически сливаются с линией регрессии из-за очень узкой доверительной области). Как следует из рисунка, Регрессионная модель 3-го порядка не слишком хорошо соответствует экспериментальным данным (большое количество экспериментальных значений выходит за пределы доверительной области модели).

Таблица 6.13. Прогнозные точечные $P_c (Sc1m)$ и нижние Low $P_c (Sc1m)$ и верхние Up $P_c (Sc1m)$ интервальные значения регрессии

Sc	Low $P_c (Sc)$	$P_c (Sc)$	Up $P_c (Sc)$
0	0.0512989	0.0621396	0.0729802
0.1	0.015623	0.0210586	0.0264942
0.2	0.0654837	0.0701608	0.0748379
0.3	0.181665	0.186479	0.191294
0.4	0.342657	0.347047	0.351437
0.5	0.524845	0.528897	0.532949
0.6	0.704681	0.709063	0.713445
0.7	0.859767	0.864577	0.869388
0.8	0.967796	0.972473	0.97715
0.9	1.00439	1.00978	1.01517
1	0.942826	0.953543	0.964259

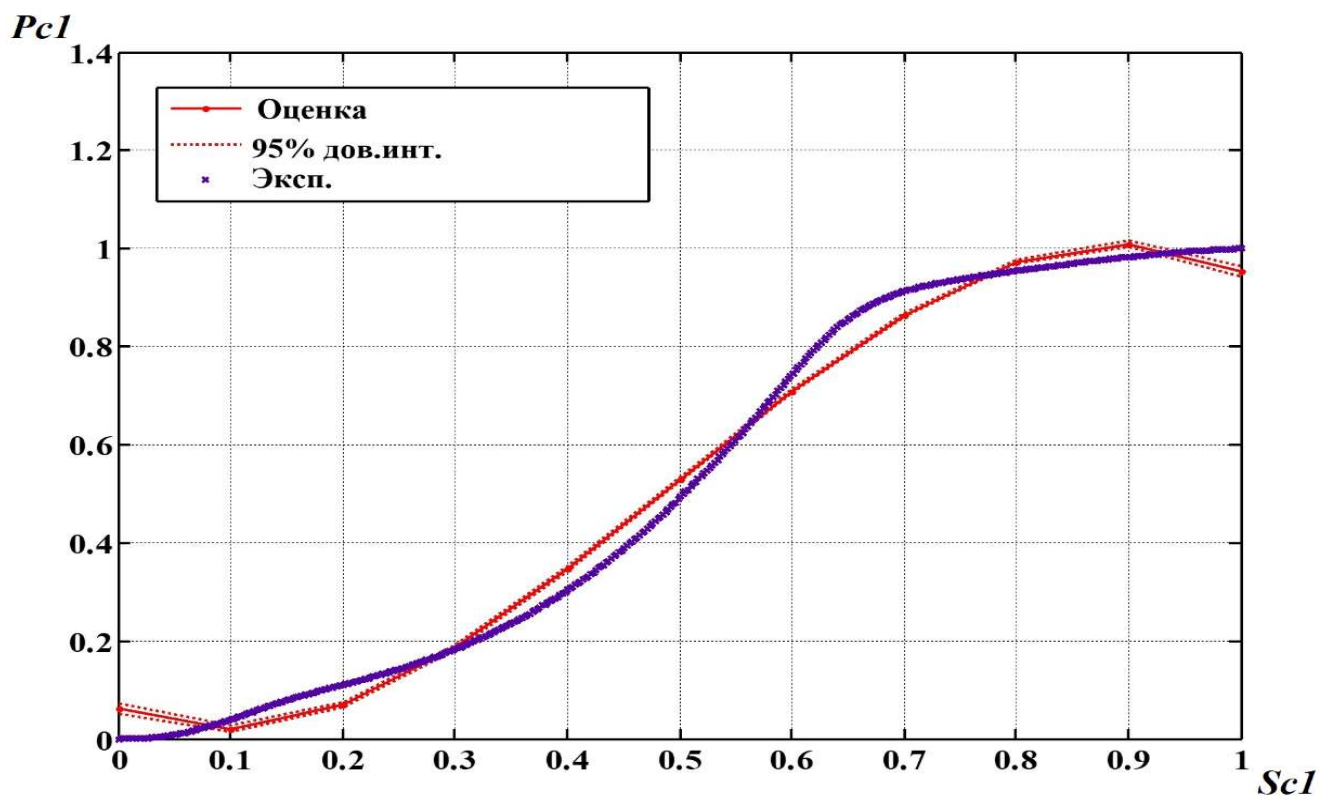


Рисунок 6.14. Экспериментальные значения и линия кривой регрессионной модели (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

Образец 2.

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии приведены в таблице 6.14. Из таблицы следует, что все коэффициенты регрессии значимы.

Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.998$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

Таблица 6.14. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии

Коэфф.	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_1	0.01805	(0.01454, 0.02157)
C_2	0.2713	(0.2408, 0.3017)
C_3	2.955	(2.884, 3.026)
C_4	-2.279	(-2.325, -2.232)

В таблице 6.15 приведены прогнозные точечные $Pc2$ ($Sc2$) и нижние Low $Pc2$ ($Sc2$) и верхние Up $Pc2$ ($Sc2$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc2$

Таблица 6.15. Прогнозные точечные $Pc2$ ($Sc2$) и нижние Low $Pc2$ ($Sc2$) и верхние Up $Pc2$ ($Sc2$) интервальные значения регрессии

$Sc2$	Low $Pc2$ ($Sc2$)	$Pc2$ ($Sc2$)	Up $Pc2$ ($Sc2$)
0	0.0145358	0.0180511	0.0215663
0.1	0.0706796	0.0724464	0.0742132
0.2	0.170737	0.172265	0.173794
0.3	0.302263	0.303837	0.305411
0.4	0.452056	0.45349	0.454925
0.5	0.606229	0.607554	0.608879
0.6	0.750923	0.752357	0.75379
0.7	0.872655	0.874228	0.875801
0.8	0.957966	0.959496	0.961025
0.9	0.992727	0.99449	0.996253
1	0.962036	0.965539	0.969041

На рисунке 6.15 приведены экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы. Как следует из рисунка, регрессионная модель 3-го порядка хорошо отвечает экспериментальным данным.

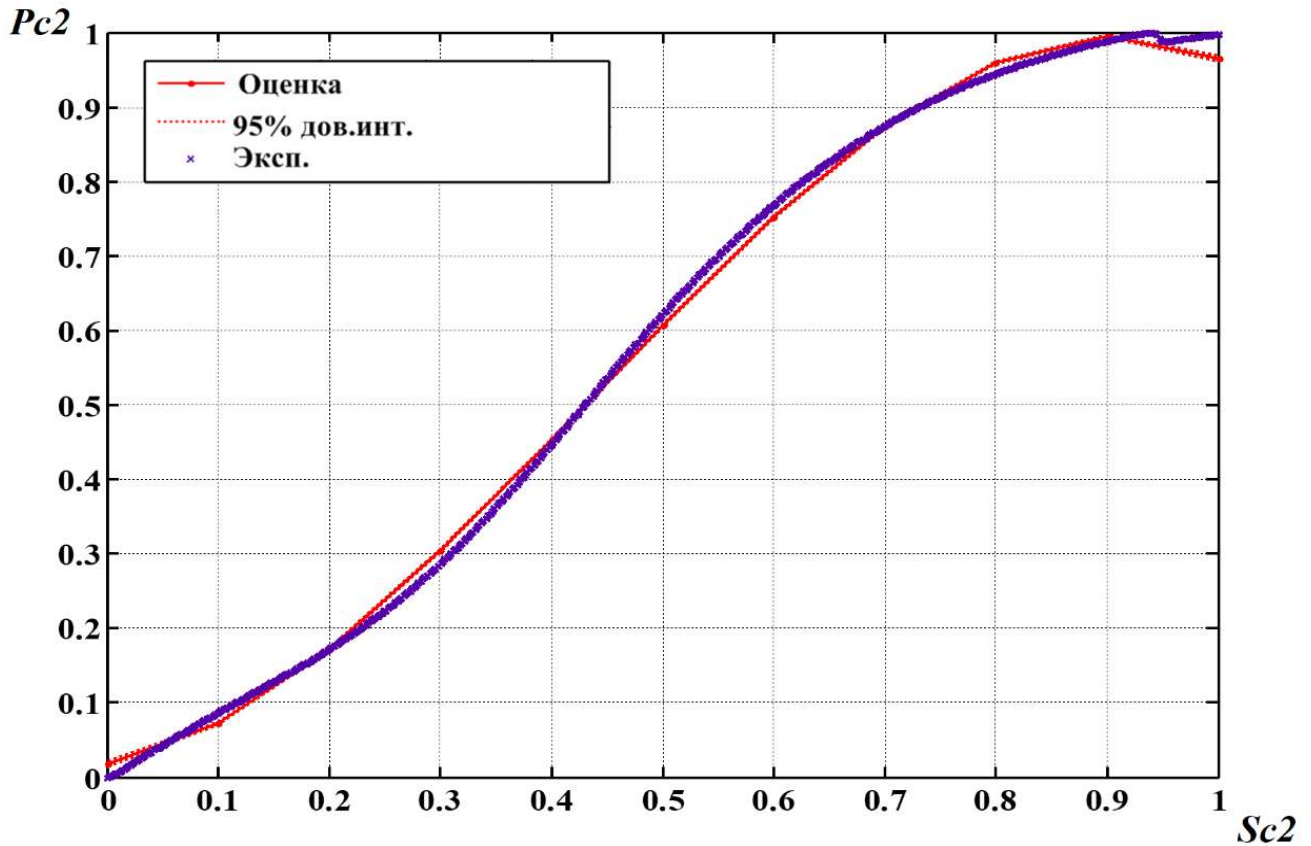


Рисунок 6.15. Экспериментальные значения, кривой регрессионной модели и 95%-е доверительные границы

Образец 3.

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии приведены в таблице 6.16. Из таблицы следует, что все коэффициенты регрессии значимы.

Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.999$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

В таблице 6.17 приведены прогнозные точечные $Pc3$ ($Sc3$) и нижние Low $Pc3$ ($Sc3$) и верхние Up $Pc3$ ($Sc3$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc3$.

Таблица 6.16. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии

Коэфф.	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_1	0.0186	(0.01527, 0.02194)
C_2	0.228	(0.1991, 0.2569)
C_3	2.924	(2.857, 2.992)
C_4	-2.202	(-2.246, -2.157)

Таблица 6.17. Прогнозные точечные $Pc3$ ($Sc3$) и нижние Low $Pc3$ ($Sc3$) и верхние Up $Pc3$ ($Sc3$) интервальные значения регрессии

$Sc3$	Low $Pc3$ ($Sc3$)	$Pc3$ ($Sc3$)	Up $Pc3$ ($Sc3$)
0	0.0152718	0.0186047	0.0219375
0.1	0.0667637	0.0684438	0.0701239
0.2	0.162096	0.163557	0.165017
0.3	0.28923	0.290733	0.292235
0.4	0.435393	0.436761	0.43813
0.5	0.587168	0.588433	0.589698
0.6	0.731168	0.732537	0.733907
0.7	0.854361	0.855863	0.857366
0.8	0.94374	0.945201	0.946662
0.9	0.985656	0.98734	0.989024
1	0.965728	0.969071	0.972414

На рисунке 6.16 приведены экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы. Как следует из рисунка, регрессионная модель 3-го порядка хорошо отвечает экспериментальным данным.

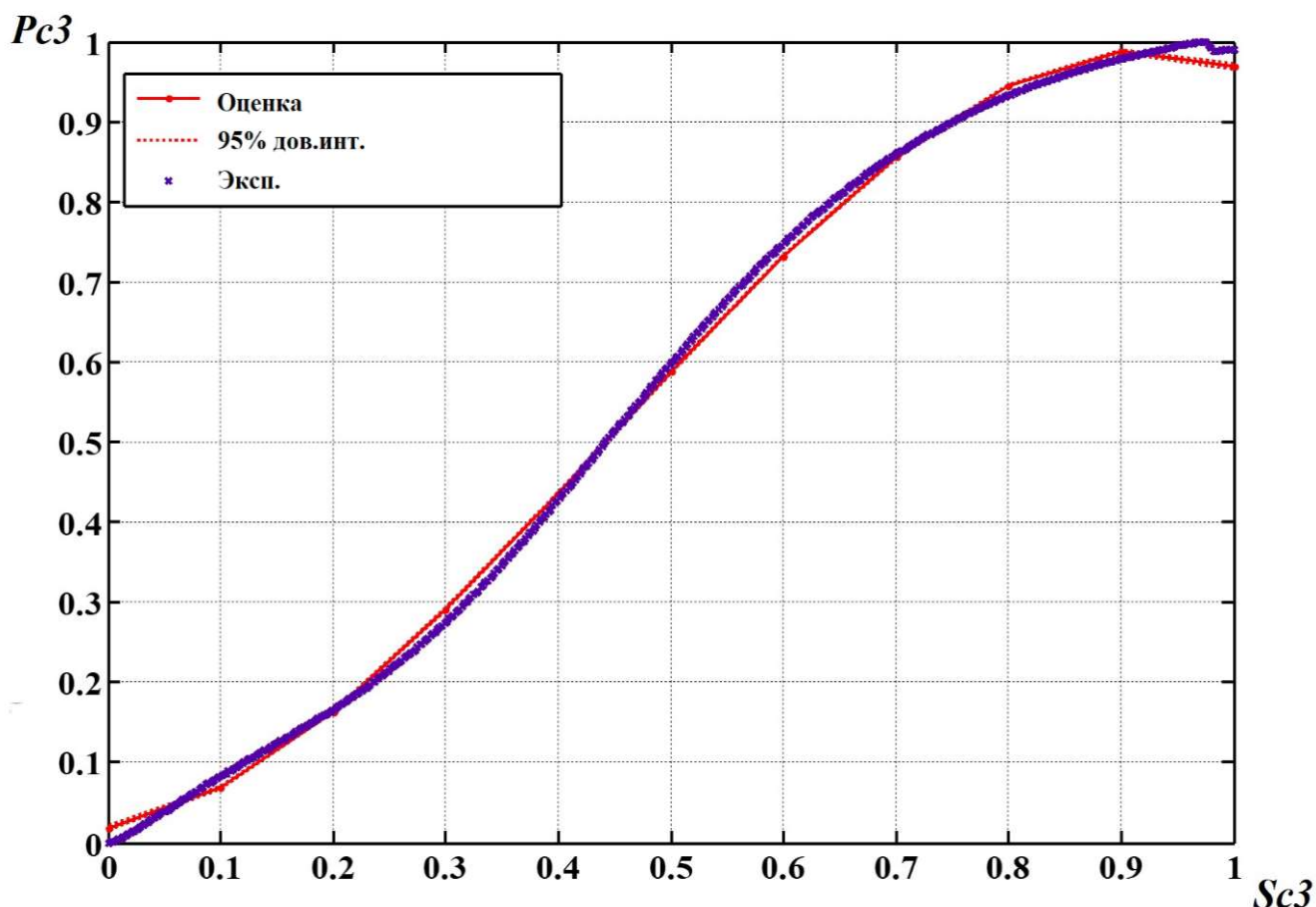


Рисунок 6.16. Экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы для образца 3

Образец 4.

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии приведены в таблице 6.18. Из таблицы следует, что все коэффициенты регрессии значимы.

Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.999$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

В таблице 6.19 приведены прогнозные точечные $Pc4$ ($Sc4$) и нижние Low $Pc4$ ($Sc4$) и верхние Up $Pc4$ ($Sc4$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc4$.

Таблица 6.18. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии образца 4

Коэфф.	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_1	0.0221	(0.01886, 0.02534)
C_2	0.2207	(0.1926, 0.2488)
C_3	2.786	(2.72, 2.851)
C_4	-2.056	(-2.099, -2.013)

Таблица 6.19. Прогнозные точечные $Pc4 (Sc4)$ и нижние Low $Pc4 (Sc4)$ и верхние Up $Pc4 (Sc4)$ интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc4$

$Sc4$	Low $Pc4 (Sc4)$	$Pc4 (Sc4)$	Up $Pc4 (Sc4)$
0	0.0188576	0.0220983	0.025339
0.1	0.0683366	0.0699652	0.0715939
0.2	0.159795	0.161206	0.162617
0.3	0.28203	0.283482	0.284934
0.4	0.42313	0.424454	0.425777
0.5	0.57056	0.571783	0.573006
0.6	0.711806	0.713131	0.714456
0.7	0.834706	0.836159	0.837612
0.8	0.927116	0.928528	0.92994
0.9	0.976264	0.977899	0.979534
1	0.968678	0.971934	0.97519

На рисунке 6.17 приведены экспериментальные значения, кривая регресси-

онной модели и 95%-е доверительные границы. Как следует из рисунка, регрессионная модель 3-го порядка хорошо отвечает экспериментальным данным.

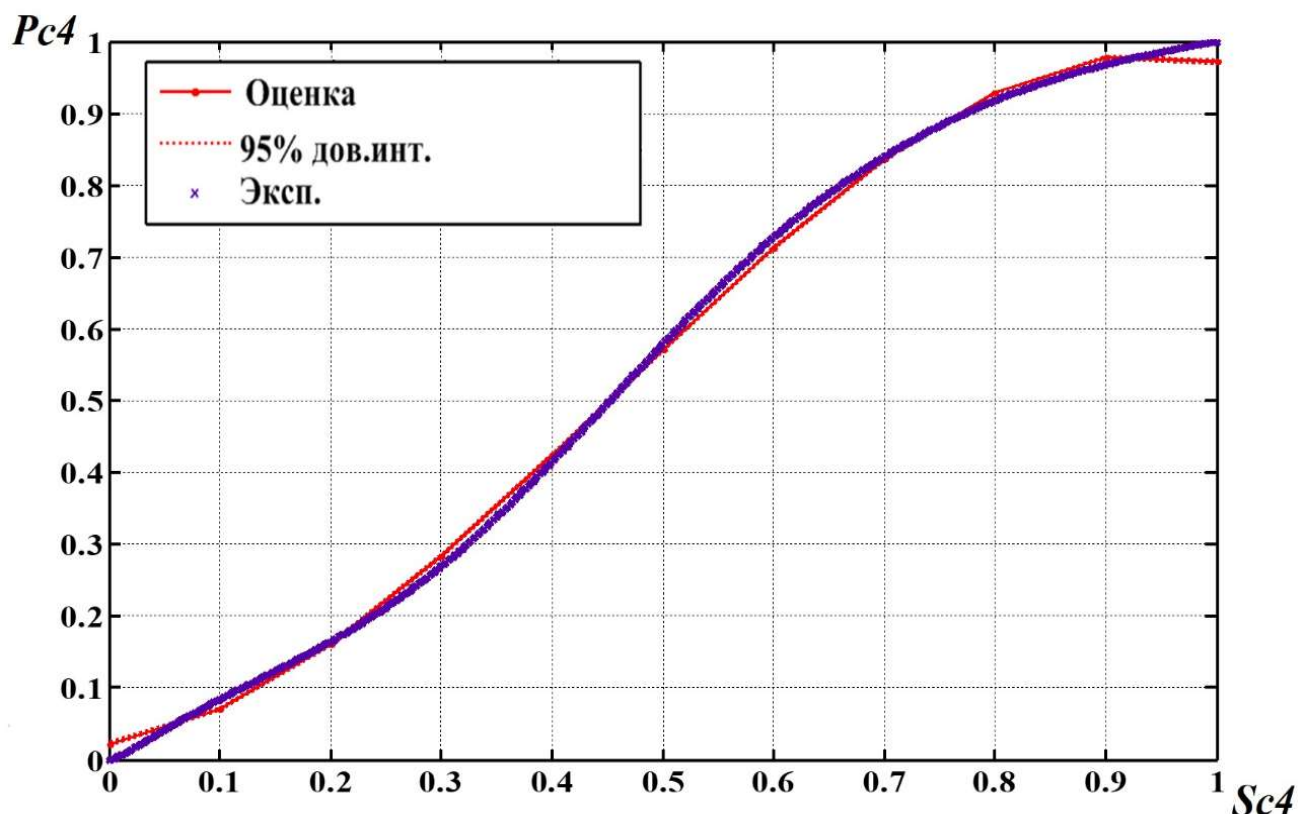


Рисунок 6.17. Экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы для образца 4

Образец 5.

Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии приведены в таблице 6.20. Из таблицы следует, что все коэффициенты регрессии значимы.

Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.998$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

В таблице 6.21 приведены прогнозные точечные $Pc5$ ($Sc5$) и нижние Low $Pc5$ ($Sc5$) и верхние Up $Pc5$ ($Sc5$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc5$.

Таблица 6.20. Точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии образца 5

Коэфф.	Точечная оценка	Интервальная оценка
C_1	0.01703	(0.01336, 0.0207)
C_2	0.2926	(0.2608, 0.3244)
C_3	2.774	(2.7, 2.848)
C_4	-2.118	(-2.166, -2.069)

Таблица 6.21. Прогнозные точечные $Pc5$ ($Sc5$) и нижние Low $Pc5$ ($Sc5$) и верхние Up $Pc5$ ($Sc5$) интервальные значения регрессии в диапазоне кодированных значений $Sc5$.

$Sc5$	Low $Pc5$ ($Sc5$)	$Pc5$ ($Sc5$)	Up $Pc5$ ($Sc5$)
0	0.0133622	0.0170315	0.0207008
0.1	0.0700729	0.0719144	0.0737559
0.2	0.167977	0.169568	0.171159
0.3	0.295648	0.297286	0.298923
0.4	0.440867	0.44236	0.443853
0.5	0.590706	0.592085	0.593464
0.6	0.73226	0.733752	0.735245
0.7	0.853019	0.854657	0.856295
0.8	0.940498	0.942091	0.943683
0.9	0.981506	0.983347	0.985188
1	0.962056	0.965719	0.969383

На рисунке 6.18 приведены экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы. Как следует из рисунка, регрессионная модель 3-го порядка хорошо отвечает экспериментальным данным.

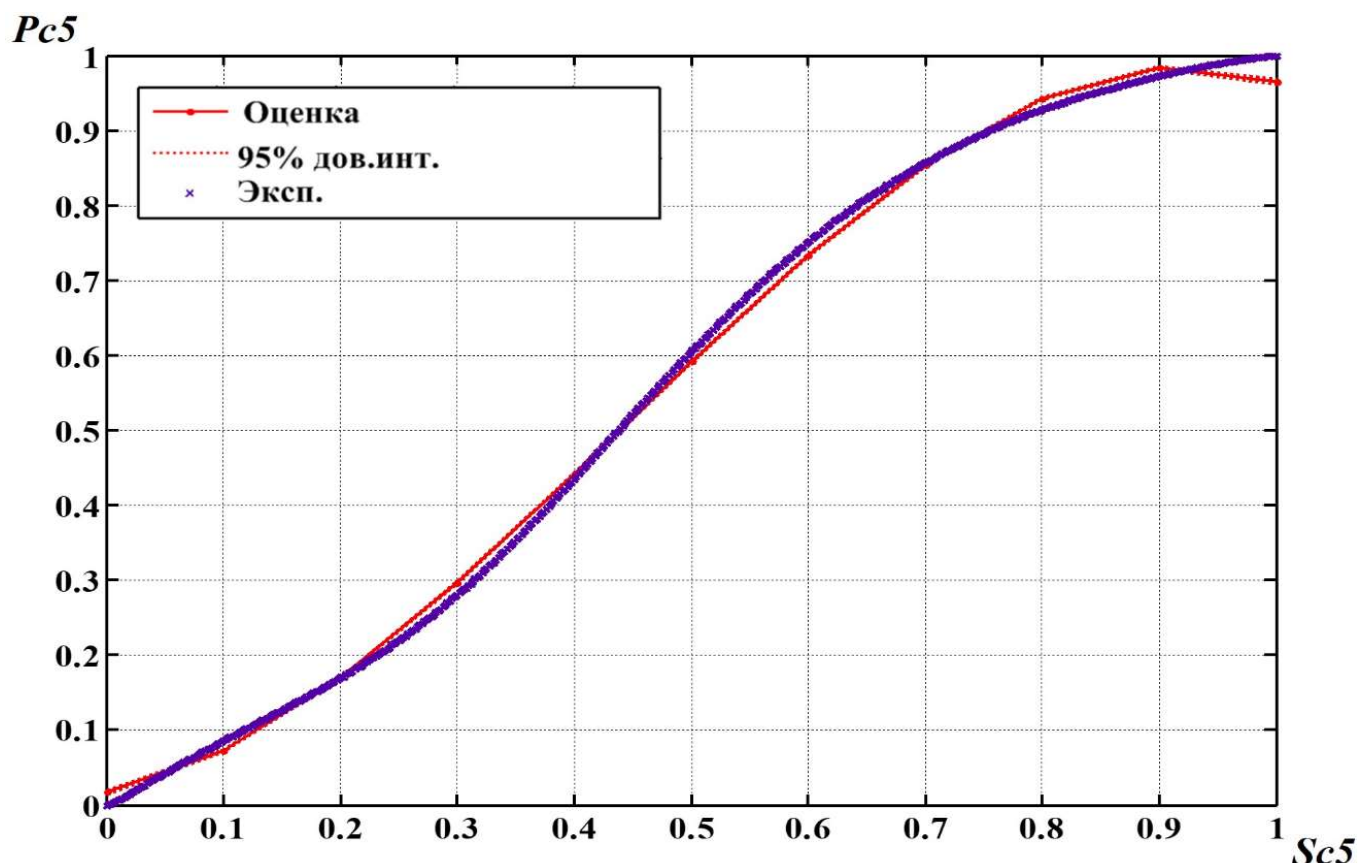


Рисунок 6.18. Экспериментальные значения, кривая регрессионной модели и 95%-е доверительные границы

Сводные оценки коэффициентов регрессионной модели по образцам представим в одной таблице и найдем усредненные оценки этих коэффициентов по образцам (таблица 6.22).

Таблица 6.22. Сводные оценки коэффициентов регрессионной модели по образцам

Коэфф-ты регрессии	Точечная оценка по пяти образцам					Средняя оценка	Медианная оценка	Бутстреп- оценка
	1	2	3	4	5			
C_1	0.06214	0.01805	0.0186	0.0221	0.01703	0.0189	0.0183	0.0188
C_2	-0.9383	0.2713	0.228	0.2207	0.2926	0.2531	0.2496	0.2510
C_3	5.658	2.955	2.924	2.786	2.774	2.8598	2.8550	2.8509
C_4	-3.828	-2.279	-2.202	-2.056	-2.118	-2.1637	-2.1600	-2.1529

Поскольку оценки коэффициентов по первому образцу заметно отличаются

от оценок по четырем другим образцам, исключим их из дальнейшего анализа. Вычислим средние и медианные значения, а также бутстреп-оценки по оценкам коэффициентов для 2-го – 5-го образцов с использованием следующих операторов Matlab:

```
>> C=C (2:5)
C = [0.0181; 0.0186; 0.0221; 0.0170; 0.2713; 0.2280; 0.2207; 0.2926;    2.9550;
2.9240; 2.7860; 2.7740; -2.2790; -2.2020; -2.0560; -2.1180]
>> Cm=mean(C')
Cm = [ 0.0189; 0.2531; 2.8598; -2.1637]
>> Cm=median(C')
Cm = [ 0.0183; 0.2496; 2.8550; -2.1600]
>> bootstat1 = bootstrp (100, @median, C (1, :));
>> bootstat2 = bootstrap (100, @median, C (2, :));
>> bootstat3 = bootstrap (100, @median, C (3, :));
>> bootstat4 = bootstrap (100, @median,C(4,:));
>> B1=mean(bootstat1)
B1 = 0.0188
>> B2=mean(bootstat2)
B2 = 0.2510
>> B3=mean(bootstat3)
B3 = 2.8509
>> B4=mean(bootstat4)
B4 = -2.1529
>> x = 0:0.1:1; yb=B1+B2*x+B3*x.^2+B4*x.^3;
>> plot (Sc2, Pc2, Sc3, Pc3, Sc4, Pc4, Sc5, Pc5, x,yb)
```

На рисунке 6.19 показаны результаты экспериментов для 2-5 образцов и кривая усредненной регрессионной модели бутстреп-коэффициентами регрессии. Хотя экспериментальные значения отмечены на графиках точками, большое количество значений приводит на рисунке к слиянию этих точек в линии. Построенная

усредненная полиномиальная регрессионная модель третьего порядка, описывающая в кодированных единицах зависимость механического напряжения в ткани от удлинения по основе, достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным.

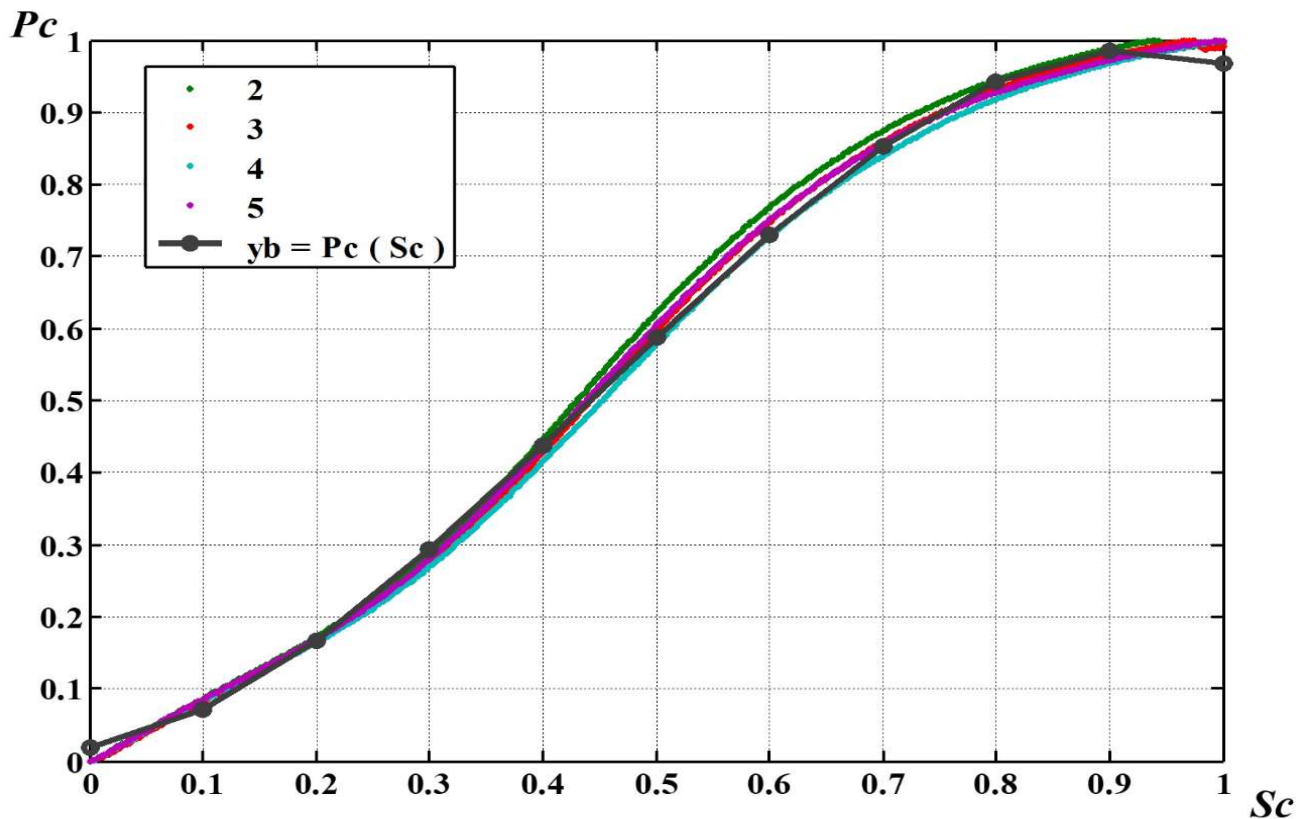


Рисунок 6.19. Результаты экспериментов для 2-5 образцов и кривая усредненной регрессионной модели бутстреп-коэффициентами регрессии

Исследование механических свойств смесовой ткани методом полуцикловых испытаний

Приведем характеристики испытываемой ткани: образец ткани смесовой Grey, цвет серый – 0,75 м., 20.01.23. Код образца 10-1. Испытания проведены в соответствии Нормативной Документацией, регламентирующей методы испытаний: ГОСТ ИСО 1833-2001, ГОСТ 3811-72, ГОСТ 3813-72, ГОСТ 18976-73, ГОСТ 12088-77, ГОСТ 30157.0-95, ГОСТ 30157.1-95, ГОСТ 9733.3-83, ГОСТ 9733.4-83, ГОСТ 9733.5-83, ГОСТ 9733.8-83, ГОСТ 9733.13-83,

ГОСТ 9733.27-83, ГОСТ 25617-2014.

Основные характеристики образцов и результаты испытаний показаны в таблице 6.23.

Таблица 6.23. Основные характеристики образцов смесовой ткани

Код образца	Наименование показателя, ед. изм.	Результат	Метод испытаний
10-1	Вид и массовая доля волокон, % Основа, уток	См. Пр – Хлопок – 74.8 ПЭ – 25.2	ГОСТ ИСО 1833-2001
	Поверхностная плотность, г/м ²	202,5	ГОСТ 3811-72
	Разрывная нагрузка, Н		ГОСТ 3813-72
	– по основе	1359,4	
	– по утку	766,4	
	Раздирающая нагрузка, Н		ГОСТ 3813-72
	– по основе	52,8	
	– по утку	43,6	
	Стойкость к истиранию, циклы	3746	ГОСТ 18976-73
	Воздухопроницаемость, дм ² /м ² с	58	ГОСТ 12088-77
	Изменение размеров после мокрой обработки, (стирка T = 80°C) %		ГОСТ 30157.0-95, ГОСТ 30157.1-9
	– по основе	-1.2	
	– по утку	-0.5	

Испытания проводились при соблюдении стандартных климатических условий по ГОСТ Р ИСО 139-2007, ГОСТ 10681-75, при соблюдении кондиционирования образцов в соответствии с нормативной документацией на метод испытаний.

Использованное измерительное оборудование – Разрывная машина РТ-250 (шкала нагрузок $\pm 1\%$, пределы измерений 0-250 кгс), прибор ИТ-3М (предел измерений – 100 об/мин), прибор ВПТМ-2 (предел измерений 5-2500 дм³/м²с), прибор «Scourotester FE-09/A» (20-100 г, скорость 40 об/мин), прибор «Stainingtester FD – 17/A» (нагрузка – 0,98 кгс. Диаметр трущей поверхности – 1.5 см).

В таблице 4 (Приложение Д) приведены результаты полудециальных испытаний для образцов ткани при их удлинении по основе.

После преобразований данных, аналогичных выполненным в предыдущем

примере (переход к абсолютному удлинению и кодированным переменным), были построены кривые зависимости силы сопротивления удлинению P_c от абсолютного удлинения S_c (в кодированных единицах). Соответствующие кривые отображены на рисунке 6.20.

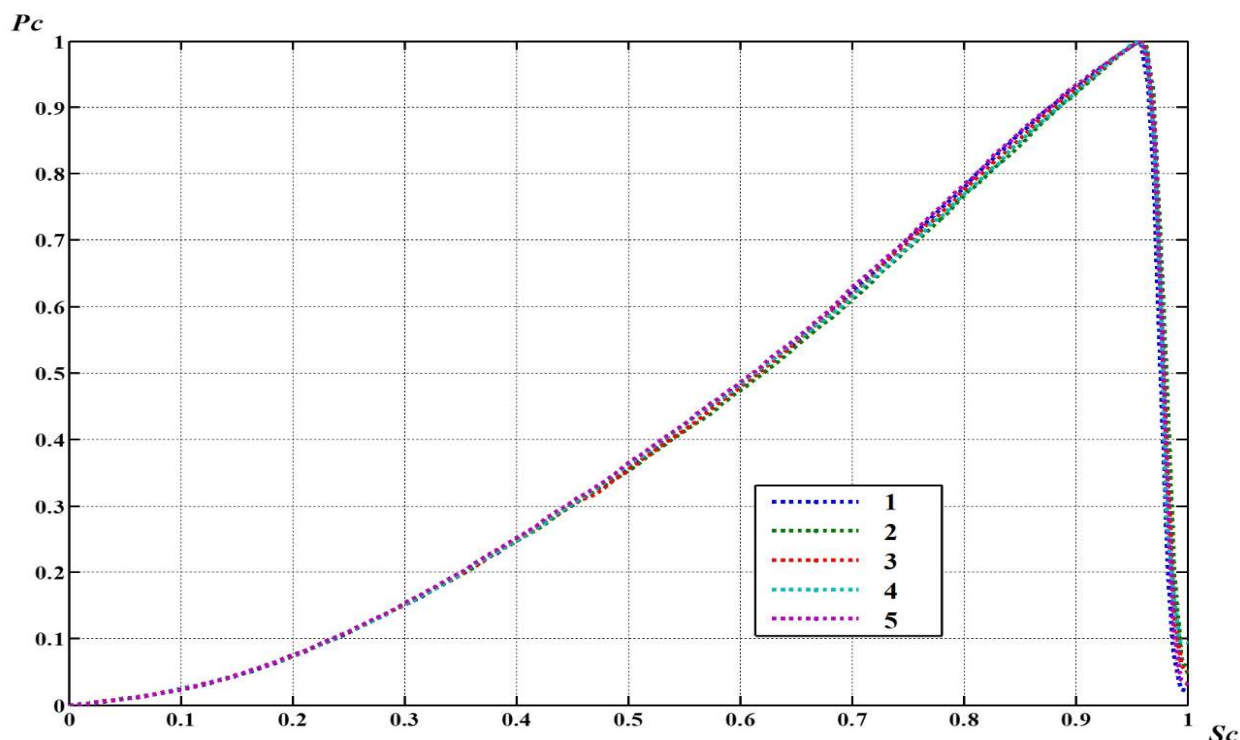


Рисунок 6.20. Кривые зависимости силы сопротивления удлинению P_c от абсолютного удлинения S_c (в кодированных единицах)

Из рисунка видно, что все пять образцов в кодированных единицах практически неразличимы на всех участках полуциклового испытания.

К этим результатам был применен инструментальный `cftool` системы Matlab для построения нелинейной регрессионной модели, несколько отличающейся от ранее использованной, более простой модели, для учета явно выраженного криволинейного начального участка зависимости:

$$P_c = a \cdot \frac{S_c^b}{1 + c \cdot S_c^d} \quad (6.15).$$

Это привело к оценкам коэффициентов регрессии, отображенным в таблице 6.25.

Таблица 6.25. Сводные коэффициенты регрессии

Коэфф.	Точечная оценка по пяти образцам					Средн.	Мед.	Бутстр.
	1	2	3	4	5			
a	1.134	1.096	1.106	1.1	1.11	1.1092	1.1060	1.1067
b	1.675	1.637	1.637	1.624	1.617	1.6380	1.6370	1.6368
c	13.92	35.3	53.08	71.97	86.39	52.1320	53.080	55.954
d	180.1	178.9	180.2	184	196.4	183.920	180.200	181.597

Графики полученных регрессионных моделей показаны на рисунке 6.21. Видно, что линии регрессии для разных образцов практически совпадают как между собой, так и с экспериментальными данными. Близкие оценки усредненных по образцам коэффициентов регрессии (см. таблицу 6.25) так же говорят об адекватности построенных регрессий обрабатываемых данных.

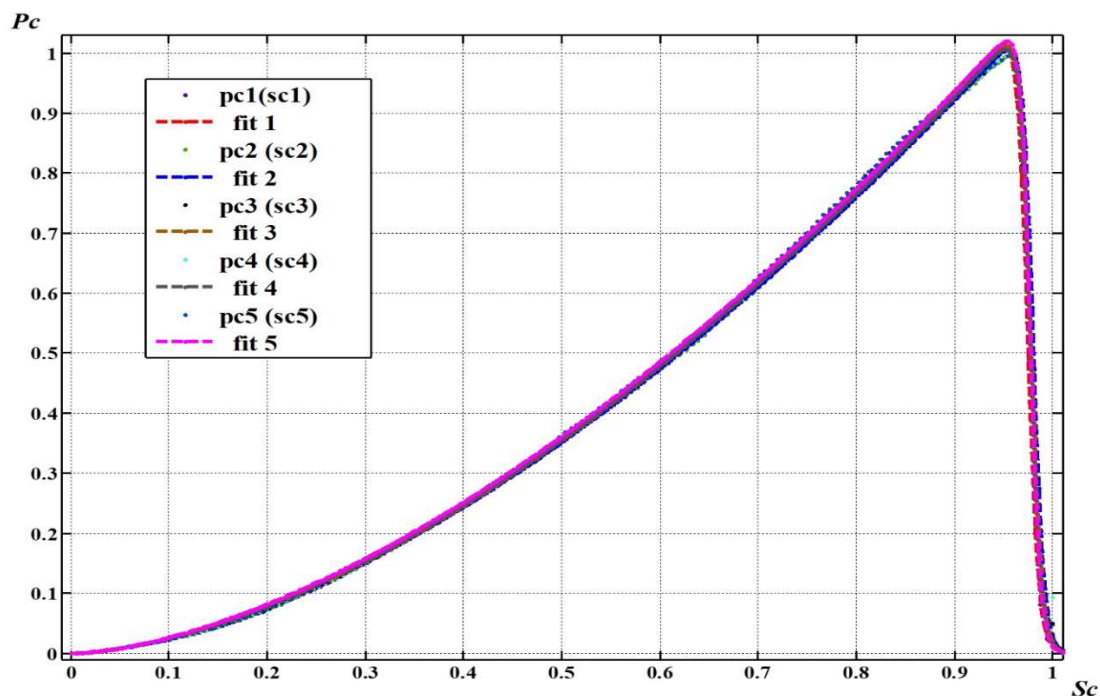


Рисунок 6.21. Регрессионные модели (переменные по осям координат показаны в относительных единицах)

6.4. Концептуальный подход к моделированию процессов получения текстильных материалов с заданными свойствами

Суммируя вышеприведенные исследования, можно заключить, что основное требование к разрабатываемым моделям состоит в их соответствии реальному объекту. Степень соответствия модели тому реальному явлению, которое она описывает, называют адекватностью модели.

Определение адекватности – один из основных этапов построения любой модели. Для количественной оценки адекватности используют понятие «точность модели» [226]. Каждая модель должна сопровождаться информацией о ее точности для достоверного использования результатов моделирования. Точность детерминированных величин определяется отклонением результата моделирования от соответствующей ему реальной величины, а точность стохастических моделей оценивают вероятностными характеристиками. Для обеспечения адекватности модели целесообразно использовать следующие рекомендации [227]:

- выбрать схему алгоритма модели, соответствующую целям и задачам исследования;
- применить итеративный процесс разработки модели с оценкой каждого этапа моделирования и промежуточных результатов, проанализировать точность полученных данных и осуществить их коррекцию, при необходимости, и модели предыдущего этапа;
- соотнести модельные данные с имеющимися экспериментальными результатами;
- осуществить корректировку модели на основе полученных результатов, экспертных оценок и прочих дополнительных данных [226].

Усложнение технологических процессов, увеличение числа параметров, значимых при их построении, сокращение сроков моделирования, необходимость экономии материальных и финансовых средств, делают трудно реализуемым и не целесообразным предметное моделирование.

Математическое моделирование технологических процессов с использованием современных компьютерных технологий позволяет избежать этих проблем [228].

Под ним мы понимаем исследование, осуществляемое путем нахождения и решения системы математических зависимостей, описывающих технологический процесс. Можно выделить три этапа:

- этап разработки математического описания процесса, и/или его этапов;
- составление методики решений, полученных уравнений и функциональных зависимостей, разработка алгоритма, описывающего технологические процессы и на его основе программы для получения количественных величин или соотношений [228];
- сопоставление полученной модели с оригиналом.

Математическое моделирование технологических процессов ведет к их упрощению, схематизации, представлению при помощи системы разнообразных уравнений.

Анализ математической модели предполагает выделение с ее помощью:

- смыслового аспекта физического состояния моделируемого объекта;
- системы уравнений, описывающих технологические процессы на всех этапах передела текстильного материала;
- метода и алгоритма решения, программного комплекса, приводящего к получению искомых результатов [227].

Современные возможности компьютерной техники позволяют осуществлять имитационное моделирование, строить цифровые двойники проектируемых изделий и технологических процессов. Имитационная модель позволяет воспроизвести процесс функционирования системы во времени. Комбинирование входных данных позволяет получать сведения о моделируемом изделии и протекании технологических процессов во времени, оценить изменение в динамике исследуемых характеристик объекта.

На рисунке 6.22 приведен общий вид авторской модели, описывающей последовательность проведения моделирования текстильного изделия с заданными

свойствами, начиная от выбора исходного материала, параметров, влияющих на данный продукт, требований к формируемому продукту и ее соответствия поставленным целям.

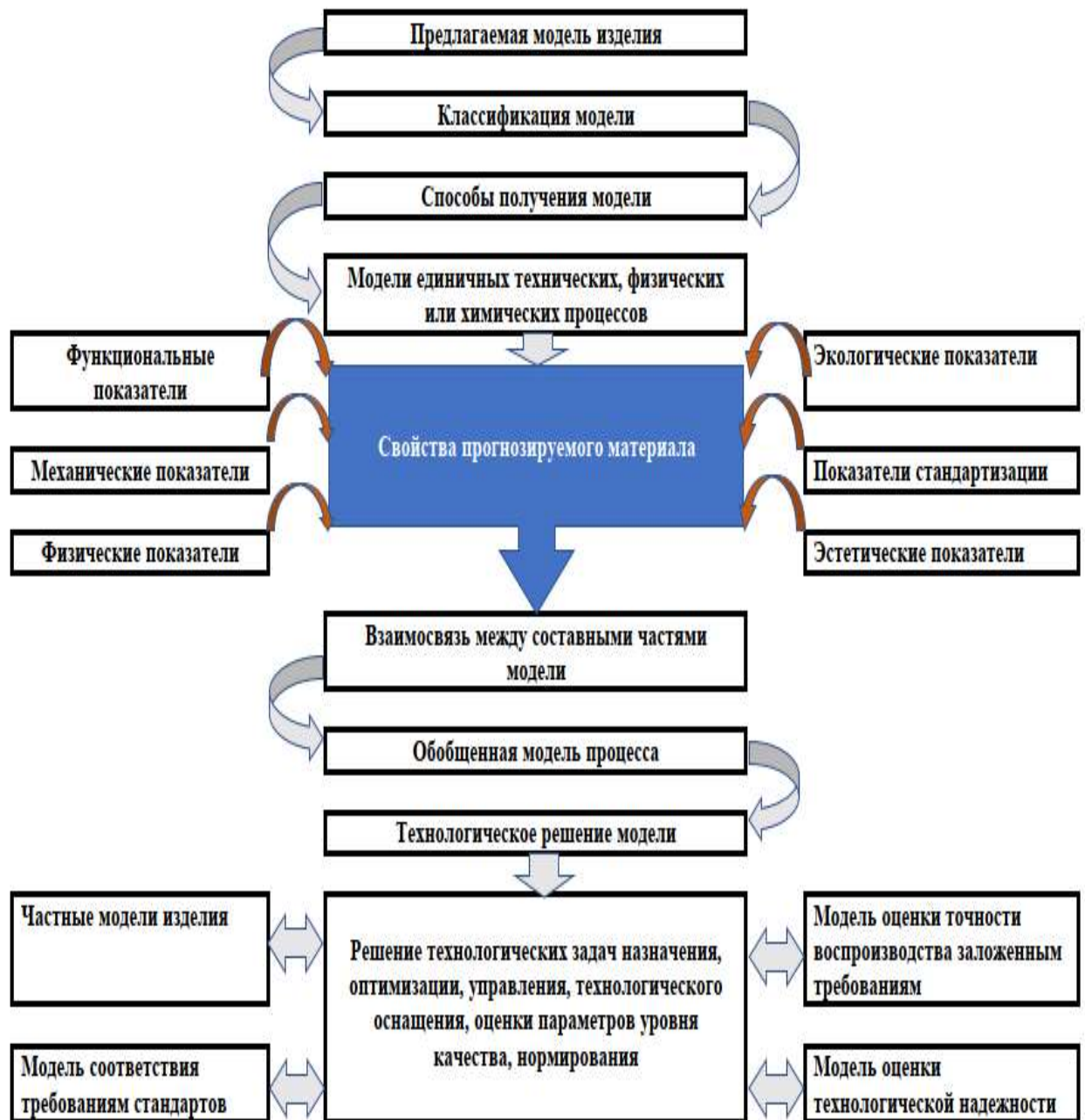


Рисунок 6.22. Концептуальная модель описания процесса получения текстильного изделия с заданными свойствами.

Исходя из предложенной модели описания процесса получения текстильного изделия с заданными свойствами, можно выделить несколько этапов.

На начальной стадии предлагается модель конкретного изделия и устанавливается, к какой группе это изделие относится, а также способ его получения в зависимости от исходного сырья, технологии получения данного продукта.

На втором этапе необходимо выяснить влияние разнообразных факторов на технологические, физические и химические процессы, а также как поведет себя предлагаемая прогнозируемая модель при воздействии на нее различных факторов (функциональных экологических, механических, эстетических и др.).

Как следствие устанавливается взаимосвязь между различными компонентами и факторами этой модели с целью получения обобщенного вида предлагаемой модели и возможностью технологического решения поставленной задачи.

Сократить период нахождения оптимального варианта в рамках поставленной задачи, возможно при помощи имитационного моделирования, что позволяет значительно сократить процесс получения адекватной модели, и как следствие ускорить решение конкретной задачи по проектированию текстильных материалов с заданными свойствами, начиная от выбора исходного сырья до конечного продукта.

Выводы по главе 6

1. Обоснована специфика обработки результатов полуцикловых испытаний волокнистых материалов при исследовании их механических свойств.

2. Предложена методика обработки результатов испытаний, основанная на обработке результатов по каждому испытываемому образцу с последующим усреднением результатов по образцам.

3. Приведены примеры применения предложенной методики для результатов исследования нетканого материала, смесовой и полиамидной ткани в полуцикловых испытаниях.

4. Предложены регрессионные модели для зависимостей между удлинением волокнистого материала и его механическим напряжением сопротивления этому удлинению. Показана процедура обработки результатов эксперимента с получением таких моделей.

5. Для обоснования предлагаемых методов обработки данных использовано имитационное статистическое моделирование результатов натурных испытаний и их автоматизированной обработки.

6. Показана технология автоматизированной обработки данных, упрощающая и ускоряющая процесс обработки.

7. Предложено при обработке результатов эксперимента для обеспечения большей достоверности использовать робастные меры оценивания.

8. С учетом малого количества испытываемых образцов предложено применять метод размножения выборок (бутстреп-метод) и приведены примеры такого применения, которые дали удовлетворительные результаты при оценивании усредненных значений коэффициентов регрессии.

9. Предложена концептуальная модель, которая позволяет с помощью имитационного моделирования описать процесс получения текстильного изделия с заданными свойствами, начиная от выбора исходного сырья до конечного продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Разработана концептуальная модель описания технологического процесса получения текстильного материала с заданными свойствами, имеющая три этапа:

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

3. Предложена концепция взаимовоздействия 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. Примененный 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. Использование методов теории подобия и анализа размерностей существенно облегчает нахождение функциональных многопараметрических зависимостей. В работе предложена методика, представлена функциональная зависимость, позволяющие прогнозировать разрывную нагрузку тонковолокнистого и средневолокнистого хлопка в зависимости от различных исходных параметров.

7. Проведены исследования хлопковой, вискозной, полиэфирной, хлопково-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. Приведенные исследования показали, что рассматриваемые факторы по-разному влияют на конечный продукт, поэтому в работе представлена комплексная оценка качества исследуемых продуктов.

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

9. Исследованы классические одно- и многозвенные математические модели деформации материалов на предмет их применимости к волокнистым материалам, отличающимся большим статистическим разбросом параметров, что приводит к асимметричным распределениям величин деформации образцов и неопределенности их значений. Установлены отклонения в поведении различных стандартных моделей деформации при описании этих процессов применительно к текстильным материалам.

10. При статистическом моделировании зависимостей «нагрузка-деформация» установлено, что результаты деформации зависят не только от

усредненных показателей, но и от 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 эффектов 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. Предложен 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития легкой промышленности до 2030 года. <http://triumph-strategy.ru>
2. 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
3. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. №145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» <http://publication.pravo.gov.ru>
4. Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. №529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий» <http://publication.pravo.gov.ru>
5. Кащеев О.В. Российский рынок технического текстиля. Анализ, проблемы, тенденции и перспективы его развития // *Текстильная промышленность*. 2006. № 1-2. С. 64-68
6. Кучеров В.Г., Тужиков О.И., Тужиков О.О., Ханов Г.В. Основы научных исследований. ВолгГПУ. - Волгоград, 2004. - 303 с.
7. Бобровников Г.Н., Клебанов А.И. Прогнозирование в управлении техническим уровнем и качеством продукции. М.: Издательство стандартов, 1984. - 232 с.
8. Тихонов Э.Е. Прогнозирование в условиях рынка. Учебное пособие. СКГУ.: Невинномысск, С-КГУ 2006. - 221 с.
9. Каширин В.П. Методология науки: учеб. пособие // Красноярский государственный аграрный университет. - Красноярск, 2007. - 106 с.
10. Жуковская В.М. Факторный анализ в социально-экономических исследованиях. М.: Кронус. 2011.- 152 с.
11. Maxwell J. Cl. On the Dynamical Theory of Gases. *Phil. Trans.*, 1867, vol. 157, p. 52, *Phil. Mag.*, 1868, vol. (4) 35, p. 133.
12. Boltzman L. Zur Theory der elastischen Nachwirkung. *Wiener Ber.*, 1874, Bd. 70, S. 275, *Pogg. Ann.*, 1876, Bd. 7, S. 624-654, 1878, Bd. 5, S. 430- 432, *Wiener Ber.*,

1877, Bd. 76.

13. Thomson J.-J. Application of Dynamics to Physics and Chemistry. London and New York, 1888, Chapter VIII. On Residual Effects, p. 128-139.

14. Voigt W. Abh. G6tt. Ges. 1890, Bd. 36, 1892, Bd. 38, Wien Ann.

15. Кузнецов А.А. Разработка экспресс-методов оценки и прогнозирования физико-механических свойств текстильных нитей. Дис. докт. техн. наук: 05.19.01. // М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2009.

16. Кукин Г.Н., Наймарк Н.И. Применение метода электрических аналогий к исследованию деформаций текстильных нитей. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1961, №5. С.12-19

17. Качанов Л. М. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехиздат, 1949 - 237 с.

18. Качанов Л.М. Теория ползучести. М.: Физматгиз. 1964 - 51 с.

19. Качанов Л.М. К ползучести анизотропных тел. Изв. АН СССР, ОТН, мех. и маш., № 4, 1964. С.75-84

20. Nadai A., Davis E. A. The Creep of Metals, II, J. Appl. Mech., 1936, March.

21. Davenport C. C. Corelation of Creep and Relaxation Properties of Coppers. J. Appl. Mech., 1938, 5, Ks 2.

22. Гуль В.Е. Прочность полимеров. М.: Химия, 1964. – 228 с.

23. Ивлев Д. Д. Механика пластических сред. В 2 т. Т. 2. Общие вопросы. Жесткопластическое и упругопластическое состояние тел. Упрочнение. Деформационные теории. Сложные среды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 449 с.

24. Ржаницын А.Р. Теория ползучести [Текст] / А. Р. Ржаницын, проф. д-р техн. наук. - М.: Стройиздат, 1968. - 416 с.

25. Трусов П.В. Теория пластичности: учеб. пособие/ П.В. Трусов, А.И. Швейкин. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. - 425 с. ISBN 978-5-398-00558-5

26. Ильюшин, А.А. Труды. Том 3. Теория термовязкоупругости. / А. А. Ильюшин; составители: Ильюшина Е. А., Тунгускова В. Г.; Российская академия наук, Российская академия ракетных и артиллерийских наук. – М.: Физматлит, 2007. – 288 с.

27. Ильюшин, А.А. Механика сплошной среды. [Текст]- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1978. - 287 с.
28. Ильюшин, А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. [Текст] – М.: Наука, 1970. – 280 с.
29. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977. - 383 с.
30. Работнов, Ю.Н. Кратковременная ползучесть [Текст] / Ю. Н. Работнов, С. Т. Милейко. - М: Наука, 1970. - 222 с.
31. Волынцев А.Б. Наследственная механика дислокационных ансамблей. Компьютерные модели и эксперимент. [Текст] – Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1990. – 288 с.
32. Ишлинский А.Ю. Пространственное деформирование не вполне упругих и вязкопластических тел. Изв. АН СССР. ОТН, №3, 1943. С. 65-69.
33. Ишлинский, А.Ю. Математическая теория пластичности [Текст] / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. - М: Физматлит, 2001. - 701 с.,
34. Розовский М.И. Ползучесть и длительное разрушение материалов. ЖТФ, т.ХХI, №11, 1951. С. 35-39
35. Розовский М.И. Кривая течения и упругое последствие. ЖТФ, т.ХХII, №5, 1952. С. 46-50
36. Розовский М.И. Обработка кривых ползучести на основе интегральных уравнений. Изв. вузов, «Машиностроение», 1960, №3. С. 43-47.
37. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. [Текст] – М.: Химия, 1984. – 280 с.
38. Журков С.Н., Санфирова Т.П., Томашевский Э.Е. – Высокомолекулярные соединения, 1962. Т.4, № 2, с.196 – 201.
39. Перепелкин К.Е. Структурная обусловленность механических свойств высоко ориентированных волокон [Текст]: (Обзорная информация по важнейшим науч.-техн. проблемам промышленности химических волокон) / К.Е. Перепелкин. – М.: НИИТЭХим, 1970, вып. Дан. 1971. – 70 с.- (Обзорная информация/ Всесоюз. науч.-исслед. ин-т искусств. волокон: ВНИИВ)

40. Карташов Э.М. Разрушение пленок и волокон [Текст]: структурно-статистические аспекты / Э.М. Карташов, Б. Цой, В.В. Шевелев. – Изд.2-е, испр. и доп. – М.: URSS, 2015/ - 779 с.: ISBN 978-5-0720-0944-3

41. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.

42. Маслов Г.Н. Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных сооружений [Текст]. – М.: Энергия, 1968. – 160 с.

43. Leaderman H. Elastic and Creep Properties of Filamentons and Otger High Polymers. Washington Textile Foundation, 1943.

44. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика-механика полимеров. [Текст]. М.: Высшая школа. 1983. - 391 с.

45. Зеленов Ю.В. Релаксационные явления в полимерах. [Текст] М.: Химия. 1971. - 370 с.

46. Макаров, А. Г. Прогнозирование деформационных процессов в текстильных материалах: монография / А. Г. Макаров, Н. В. Переборова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна». – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «СПбГУПТД», 2020. – 143 с.

47. Макаров А.Г. Математические методы анализа физико-механических свойств материалов легкой промышленности. [Текст] – Санкт-Петербург: СПбГУ-ТиД. 2002.- 208 с.

48. Сталевич А.М. Исследование упруго-релаксационных свойств синтетических волокон технического назначения [Текст]: Автореферат докт. техн. наук. (02.00.07) / Ленингр. ин-т текстильной и легкой промышленности им. С. М. Кирова. - Ленинград: 1973. - 61 с.

49. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Определение вязкоупругих характеристик полимерных материалов на примере полиакрилонитрильной нити// Химия волокна. 2001. №6. С.68-70.

50. Щербаков В.П. Введение в наследственную механику текстильных материалов [Текст]. М.: МГТА. 1996. – 81 с.
51. Каргин В.А., Смолинский Г.Л. Краткие очерки по физикохимии полимеров [Текст]. – М.: Химия. 1967.- 232 с.
52. Кауш Г. Разрушение полимеров [Текст] - М.: Мир. 1981. - 440 с.
53. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука. 1977. - 348 с.
54. Розовский М.И. Ползучесть и длительное разрушение материалов// Ж. Журнал технической физики. XX1. 1951. №11 с. 54-63.
55. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Релаксационные явления в полимерах. [Текст]. - Л.: Химия. 1972. - 249 с.
56. Сталевич А.М. Деформирование высоко ориентированных полимеров ч.1. Теория линейной вязко упругости. СПбГУТД. 1995. - 79 с.
57. Малинин И.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. [Текст] - М.: Машиностроение. 1968. - 400 с.
58. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. [Текст] – М.: Высшая школа. 1982. - 264 с.
59. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение [Текст]. Часть III – М: Легкая индустрия, 1967. - 302 с.
60. Hearle I.W.S., Структура волокон. [Текст]. М.: Химия, 1969. 160 с.
61. Hearle I.W.S., Structural Mechanics of fibres. J of Polimer Scieens. Part. 1967, №20, p.215-251.
62. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. [Текст] - М.: Химия. 1985. - 205 с.
63. Щербаков В.П. Прикладная механика нити. [Текст] - М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 1979. - 300 с.
64. Щербаков В.П. Прикладная и структурная механика волокнистых материалов. [Текст] М.: Тико Принт. 2013. – 304 с.
65. Саркисов В.Ш. Влияние различных факторов на деформируемость и вяз-

коупругие свойства ориентированных полимеров. Дисс. докт. техн. наук: специальность 05.19.01 Материаловедение (текстильное, кожевенно-меховое, обувное, швейное) Санкт-Петербург, 2000

66. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение (волокна и нити). [Текст]. М.: Легпромбытиздат, 1989. - 352 с.

67. Шустов Ю.С., Майоров М.А., Щербаков А.Б. Методика оценки жесткости на изгиб волокон шерсти // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1997. - №3 (237). С.14-18

68. Старовойтова Г.П., Железнякова Т.А., Железнякова А.С. Об изменении напряженно-деформационного состояния материалов методом стробоскопии// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2023. - №3 (272). С.23-26.

69. Сталевич А.М., Макаров А.Г., Петрова Л.И., Челышев А.М. Моделирование вязкоупругости полимерного волокнистого материала сложного строения// Физикохимия полимеров. Вып. 10. Тверь. 2004. С.196-110.

70. Макаров А.Г. Разработка компьютерных технологий моделирования физико-механических свойств текстильных материалов сложного строения. Дис. докт. техн. наук: 05.13.01, 05.19.01. СПб.: 2004

71. Демидов А.В.Ю Макаров А.Г., Сталевич А.М. Системный анализ вязкоупругости текстильных материалов// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007.- № 3 (298). С. 11-14.

72. Алфрей Т. Механические свойства высокополимеров. [Текст]. – М.: Иностранная литература, 1952. -325 с.

73. Ильюшин А.А., Победря В.В. Основы математической теории термовязкоупругости. [Текст]. М.: Наука. 1970. 280 с.

74. Сталевич А.М. Деформирование высоко ориентированных полимеров. [Текст]. – СПб., 1995. 79 с.

75. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Методы компьютерного анализа вязкоупругости технических тканей// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. №3(290). - С. 13-17.

76. Мигушов И.И. Механика текстильной нити и ткани. [Текст]. М.: Легкая индустрия. 1980.- 160 с.
77. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Выявление направлений компьютерного прогнозирования деформационных свойств текстильных материалов// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007. №2 (297). С.14-16.
78. Сталевич А.М. Каноническое уравнение нелинейно-наследственной вязкоупругости нитей и других синтетических материалов// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2000. №5 (257). С. 9-12.
79. Гуревич Г.И. О законе деформации твердых и жидких тел // Журнал технической физики. – 1947, №12, 17. С.149-1502.
80. Бугаков И.И. О принципе сложения как основе нелинейных определяющих уравнений для сред с памятью // Механика твердого тела. – 1989, №5. С. 82-89.
81. Сталевич А.М. Уравнения нелинейной вязкоупругости высоко ориентированных полимеров // Проблемы прочности. – 1981, №12. С. 95-98.
82. Сталевич А.М. Кинетический смысл релаксационных функций у высоко ориентированных синтетических нитей // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1980, №3. С.106-107.
83. Переборова Н.В., Макарова А.А. Прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов. Всероссийская научная конференция «Инновации молодежной науки» - СПб, 2021. – С.4.
84. Козлов А.А., Макаров А.Г., Александрова М.И. Моделирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов. Всероссийская научная конференция «Инновации молодежной науки» - СПб, 2021. – С.5.
85. Тиранов В.Г. Описание нелинейной зависимости между напряжением и деформацией комплексной нити// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1984. №6. С.8-12.
86. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Критерии оптимального выбора математической модели вязкоупругости текстильных материалов // Известия

Вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. №5 (293). С.21-25.

87. Макаров А.Г. Определение аналитической взаимосвязи нормированных ядер релаксации и ползучести текстильных материалов// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2002. №2 (266). С. 13-17.

88. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. [Текст]. – М.: Химия, 1985.

89. Киселев М.В. Конечно-элементное представление механических моделей вязкоупругих свойств волокон и нитей. Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. №6С (295). С.24-26.

90. Шеромова И.А. Старкова Г.П., Железняков А.С. Исследование напряженно-деформационного состояния волокнистых материалов. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2008. №3 (308). С. 21-24.

91. Богатырева М.С., Ерохова М.Н. Уточнение модели вязкоупругого тела с применением во времени. Известия вузов Технология текстильной промышленности. 2004. №6 (281). С. 15-18.

92. Некрашевич А.Б., Тиранов В.Г., Постников А.В. Изменение упруго релаксационных характеристик нити в зависимости от влаги. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. №1 (343). С. 22-24.

93. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М., Петрова Л.Н., Чельшев А.М. Исследование изменений деформационных свойств полиэфирных нитей в зависимости от степени крутки. // Известия вузов Технология текстильной промышленности. 2006. №4 (292). С. 9-13.

94. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Определение механических характеристик текстильных материалов при переменной температуре. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. №6(294). С. 15-18.

95. Богатырева М.С., Егорова М.Н. Уточнение модели вязкоупругого тела с переменной во времени вязкости // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006. №4 (292). С. 9-13.

96. Султанов К.С., Исмаилова С.И., Туланов Ш.Э. Нелинейная упруго-вязко-

пластическая модель деформирования хлопковой пряжи при растяжении // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. №5(365). С. 109-115.

97. Маня Л., Грибинча В., Суфицкий П. Исследование диаметра классической хлопковой пряжи и нити с хлопкообразным ядром для трикотажных изделий // Известия вузов. Технология текстильной промышленности 2001. №5 (263). С. 11-17.

98. Налетов В.В. Зависимость между деформацией и усилием в текстильных материалах в условиях кратковременных нагрузжений // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1975. №4. С.20-24.

99. Головина В.В. Моделирование и прогнозирование деформационных свойств полимерных текстильных материалов. Автореферат кан. техн. наук 05.19.01. СПГУТД. 2013.

100. Щербаков В.П., Скуланова Н.С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. [Текст]. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2008.- 268 с.

101. Голубков Д.В. Моделирование текстильных материалов с использованием численных методов анализа механики нелинейных систем. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. №4С (319). С.15-18.

102. Вихорев С.М. Применение теории Марковских процессов для моделирования динамики процесса трепания льна. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007. №6С (304). С.52-55.

103. Шаломин О.А., Матрохин А.Ю., Шубин А.С. Проектирование номинальных значений показателей качества текстильных изделий с использованием нейросетевого анализа. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. №3(339). С.18-25.

104. Москин И.В. Моделирование релаксационных процессов в нитях и разработка методов оценки их деформационных свойств. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.01. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2008.

105. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Васильева Е.К. Разработка методики проведения сравнительного анализа деформационных и релакса-

ционных свойств арамидных нитей и текстильных материалов на их основе // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. №5 (359). С.48-58

106. Николаев С.Д., Мельяченко Ж.В. Анализ причинно-следственных связей при изготовлении мебельно-декоративной ткани на основе бинарной причинно-следственной теории информации. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2001. №3 (261). С.28-32.

107. Бобровников Г.Н., Клебанов А.И. Прогнозирование в управлении техническим уровнем и качеством продукции. [Текст]. М.: Издательства стандартов. 1984. 232 с.

108. Диллон И.Х. Усталостные явления в высокополимерах. - Сборник «Усталость полимеров». [Текст]. М.: Госхимиздат. 1957, с.5-116.

109. Winkler F. Sistem of Dinamic Methode for High Polymer Solids. Faserf. Und Text., 1958. 9. №3, p.109-117.

110. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. [Текст]. М.: Ростехиздат, 1961, - 304 с.

111. Носов М.П., Гойхман А.Ш. Сравнение методов испытания нитей на многократное растяжение. // Химические волокна. 1960. № 4, С.42-48.

112. Носов М.П., Теплицкий С.С. Усталость нитей (Методы испытаний и приборы) [Текст]. М.: Техника. 1975. - 176 с.

113. Соловьев А.Н., Кирюхин С.М. Оценка качества и стандартизация текстильных материалов. [Текст]. М.: Легкая индустрия. 1974. - 248 с.

114. Лапшин В.В., Смирнова Н.А., Замышляева В.В. Теоретическое обоснование определения характеристик изгиба текстильных полотен в динамических условиях испытаний. // Известия вузов. Технология текстильной промышленности 2021. №1 (391). С.37-40

115. Белокуров В.Н., Бочаров В.Г., Лапшин В.В. Определение показателей деформации льняных тканей // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007, №4. С. 9-10.

116. Окрепилов В.В. Управление качеством [Текст] / В.В. Окрепилов. – М.: Экономика, 1998. – 639 с.

117. Studepedia. Ru 9_204048_osnovnie_ponyatiy_i_opredeleniya.
118. Перепелкин К.Е., Иванов М.Н., Куличенко А.В., Савина С.А. Методы исследования свойств текстильных материалов. Учебное пособие. Л.; ЛИТЛП. 1988. 69 с.
119. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. [Текст]. М.: Наука. 1978. - 399 с.
120. Айвазян С.А. Классификация многомерных наблюдений. [Текст]. М.: Статистика, 1974. - 240 с.
121. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. [Текст]. – М.: Металлургия, 1968 - 450 с.
122. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. - М.: Финансы и статистика, 2003. -352 с.
123. Волгин Н.С. Исследование операций. [Текст]. Ч.1. Л.: ВМА, 1999. - 366 с.
124. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. [Текст]. М.: Наука, 1973. – 374 с.
125. Орлов А.Н. Прикладная статистика. [Текст]. М.: Издательства «Экзамен». 2004.-656 с.
126. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. [Текст]. М.: Издательство техно-теоретической Лит., 19567. -659 с.
127. Сидоров А.И., Майоров П.Е., Стулов Д.И. Общий подход к определению вероятности нахождения организационно-технической системы в работоспособном состоянии. Проблемы автоматизации и управления в технических системах. // Сборник статей международной научно-технической конференции, посвященной 79-летию Победы в Великой Отечественной войне. Т.1. 2015. С. 409-415.
128. Шустов Ю.С., Кашеев О.В. Определение функциональных связей между свойствами текстильных материалов //Дизайн и технологии. - 2023. №93(135). С.93-99.

129. 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

130. Channon C.E. Communication in the presence of noise//Proc. Institute of Radio Engineers. -Jan, 1949. T 37 N37. C 10-21.

131. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса [Текст]. – Л.: Химия, 1979. – 234 с.

132. Власов А.А. Статистические функции распределения. [Текст]. М.: Физматгиз, 1966. – 134 с.

133. Николаев С.Д., Панин И.Н., Назарова М.В. Анализ причинно-следственных связей между параметрами, структурой паковки и свойствами нитей при перематывании на основе бинарной теории информации // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2001. №1 (259). 2001. С.28-33.

134. Николаев С.Д., Юхин С.С. Авилочкина Н.А. Установление причинно-следственных связей между свойствами нитей и их обрывностью на ткацком станке на основе бинарной причинно-следственной теории информации // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2000/ №6 (258). С.33-36.

135. Кащеева М.М. Разработка облегченных структур технических тканей из углеродных нитей и особенности их изготовления на ткацком станке. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02 М.: МГТУ. 2009.

136. Николаев С.Д., Мартынова А.А., Юхин С.С., Власова Н.А. Методы и средства исследования технологических процессов в ткачестве. [Текст]. М.: 2003. - 336 с.

137. Николаева Н.А. Разработка оптимальных технологических параметров изготовления тканей на основе использования котонированного льна. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02 М.: МГТУ. 2004.

138. Степанова Г.С. Анализ причинно-следственных связей в ткачестве. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02 М.: МГТУ. 2006.

139. Николаев С.Д., Кащеев О.В., Поликарпов А.В., Николаева Н.А., Рыбаулина И.В. Причинно- следственные связи при исследовании араимидных тканей // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки и технологии текстильной и легкой промышленности». 2016. С.91-94.
140. 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.
141. Шустов Ю.С., Кирюхин С.М. Текстильное материаловедение и управление качеством. [Текст]. М.: ИНФРА-М, 2022. -386 с.
142. Кирпичев М.Н. Теория подобия. М.: АН СССР. [Текст]. 1953. -213 с.
143. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. [Текст]. М.: Высшая школа. 1973.-269 с.
144. Седов Л.Н. Методы подобия и размерности в механике. [Текст]. М.: Наука, 1981. - 448 с.
145. Алабушев Л.М. и др. Теория подобия и размерностей. [Текст]. Моделирование. М.: Высшая школа, 1968. - 208 с.
146. Северцев Н.А., Шолкин В.Г., Ярыгин Г.А. Статистическая теория подобия. Надежность технических систем. [Текст]. М.: Наук, 1968. -205 с.
147. Афанасьев Ю.Д., Теория расчета в инженерных расчетах. [Текст]. М.: Высшая школа, 1967. -235 с
148. Шустов Ю.С. Методы подобия и размерности в текстильной промышленности. [Текст]. М: МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2002.-191 с.
149. Соловьев А.Н. Проектирование свойств пряжи в хлопчатобумажном производстве. Дисс. докт. техн. наук 05.00.00 – М.: МТИ, 1951
150. Корицкий К.И. Основы проектирования свойств пряжи. [Текст]. – М.: Гизлегпром, 1963. - 246 с.
151. Севостьянов А.Г., Севостьянов П.А. Моделирование технологических

процессов. [Текст]. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. -344 с.

152. Шаломин О.А., Матрохин А.Ю., Шубин А.С. Проектирование номинальных значений показателей качества текстильных изделий с использованием нейросетевого анализа // Известия Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №3. С. 18...25.

153. Шустов Ю.С. Определение разрывной нагрузки хлопчатобумажной пряжи кольцевого способа прядения // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. № 1, 2002. С. 13-15.

154. Шустов Ю.С. Определение разрывной нагрузки хлопчатобумажной пряжи пневмомеханического способа прядения // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. № 3, 2002. С. 13-14.

155. Шустов Ю.С. Современные методы прогнозирования свойств текстильных материалов. [Текст]. М.: РГУ им А.Н. Косыгина. 2018. - 234 с.

156. ГОСТ Р 53224-2008. Волокно хлопковое. Технические условия.

157. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопкового волокна тонковолокнистых сортов хлопчатника // Известия вузов. Технология текстильных материалов. 2022, №4, С. 52-55.

158. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопкового волокна средневолокнистых сортов хлопчатника // Дизайн и технологии. 2022, № 87 (129) С.64-68

159. Белицин Н.М. Зависимость между свойствами пряжи и свойствами волокна // Известия текстильной промышленности и торговли. 1930. № 5. С. 46-52.

160. Чеченева А.А. Разработка методов оценки деформации нитей и пряжи с применением наследственной теории. Дис. канд. техн. наук. 05.19.02. 2010.

161. Ростовцева Н.Г. Компьютерное моделирование релаксации ползучести полимерных нитей медицинского назначения. Дисс. канд. техн наук. 05.19.01. 2010.

162. Переборова Н.В., Егоров И.М., Козлова А.А., Оглуздина Л.В., Кондрашов В.В. Комплексное исследование механических свойств текстильных материалов и прогнозирование их деформационных процессов //Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2015. №2. С.88-97.

163. Шеромова И.А. Старкова Г.П., Железняков А.С. Исследование напряженно - деформационного состояния волокнистых материалов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2008. №3 (308). С. 21-24.
164. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич И.П., Горшков А.С. Основы математического моделирования релаксации и ползучести полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2013. №3. С.27-31.
165. Овсянников Д.А., Макаров А.Г., Сталевич А.М., Демидов А.В. Математическое моделирование вязкоупругих процессов полимеров // Вестник СПбГУ. Серия 10. Вып.3. 2006. С.46-54.
166. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Влияние многократного растяжения на остаточную циклическую деформацию волокон хлопка // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации 2022)». Москва. РГУ им. А. Н. Косыгина. 2022. С.41-43.
167. Шустов Ю. С. Разработка методов прогнозирования строения и свойств текстильных материалов с использованием теории подобия и анализа размерностей: диссертация доктора технических наук: 05.19.01. – 324 с.
168. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение (исходные текстильные материалы). [Текст]. М.: Легпромбытиздат. 1985. - 213 с.
169. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение (волокна и нити). [Текст]. М.: Легпромбытиздат. 1989. - 352 с.
170. Шустов Ю.С., Кирюхин С.М., Давыдов А.Ф. и др. Текстильное материаловедение. Лабораторный практикум. М: Инфра - М., 2016. – 341 с.
171. Шустов Ю.С., Давыдов А.Ф., Курденкова А.В. Экспертиза текстильных волокон и нитей. Монография. М.: МГУДТ, 2016. – 157 с.
172. Корицкий К.И. Вопросы структуры и проектирования хлопчатобумажной пряжи. [Текст]. М.: Гизлегпром, 1940. -124 с.
173. Корицкий К.И. Основы проектирования свойств пряжи. [Текст]. М.: Гизлегпром, 1963. - 246 с.

174. Сизова А.Л. Свойства смешанной пряжи и их зависимость от свойств волокна и смеси. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02. М.: МТИ, 1967
175. Ванчиков А.Н. Переработка смесей хлопка и химических волокон// Научно-исследовательские труды ЦНИХБИ за 1959 г. М.: Ростехиздат, 1961. С.64-103
176. Биренбаум Е.И. Проектирование прочности пряжи из смеси двух компонентов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1964, №4. С. 18-25
177. Шарова Т.М. Исследование влияния качества сырья и параметров технологического процесса на прочность, обрывность пряжи при пневмомеханическом способе прядения. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02. М.: МТИ. 1977.
178. Черников А.Н., Трусова Л.А. Проектирование свойств смесей и пряжи. Учебное пособие. М.: РИО МТИ. -18 с.
179. Заставская Н.В. Разработка технологических параметров приготовления пряжи пневмомеханического способа прядения из смесей хлопка с химическими волокнами для бытовых и технических тканей. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02. М.: МГТУ. 2001.
180. Ванчиков А.Н. Расчет прочности пряжи из смеси хлопка с химическими штапельными волокнами // Труды ЦНИХБИ за 1962 г., М.: Легкая индустрия, 1963. С.92-143.
181. Петрова С.В. Разработка оптимальных технологических параметров изготовления пряжи из смесей хлопка с химическими волокнами для плащевых и трикотажных изделий. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02. М.: МГТУ. 2006.
182. Кащеев О.В. Оценка качества хлопко-вискозной пряжи различного процентного содержания // Сборник научных трудов кафедры коммерции и сервиса. «Актуальные вопросы экономики, коммерции и сервиса». М.: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2022. С.61-64
183. Кащеев О.В. Влияние волокнистого состава на механические свойства хлопко-вискозной пряжи // Промышленные процессы и технологии. 2024. Т. 4. № 4(14). С. 23-30

184. Кашцев О.В., Шустов Ю.С. Анализ механических характеристик хлопколавсановой пряжи различного процентного содержания // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. №5 (401). С.56-59.

185. Кашцев О.В. Комплексная оценка качества хлопколавсановой пряжи // Сборник научных трудов по материалам 2 Круглого стола «Теория и практика экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции». Москва, 2022. С.34-37

186. Кашцев О.В., Шустов Ю.С. Влияние нагрузки и коэффициента крутки на деформационные свойства хлопчатобумажной пряжи // Сборник материалов Международной научно-технической конференции. «Инновации-2022». 2022. С.37-40

187. 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

188. 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., Кашцев О.В.

189. Каракова О.А., Кашцев О.В., Николаев С.Д. Оптимизация параметров выработки парашютной ткани на станке СТБ // Дизайн и технологии. 2017. № 59 (101). С. 65-68. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

190. Каракова О.А., Кашцев 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.

191. Николаев С.Д., Кашцев О.В., Поликарпов А.В., Мастраков 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.

192. 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)

193. Кашцев О.В., Разумеев К.Э., Николаев С.Д. Разработка новых видов тка-

ней для детской одежды // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. №2 (344) С. 67-74. – 0,5 п.л./ 0,35 п.л. (Scopus)

194. 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)

195. 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)

196. Кащеев О.В., Разумеев К.Э., Николаев С.Д. Чистощерстяные камвольные пряжи и ткани // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. №5 (341) С. 30-34. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л. (Scopus)

197. Кащеев О.В., Лунина Е.В., Андреева Е.Г. Применение триаксиальных переплетений для изготовления плетеных заготовок верха обуви // Кожевенно-обувная промышленность. 2011. № 4. С. 20-24. – 0,25 п.л./ 0,15 п.л.

198. Никитин Н.М. Проектирование тканей. [Текст]. М.: Ростехиздат, 1961. – 212 с.

199. Кутепов О.С. Строение и проектирование тканей. [Текст]. М.: Легпромбытиздат, 1988. – 224 с.

200. Николаев С.Д. Прогнозирование технологических параметров изготовления тканей заданного строения и разработка методов их расчета. Дисс. докт. техн. наук. 05.19.02. М.: МТИ. 1988. – 469 с.

201. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строение и проектирование тканей. [Текст]. М.: МГТУ. 1999. – 434 с.

202. Сурнина Н.Ф. Проектирование тканей по заданным параметрам. [Текст]. М.: Легкая индустрия, 1973. – 144 с.

203. Дамянов Г.Б., Бачев Ц.З., Сурнина Н.Ф. Строение ткани и современные методы ее проектирования. [Текст]. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 237 с.

204. Юхин С.С. Разработка метода прогнозирования технологии изготовления тканей нетрадиционных структур. Дисс. докт. техн. наук. 05.19.02. М.: МГТА, 1996.

205. Шустов Ю.С. Логвинов А.Н. Определение оптимальной разрывной нагрузки хлопчатобумажной ленты в зависимости от ее структуры // Вестник ДИ-ТУД. Димитровград: 2001. №1. С.5-10.

206. Гущина и др. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества. [Текст]. М.: Легкая индустрия, 1983. –247 с.

207. Юхина Е.А. Определение оптимальных параметров строения и изготовления хлопколавсановых тканей. Дисс. канд. техн. наук. 05.19.02. М.: МТИ, 1984.

208. Атанжанов К.Х., Эйгес Е.Г., Фичурова Л.Н. Влияние сырьевого состава пряжи на эксплуатационные свойства ткани и разработка методов ее испытания// Научно-исследовательские труды ЦНИХБИ. Сборник работ 1965 г. - М.: Легкая индустрия. 1968. с.369- 417.

209. 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.

210. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопколавсановой ткани с применением теории подобия и анализа размерностей // Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения проф. А.П. Жихарева. 2023. С.82-85.

211. Севостьянов П.А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов: монография. – Москва: «Тиссо Принт», 2013. – 254 с.

212. Тимошенко С.П., Гудьир Дж. Теория упругости. [Текст]. – М.: Наука, 1979. 560 с.

213. 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

214. 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

215. Кащеев О.В., Шустов Ю.С. Многозвенные модели описания деформационных свойств текстильных материалов // Дизайн и технологии. 2023. №94 (136). С.92-97.

216. Николаев С.Д., Панин И.Н., Панин А.И., Панин М.И., Кащеев О.В., Николаева Н.А. Пути совершенствования структуры иглопробивных прессовых сукон // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. №6 (378) С. 281-284

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

218. 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

219. 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.

220. 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.

221. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] // пер. с англ. В.Д. Скаржинского; под ред. В. Г. Горского. - Москва: Мир, 1973. - 957 с.

222. Bradley Efron. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife (англ.) //

Annals of Statistics. (англ.) // Annals of Statistics. - 1979. - Vol. 7, no. 1. - P. 1-26. - ISSN 0090-5364 doi 10.1214/aos/1176344552

223. Анатольев, С.А. Курс лекций по эконометрике для продолжающих // С. А. Анатольев. - 2-е изд., испр. - Москва: Рос. экон. шк., 2004 (ЦЭМИ РАН). - 60 с.; 30 с. ISBN 5-8211-0209-X

224. Себер Д.А.Ф. Линейный регрессионный анализ. Дж. Себер. Пер. с англ. В.П. Носко. - М.: Мир, 1980. - 456 с.

225. Кащеев О.В. Прогнозирование свойств нетканых материалов на основе математической обработки результатов полумонокловых испытаний // Дизайн и технологии. 2024. № 100 (142). С. 88-94.

226. Мишин В.М. Исследование систем управления [Текст]. - М: ЮНИТИ-ДАН, 2015. – 527 с.

227. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Имитационное моделирование в задачах синтеза структур сложных систем [Текст]. М.: Наука, 1985. - 176 с.

228. 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>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Акты внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО «Термопол»



/Гонтарь В.А./

28.10.2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

**«КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К
ОЦЕНКЕ, МОДЕЛИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»,**
выполненной Кашеевым О.В. (ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)

Конкурентоспособность нетканых материалов обеспечивается широким ассортиментом, низкой себестоимостью, выпуском их с заданными структурными и физико-механическими свойствами. Возможность прогнозирования функциональных свойств нетканых материалов при минимальных сырьевых и трудовых затратах является актуальной задачей.

В процессе эксплуатации нетканые материалы постоянно подвергаются различным видам нагрузок, поэтому необходимо проведение работ по оценке и моделированию деформации волокнистого материала.

Представленная в работе методика прогнозирования результатов этих деформаций позволяет оценивать чувствительность анализируемых моделей к их вариациям (Приложение к акту внедрения результатов диссертационной работы Кашеева О.В. «Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов» на ООО «Термопол»).

Для обоснования предлагаемых методов использовано имитационное статистическое моделирование результатов натурных испытаний и их автоматизированная обработка в среде системы Matlab, упрощающая и

ускоряющая весь процесс прогнозирования и проектирования текстильных материалов с заданными свойствами.

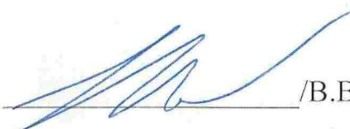
На примере нетканого материала «Холлофайбер» предложены регрессионные модели для определения зависимостей между удлинением волокнистого материала и его механическим напряжением сопротивления этому удлинению, а также продемонстрирована процедура обработки результатов эксперимента с получением таких моделей.

Нижеподписавшиеся члены комиссии считают целесообразным рекомендовать разработанные и апробированные методики для использования при проектировании и анализе физико-механических свойств нетканых материалов.

От ООО «Термопол»:

директор по развитию проектов

ООО «Термопол», к. филол. н.

 /В.В. Иванов/

начальник ОТК ООО «Термопол»

 /В.А. Хрусталева/

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Заведующий кафедры «Материаловедения и

товарной экспертизы», профессор

 /Ю.С. Шустов/

Доцент

 /О.В. Кашеев/

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО «Термопол»



Тонтарь В.А./

28.10.2024 г.

Приложение

к акту внедрения результатов диссертационной работы «Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов» на ООО «Термопол»

**Методика оценки и прогнозирования результатов деформаций
нетканого волокнистого материала**

В процессе апробации выше означенной методики была исследована зависимость деформации нетканого материала от прилагаемого напряжения во времени.

Моделью результатов этих испытаний являются парные выборки относительного удлинения и относительного сопротивления образца этому удлинению:

$$\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_1 \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_2 \quad \dots \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{nj} \right\}_j, \quad j = 1, \dots, N$$

где x и y – парные значения двух переменных, зависимость между которыми исследуется; N – количество испытанных образцов; n_j – количество пар значений, полученных при испытании j – го образца.

Обработка результатов испытаний проведена согласно алгоритма:

- Для каждой парной выборки методами регрессионного анализа подбирают наиболее близкую эмпирическую регрессионную модель, с минимальным числом неизвестных коэффициентов регрессии.
- Найденные точечные, а в некоторых случаях и интервальные оценки коэффициентов регрессии усредняют по образцам и тем самым получают усредненную модель регрессионной зависимости.
- Для обеспечения большей близости данных для разных образцов, результаты испытаний подвергают кодированию и масштабированию.

Для апробирования применения предложенной методики к результатам полцикловых испытаний на прочность до разрыва при одномерном растяжении прямоугольных образцов был взят популярный материал, массово производимый лидером отечественной текстильной промышленности ООО «Термопол» - полотно «Холлофайбер Софт 200» (таблица 1).

Таблица 1. Механические характеристики нетканого материала «Холлофайбер Софт 200».

Наименование показателя, ед. изм.	Результат	Метод испытаний
Вид и массовая доля волокон, %	пэ - 100	ГОСТ ИСО 18332001
Поверхностная плотность, г/м ²	206,4	ГОСТ 3811-72
Толщина (при давлении 0,2 кПа), мм	12,10	ГОСТ 12023-2003
Неровнота по массе, %	5,4	ГОСТ 15902.22003 п. 4.13
Разрывная нагрузка, Н		ГОСТ 15902.3-79
- в долевом направлении	10,9	
- в поперечном направлении	14,8	
Удлинение при разрыве, %		ГОСТ 15902.3-79
- в долевом направлении	18,3	
- в поперечном направлении	33,7	

Для компьютерного моделирования экспериментальных данных

использовано базовое математическое выражение в виде дробно-степенной функции:

$$P = A \frac{E \cdot S - S^B}{1 + C \cdot S^D},$$

где: P – сила сопротивления деформации, S – величина абсолютного удлинения образца, $A, \dots, E$ – постоянные параметры модели.

Рассмотренные экспериментальные зависимости существенно отличаются от образца к образцу одного и того же материала. Эти отличия, при сохранении формы кривых, весьма существенны, что говорит о существовании значительного статистического разброса в свойствах материала в пределах одного и того же исследуемого образца.

Для построения модели численными методами применен инструмент cftool системы Matlab.

Анализ, полученных результатов показал, что оценки усредненных коэффициентов регрессии, полученные разными способами, близки друг к другу. Это позволяет построить усредненную модельную кривую зависимости удлинения (S) от нагрузки (P). Качество подбора модели оценивалось по квадрату коэффициента детерминации, который для данной модели равен $R^2 = 0,989$. Значение этого критерия, близкое к 1, говорит о том, что ~ 98% всей вариабельности функции отклика учтено и описывается полученной регрессионной моделью.

Полученная модель имеет вид:

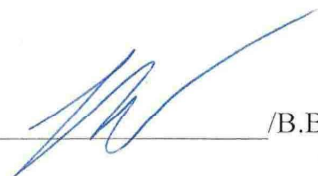
$$P_c = \frac{1.45 \cdot S_c}{1 + 10.4 \cdot S_c^{13.6}}$$

Преимуществом предложенного метода прогнозирования, и, рассмотренного на примерах нелинейных регрессионных моделей, является возможность описания одним аналитическим выражением экспериментальных данных на всем протяжении эксперимента.

Результаты испытаний образца «Холлофайбер Софт 200» оказались близки к заявленным характеристикам. Поведение данного нетканого материала достаточно предсказуемо и прогнозируемо при помощи предложенного метода, что существенно повышает возможности использования этого материала в различных потребительских нишах.

От ООО «Термопол»:

директор по развитию проектов
ООО «Термопол», к. филол. н.

 /В.В. Иванов/

начальник ОТК ООО «Термопол»

 /В.А. Хрусталева/

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Заведующий кафедры «Материаловедения и
товарной экспертизы», профессор

 /Ю.С. Шустов/

Доцент

 /О.В. Кащеев/

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО «Синтекс»



Супрунюк Л. Е./
16.04.2024 г.

АКТ

внедрения результатов исследовательской работы

«Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов»

В диссертационной работе Кашеева О.В. на тему: «Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов» реализована концепция прогнозирования свойств технических тканей разного сырьевого состава на основе математической обработки результатов их полуцикловых испытаний.

В проведенной работе исследована зависимость деформационных свойств технических тканей от прилагаемого напряжения, изменяющегося во времени. Предложена авторская методика обработки результатов испытаний и построения регрессионных моделей, адекватно описывающих поведение тканей в процессе их эксплуатации.

Преимуществом предложенной методики прогнозирования является возможность описания аналитическими методами различных экспериментальных данных на всем протяжении эксперимента.

Результаты натурных испытаний образцов технических фильтровальных тканей, выпускаемых ООО «Синтекс» оказались близки к полученным

модельным результатам, что позволяет проектировать технические ткани с заданными свойствами.

Проведенная апробация позволяет рекомендовать разработанную методику при проектировании и моделировании физико-механических свойств технических тканей различного назначения.

От ООО «Синтекс»:

Технический директор

/Бондаренко Е.А./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Доцент

/О.В. Кашеев/

УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «Синтекс»

/Супрунук Л. Е./
 16.04.2024 г.

Приложение

(к акту внедрения результатов исследовательской работы на ООО «Синтекс»)

Методика оценки и прогнозирования результатов полуцикловых испытаний механических свойств полиамидной ткани

В процессе испытаний была апробирована методика оценки и прогнозирования свойств текстильных материалов на основе математической обработки результатов их полуцикловых испытаний на примере фильтровальной полиамидной ткани арт. 56007. Ее основные механические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические характеристики полиамидной ткани арт. 56007.

Наименование показателя, ед. изм.	Результат
Вид и массовая доля волокон, %	п/а - 100
Поверхностная плотность, г/м ²	160
Разрывная нагрузка 50*200, Н	
- основа	1900
- уток	1800

Испытания проводились по ГОСТ 3811-72. Испытательный прибор: ИТ-3М, разрывная машина РТ-250, шкала нагрузок ± 1 мм. В процессе удлинения каждого образца регистрировались: время от начала испытания, абсолютное удлинение, мм образца вдоль нитей основы и абсолютное значение силы сопротивления удлинению, Н. Число параллельных опытов составляло - 5.

Результаты испытаний были сгруппированы в таблицы, а затем преобразованы в кодированные (безразмерные и отмасштабированные в диапазоне от 0 до 1 значения) переменные в соответствии с приведенными в методике формулами кодирования.

Анализ, полученных данных показал, что четыре образца, за исключением первого, под действием растягивающей нагрузки ведут себя практически одинаково. Первый образец имеет кривую зависимости между S и P существенно отличающуюся от других образцов.

На основании полученных результатов была подобрана аппроксимирующая их кривая - регрессионная полиномиальная модель третьего порядка:

$$Pc(Sc) = C_1 + C_2 \cdot Sc + C_3 \cdot Sc^2 + C_4 \cdot Sc^3$$

Для получения оценок коэффициентов C_1 , C_2 , C_3 , C_4 регрессионной модели по результатам испытаний был применен инструментальный Cftool программной математической системы Matlab.

Получены точечные и интервальные оценки коэффициентов регрессии для испытанных образцов полиамидной ткани. Все коэффициенты регрессии значимы. Значение квадрата коэффициента конкордации: $Q = 0.992$ – говорит о хорошем качестве подбора регрессии.

Полученная усредненная полиномиальная регрессионная модель третьего порядка, описывающая в кодированных единицах зависимость механического напряжения в ткани от удлинения по основе, достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным.

От ООО «Синтекс»:
Технический директор


Бондаренко Е.А./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:
Доцент


О.В. Кашеев/

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор АО «ЛЕНТА»

/Иванова Р.П./

14.11.2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

на научно-исследовательскую работу

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

На предприятии АО «ЛЕНТА» была апробирована методика моделирования зависимости скорости деформации текстильных материалов от напряжения, разработанная в диссертационной работе Кашеева О.В. «Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов».

При моделировании деформации волокнистого материала под действием внешних нагрузок параметры моделей оцениваются по результатам экспериментов с образцами материала. Эти оценки являются приближенными и могут со временем менять свои значения. Поэтому разработка методики снятия и обработки результатов исследований является необходимым условием получения качественного текстильного продукта. Моделирование зависимости скорости деформации от напряжения выполнено при помощи предложенного в процессе исследования авторского скрипта в системе Matlab (приведен в Приложении к акту внедрения).

Установлено, что статистический разброс значений параметров моделей: коэффициентов упругости, вязкости, времени релаксации, и др. приводит к асимметричным распределениям величин деформации образцов. На основании этого предложено при обработке результатов экспериментов вместо традиционно используемых средних значений использовать медианные оценки, а вместо среднеквадратических оценок рассеивания – более робастные оценки

интердецильного размаха.

При статистическом моделировании зависимостей "нагрузка - деформация" так же установлено, что результаты деформации материала зависят не только от усредненных показателей, но и от формы распределения. Отсюда получен вывод о необходимости при изучении свойств материала оценивать не только числовые характеристики, но и их распределения.

От АО «Лента»

Технический директор

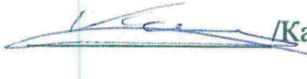
 /Артемяев Е.Ю./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Заведующий кафедры «Материаловедения и
товарной экспертизы», профессор

 /Шустов Ю.С./

Доцент

 /Кашеев О.В./

Приложение

к акту внедрения результатов научно-исследовательской работы
«Комплексный научно-методологический подход к оценке, моделированию и
прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов»

Базовый скрипт для эксперимента с моделью зависимости скорости деформации от напряжения

```
clear, clc % очистка рабочей области и командного окна
% Параметры распределений
vSr=0.5; % средняя скорость скольжения (деформации)
CVv=0.05; % коэффициент вариации скорости скольжения
smSr=10; % среднее значение максимального напряжения   покоя
CVsm=0.05; % коэффициент вариации максимального
напряжения покоя
% расчет параметров бета - распределения
a=(1-vSr)/CVv^2-vSr; b=a/vSr-a;
% расчет параметров гамма - распределения
k=1/CVsm^2; teta=smSr*CVsm^2;
N=1000; % число повторных прогонов по методу Монте - Карло
ns=1000; % число точек зависимости скор. деформ. от напр.
demas=zeros(N,ns); % массив для накопления зависимостей
% генерация массива по модельному распределению
smm=gamrnd(k, teta, 100*N, 1); % гамма - распределение
% hist(smm,50) % вывод гистограммы распределения параметра
smax=max(smm); % наибольшее значение параметра в выборке
% smax=50; % вариант фиксированного наибольшего значения
параметра
s=linspace(-smax,smax,ns); % значения варьируемого напряжения
for j=1: N % начало циклов прогонов по методу Монте - Карло
% v = vSr; % вариант постоянного значения параметра v
v=betarnd(a,b); % бета - распределение v
sm=gamrnd(k,teta); % гамма - распределение sm
de = []; % контейнер для накопления зависимости в прогоне
for i = 1: ns % расчет зависимости
```

```
dedt = sv1(v,sm,s(1,i) );  
de=[de,dedt]; % добавление значения в контейнер  
end  
demas(j,:)=de; % добавление зависимости j-го прогона в массив  
end  
% оценка усредненной по прогонам зависимости  
deSr=mean(demas);  
% график зависимости для модельного варианта  
hold on, plot(s,deSr)
```

От АО «Лента»

Технический директор

 /Артемов Е.Ю./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Заведующий кафедры «Материаловедения и
товарной экспертизы», профессор

 /Шустов Ю.С./

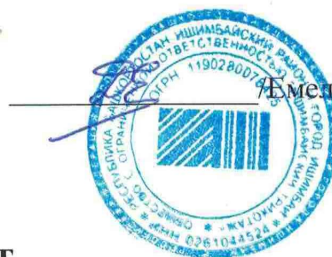
Доцент

 /Кашеев О.В./

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «Ишимбайский трикотаж»



Емельянова Д.А./

24.08.2023 г.

АКТ

апробации отдельных результатов научно-исследовательской работы:

**«Комплексный научно-методологический подход к оценке,
моделированию и прогнозированию функциональных свойств
текстильных материалов»**

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ООО «Ишимбайский трикотаж», главный инженер Аллагулов О.А. и представитель ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина», доцент кафедры «Социологии и рекламных коммуникаций» Кашеев О.В. составили настоящий акт о том, что в ходе апробации исследовательских результатов подтверждена взаимосвязь между показателями механических характеристик трикотажных изделий из различного сырьевого состава.

В качестве объектов исследования для подтверждения, разработанной ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» методики комплексной оценки функциональных свойств текстильных материалов использованы образцы хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи.

Проанализированы и установлены зависимости влияния процентного соотношения натуральных и химических волокон на такие показатели характеристик готовой продукции как линейная плотность пряжи, разрывная нагрузка, разрывное удлинение, крутка пряжи, изгибоустойчивость, стойкость к многократным деформациям растяжения.

В таблице 1 приведены механические показатели, характеризующие пряжу различного процентного содержания натуральных (хлопок) и химических волокон (полиэфир).

Таблица 1. Механические показатели хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи

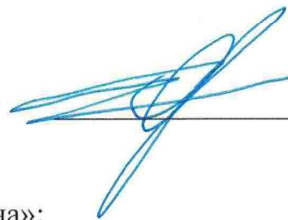
Показатели	Состав пряжи					
	100% полиэф ир	87% полиэфир, 13 % хлопок	67% полиэфир, 33 % хлопок	57% полиэфир, 43 % хлопок	33% полиэфир 67% хлопок	100% хлопок
Линейная плотность, текс	14,6	14,3	14,6	14,5	14,6	14,4
Разрывная нагрузка, Н	3,96	3,75	3,62	3,45	3,34	3,05
Разрывное удлинение, %	11,3	10,7	9,7	8,7	8,2	8,3
Крутка, кр./м	915	935	946	935	945	945
Изгибоустойчивость, цикл	47020	45750	44830	41790	30300	26120
Стойкость к многократному растяжению, цикл	15000	10000	5190	2380	1850	720

Получены функциональные зависимости, характеризующие изменения качества хлопко-полиэфирной пряжи от процентного соотношения содержания натуральных и химических волокон.

Апробация продемонстрировала возможность экстраполяции предлагаемой методики комплексной оценки свойств текстильных материалов на весь ассортимент выпускаемой предприятием продукции, что позволит существенно ускорить процесс разработки и внедрения новых, высокого качества материалов различного функционального назначения.

От ООО «Ишимбайский трикотаж»:

Главный инженер

 /Аллагулов О.А./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

Доцент

 /Кашеев О.В./

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «КШФ Передовая текстильщица»



Брусков Д.Л.

12.07.2023 г.

АКТ

О результатах внедрения научно-исследовательской работы
«Комплексный научно методологический подход к оценке, моделированию и
прогнозированию функциональных свойств текстильных материалов»

Мы, нижеподписавшиеся, представитель АО «КШФ Передовая текстильщица», технический директор Буланова М.Е. и представители ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина»: заведующий кафедры «Материаловедения и товарной экспертизы» профессор Шустов Ю.С. и доцент кафедры «Социологии и рекламных коммуникаций» Кашеев О.В. составили настоящий в том, что в результате научно-исследовательской работы проведена комплексная оценка качества вырабатываемых на предприятии текстильных изделий.

Она невозможна без определения наиболее значимых факторов, влияющих на выходные параметры готовой продукции. К ним относятся: разрывная нагрузка пряжи, плотность нитей по основе и утку, ширина полосы ткани, а также процентное содержание различных видов волокон. В связи с тем, что процентное содержание различных искусственных и химических волокон варьируется в широком диапазоне, необходимо учитывать и исходную плотность смешиваемых волокон.

Используя данные предприятия, была апробирована предложенная в диссертации методика для определения разрывной нагрузки смешанной

ткани. В качестве функциональной зависимости использованы следующие показатели:

$$Q_o = f(P_o, \Pi_o, B, \rho_x, \rho_i, n_x, n_i),$$

где Q_o – разрывная нагрузка полосы ткани;

P_o – разрывная нагрузка пряжи;

Π_o – плотность (количество) нитей по основе (на 10 см);

B – ширина полосы ткани;

ρ_x, ρ_i – плотность химических и искусственных волокон;

n_x, n_i – процентное содержание химических и искусственных волокон.

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

Получены различные численные функциональные зависимости для целого ряда тканей, выпускаемых предприятием. Ниже представлена зависимость для ткани арт. 86-234-12 ВО:

$$Q_o = P_o \Pi_o B \cdot \frac{(\rho_x n_x \cdot \rho_i n_i) / \rho_x}{52,69 \cdot [(\rho_x n_x \cdot \rho_i n_i) / \rho_x] - 47,15}$$

Сравнительный анализ между расчетными показателями разрывной нагрузки испытанных тканей и их фактическими значениями показал, что погрешность не превышает 6 - 8%, что является вполне допустимым результатом для прогнозирования поведения рассматриваемых текстильных материалов.

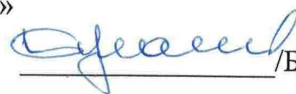
Использование предложенной, в научно-исследовательской работе, методики позволяет значительно сократить затраты на проведение предварительных испытаний с целью получения заданных заказчиком свойств

текстильной продукции.

На основании полученных результатов апробации предлагается рекомендовать предложенную ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина» методику для использования при проектировании физико-механических свойств текстильных материалов различного назначения.

От АО «КШФ Передовая Текстильщица»

Технический директор



/Буланова М.Е./

От ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»:

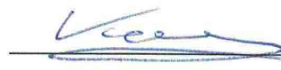
Заведующий кафедры «Материаловедения и

товарной экспертизы», профессор



/Шустов Ю.С./

Доцент



/Кащеев О.В./

Приложение Б. Показатели механических свойств нетканого материала

Таблица 1. Зависимость основных показателей параметров образца нетканого материала от приложенной силы во времени

Сила P, dH	Длина L, мм	Время t, мс	Сила P, dH	Длина L, мм	Время t, мс
1	2	3	4	5	6
0	100	0	2,15	120,575	12911
0	100	93	2,15	120,77	12989
0	100,125	171	2,15	120,96	13067
0	100,125	250	2,15	120,96	13145
0	100,315	328	2,15	121,105	13224
0	100,51	406	2,15	121,295	13302
0	100,655	484	2,15	121,295	13380
0	100,655	562	2,15	121,485	13458
0,05	100,85	640	2,15	121,63	13536
0,05	101,04	718	2,15	121,82	13614
0,05	101,04	797	2,15	121,82	13692
0,05	101,185	875	2,15	122,01	13771
0,05	101,38	953	2,15	122,155	13849
0,1	101,57	1031	2,15	122,155	13927
0,1	101,57	1109	2,2	122,345	14005
0,1	101,71	1187	2,2	122,535	14083
0,15	101,9	1265	2,2	122,535	14161
0,15	101,9	1344	2,2	122,68	14239
0,15	102,05	1422	2,2	122,87	14318
0,2	102,24	1500	2,15	123,065	14396
0,25	102,43	1578	2,15	123,065	14474
0,25	102,43	1656	2,15	123,21	14552

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
0,25	102,575	1734	2,15	123,405	14630
0,25	102,765	1812	2,15	123,55	14708
0,25	102,765	1891	2,15	123,55	14786
0,3	102,955	1969	2,1	123,745	14865
0,3	103,105	2047	2,1	123,935	14943
0,35	103,31	2125	2,1	123,935	15021
0,35	103,31	2203	2,1	124,08	15099
0,35	103,505	2281	2,1	124,275	15177
0,4	103,645	2359	2,1	124,275	15255
0,4	103,645	2438	2,1	124,47	15333
0,4	103,84	2516	2,1	124,665	15412
0,45	104,03	2594	2,1	124,81	15490
0,45	104,18	2672	2,1	124,81	15570
0,45	104,18	2750	2,15	125	15648
0,5	104,375	2828	2,1	125,2	15726
0,55	104,575	2906	2,1	125,2	15804
0,55	104,575	2984	2,1	125,395	15882
0,55	104,715	3063	2,1	125,54	15960
0,55	104,91	3141	2,1	125,735	16038
0,6	105,055	3219	2,1	125,735	16117
0,6	105,055	3297	2,15	125,88	16195
0,6	105,25	3375	2,15	126,07	16273
0,65	105,445	3453	2,15	126,07	16351
0,65	105,445	3531	2,1	126,26	16429
0,65	105,59	3609	2,1	126,405	16507
0,7	105,785	3688	2,05	126,595	16585

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
0,7	105,98	3766	2,05	126,595	16664
0,7	105,98	3844	2,05	126,79	16742
0,75	106,12	3922	2,05	126,93	16820
0,75	106,31	4000	2,05	126,93	16898
0,75	106,31	4078	2,05	127,125	16976
0,8	106,505	4156	2,05	127,315	17054
0,85	106,65	4235	2,05	127,315	17132
0,9	106,84	4313	2,05	127,465	17211
0,9	106,84	4391	2,05	127,655	17289
0,9	107,03	4469	2	127,845	17367
0,95	107,17	4547	2	127,845	17445
0,95	107,17	4625	2	127,985	17523
0,95	107,365	4703	1,95	128,18	17601
1	107,555	4781	1,9	128,37	17680
1	107,7	4860	1,9	128,37	17750
1	107,7	4938	1,9	128,52	17828
1	107,89	5016	1,9	128,71	17906
1	108,035	5094	1,9	128,71	17984
1	108,035	5172	1,9	128,9	18062
1,05	108,235	5250	1,9	129,045	18140
1,1	108,435	5329	1,9	129,045	18218
1,1	108,58	5407	1,9	129,24	18297
1,1	108,58	5485	1,9	129,435	18375
1,15	108,77	5563	1,9	129,58	18456
1,15	108,96	5641	1,9	129,58	18534
1,15	108,96	5719	1,9	129,78	18613
1,15	109,11	5797	1,85	129,97	18691

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
1,2	109,31	5876	1,85	129,97	18769
1,2	109,505	5954	1,85	130,115	18847
1,2	109,505	6032	1,85	130,305	18925
1,25	109,65	6110	1,85	130,505	19003
1,3	109,84	6188	1,85	130,505	19081
1,3	109,84	6266	1,85	130,645	19160
1,3	110,035	6344	1,85	130,84	19238
1,3	110,185	6422	1,85	130,84	19316
1,35	110,38	6501	1,8	131,035	19394
1,35	110,38	6579	1,8	131,18	19472
1,4	110,575	6657	1,75	131,37	19550
1,4	110,72	6735	1,75	131,37	19628
1,4	110,72	6813	1,7	131,56	19706
1,4	110,91	6891	1,7	131,7	19785
1,45	111,05	6969	1,7	131,7	19863
1,45	111,05	7047	1,7	131,895	19941
1,45	111,25	7126	1,65	132,04	20019
1,45	111,44	7204	1,65	132,23	20097
1,5	111,58	7282	1,65	132,23	20175
1,5	111,58	7360	1,6	132,425	20254
1,5	111,775	7438	1,6	132,565	20332
1,5	111,965	7516	1,6	132,565	20410
1,55	112,105	7595	1,55	132,755	20488
1,55	112,105	7673	1,55	132,945	20566
1,55	112,3	7751	1,5	133,095	20644
1,55	112,495	7829	1,5	133,095	20722
1,55	112,495	7907	1,5	133,285	20801

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
1,55	112,635	7985	1,45	133,485	20879
1,6	112,825	8063	1,45	133,485	20957
1,6	113,02	8141	1,4	133,625	21035
1,6	113,02	8220	1,4	133,815	21113
1,65	113,165	8298	1,4	134,01	21191
1,65	113,365	8376	1,4	134,01	21269
1,65	113,365	8454	1,4	134,155	21347
1,7	113,56	8532	1,4	134,35	21426
1,7	113,71	8610	1,4	134,35	21496
1,7	113,9	8688	1,35	134,495	21574
1,7	113,9	8767	1,35	134,69	21652
1,75	114,045	8845	1,35	134,885	21730
1,75	114,24	8923	1,35	134,885	21808
1,75	114,24	9001	1,35	135,025	21886
1,8	114,435	9079	1,35	135,22	21965
1,8	114,58	9157	1,35	135,22	22043
1,8	114,78	9235	1,35	135,365	22121
1,8	114,78	9314	1,35	135,565	22199
1,8	114,97	9392	1,35	135,755	22277
1,85	115,115	9470	1,35	135,755	22355
1,85	115,115	9548	1,35	135,9	22435
1,85	115,31	9626	1,35	136,09	22514
1,9	115,505	9704	1,35	136,09	22592
1,9	115,65	9782	1,35	136,28	22670
1,9	115,65	9860	1,3	136,43	22748
1,9	115,845	9939	1,3	136,62	22826
1,95	116,04	10017	1,3	136,62	22904

Продолжение Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
1,95	116,04	10095	1,3	136,81	22982
1,95	116,18	10173	1,25	136,95	23061
1,95	116,37	10254	1,25	136,95	23139
1,95	116,56	10332	1,25	137,14	23217
1,95	116,56	10410	1,25	137,335	23295
2	116,705	10488	1,2	137,48	23373
2	116,895	10567	1,2	137,48	23453
2	116,895	10645	1,2	137,67	23531
2	117,085	10723	1,15	137,86	23609
2,05	117,235	10801	1,15	137,86	23687
2,05	117,425	10879	1,15	138,005	23766
2,05	117,425	10957	1,15	138,195	23844
2,05	117,565	11035	1,15	138,195	23922
2,1	117,755	11114	1,15	138,395	24000
2,1	117,755	11192	1,15	138,54	24078
2,1	117,945	11270	1,1	138,735	24156
2,1	118,095	11348	1,1	138,735	24234
2,1	118,295	11426	1,1	138,925	24313
2,1	118,295	11504	1,1	139,07	24391
2,1	118,49	11582	1,1	139,26	24469
2,1	118,63	11661	1,1	139,26	24552
2,1	118,63	11739	1,1	139,46	24630
2,1	118,825	11817	1,05	139,6	24708
2,1	119,015	11895	1,05	139,6	24786
2,1	119,165	11973	1,05	139,795	24865
2,1	119,165	12052	1,05	139,995	24943
2,1	119,36	12130	1,05	140,135	25021

Окончание Таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
2,1	119,555	12208	1,05	140,135	25099
2,1	119,555	12286	1,05	140,33	25177
2,1	119,7	12364	1,05	140,475	25255
2,1	119,895	12442	1,05	140,475	25333
2,1	119,895	12520	1,05	140,665	25411
2,1	120,085	12599	1	140,86	25490
2,15	120,23	12677	1	141,01	25568
2,15	120,425	12755	1	141,01	25646
2,15	120,425	12833			

**Приложение В. Результаты исследования корреляционных зависимостей
основных показателей нетканого материала в процессе его деформации**

Таблица 2. Зависимости механического напряжения (Stress) от относительного удлинения (Strain) по 4 образцам нетканого материала

s1	PS1	s2	PS2	s3	PS3	s4	PS4
1	2	3	4	5	6	7	8
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,002	0,050	0,002	0,050	0,002	0,050	0,001	0,050
0,004	0,050	0,002	0,050	0,003	0,050	0,003	0,050
0,004	0,050	0,003	0,050	0,005	0,100	0,005	0,100
0,005	0,050	0,005	0,050	0,005	0,100	0,005	0,100
0,007	0,050	0,005	0,100	0,007	0,150	0,006	0,100
0,009	0,100	0,007	0,100	0,008	0,200	0,008	0,150
0,009	0,100	0,008	0,100	0,008	0,200	0,008	0,150
0,011	0,100	0,010	0,150	0,010	0,200	0,010	0,150
0,012	0,150	0,010	0,200	0,012	0,250	0,012	0,200
0,012	0,150	0,012	0,200	0,014	0,250	0,014	0,250
0,014	0,150	0,014	0,200	0,014	0,250	0,014	0,250
0,016	0,200	0,014	0,250	0,016	0,300	0,016	0,250
0,018	0,250	0,016	0,250	0,017	0,350	0,017	0,300
0,018	0,250	0,017	0,300	0,017	0,350	0,017	0,300
0,019	0,250	0,019	0,300	0,019	0,400	0,019	0,350
0,021	0,250	0,019	0,350	0,021	0,400	0,021	0,400
0,021	0,250	0,021	0,350	0,022	0,450	0,022	0,450
0,023	0,300	0,022	0,400	0,022	0,450	0,022	0,450
0,025	0,300	0,022	0,450	0,024	0,500	0,024	0,500
0,027	0,350	0,024	0,450	0,026	0,500	0,026	0,500
0,027	0,350	0,026	0,500	0,026	0,500	0,026	0,500

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,028	0,350	0,028	0,500	0,028	0,550	0,028	0,550
0,030	0,400	0,028	0,550	0,030	0,600	0,029	0,550
0,030	0,400	0,030	0,550	0,031	0,600	0,031	0,600
0,032	0,400	0,031	0,600	0,031	0,600	0,031	0,600
0,034	0,450	0,031	0,600	0,033	0,650	0,033	0,600
0,035	0,450	0,033	0,600	0,035	0,700	0,035	0,650
0,035	0,450	0,035	0,650	0,035	0,700	0,035	0,650
0,037	0,500	0,037	0,700	0,036	0,750	0,036	0,700
0,039	0,550	0,037	0,700	0,038	0,800	0,038	0,750
0,039	0,550	0,038	0,700	0,040	0,800	0,040	0,800
0,041	0,550	0,040	0,750	0,040	0,800	0,040	0,800
0,043	0,550	0,040	0,750	0,042	0,850	0,042	0,800
0,044	0,600	0,042	0,750	0,044	0,900	0,043	0,850
0,044	0,600	0,044	0,800	0,044	0,900	0,043	0,850
0,046	0,600	0,046	0,850	0,046	0,900	0,045	0,900
0,048	0,650	0,046	0,850	0,047	0,950	0,047	0,900
0,048	0,650	0,047	0,850	0,049	0,950	0,049	0,950
0,049	0,650	0,049	0,900	0,049	0,950	0,049	0,950
0,051	0,700	0,049	0,950	0,051	1,000	0,051	1,000
0,053	0,700	0,051	0,950	0,052	1,050	0,052	1,000
0,053	0,700	0,052	1,000	0,052	1,050	0,052	1,000
0,055	0,750	0,054	1,000	0,054	1,100	0,054	1,050
0,057	0,750	0,054	1,050	0,056	1,100	0,056	1,100
0,057	0,750	0,056	1,050	0,056	1,100	0,058	1,150
0,058	0,800	0,058	1,100	0,058	1,100	0,058	1,150
0,060	0,850	0,058	1,100	0,060	1,150	0,059	1,150
0,062	0,900	0,060	1,100	0,061	1,200	0,061	1,200

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,062	0,900	0,061	1,150	0,061	1,200	0,061	1,200
0,064	0,900	0,063	1,200	0,063	1,250	0,063	1,200
0,065	0,950	0,063	1,200	0,065	1,250	0,065	1,250
0,065	0,950	0,065	1,200	0,066	1,300	0,065	1,250
0,067	0,950	0,067	1,250	0,066	1,300	0,066	1,250
0,069	1,000	0,067	1,300	0,068	1,300	0,068	1,300
0,070	1,000	0,068	1,300	0,070	1,300	0,070	1,350
0,070	1,000	0,070	1,300	0,070	1,300	0,070	1,350
0,072	1,000	0,071	1,350	0,071	1,350	0,071	1,400
0,074	1,000	0,071	1,400	0,073	1,400	0,073	1,450
0,074	1,000	0,073	1,400	0,075	1,450	0,075	1,450
0,076	1,050	0,075	1,400	0,075	1,450	0,075	1,450
0,078	1,100	0,075	1,450	0,077	1,450	0,077	1,500
0,079	1,100	0,077	1,450	0,079	1,500	0,079	1,550
0,079	1,100	0,079	1,450	0,079	1,500	0,079	1,550
0,081	1,150	0,081	1,450	0,080	1,500	0,081	1,550
0,083	1,150	0,081	1,500	0,082	1,550	0,082	1,600
0,083	1,150	0,082	1,500	0,084	1,550	0,084	1,600
0,085	1,150	0,084	1,500	0,084	1,550	0,084	1,600
0,087	1,200	0,084	1,550	0,085	1,600	0,085	1,650
0,088	1,200	0,086	1,550	0,087	1,600	0,087	1,650
0,088	1,200	0,087	1,600	0,087	1,600	0,087	1,650
0,090	1,250	0,089	1,600	0,089	1,650	0,089	1,700
0,092	1,300	0,089	1,650	0,091	1,650	0,091	1,750
0,092	1,300	0,091	1,650	0,093	1,700	0,093	1,750
0,094	1,300	0,093	1,700	0,093	1,700	0,093	1,750
0,095	1,300	0,093	1,700	0,095	1,750	0,095	1,800

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,097	1,350	0,095	1,700	0,096	1,750	0,096	1,800
0,097	1,350	0,097	1,700	0,096	1,750	0,096	1,800
0,099	1,400	0,098	1,750	0,098	1,800	0,098	1,850
0,101	1,400	0,098	1,750	0,100	1,800	0,100	1,900
0,101	1,400	0,100	1,750	0,101	1,800	0,101	1,900
0,103	1,400	0,102	1,750	0,101	1,800	0,101	1,900
0,104	1,450	0,102	1,800	0,103	1,800	0,103	1,950
0,104	1,450	0,104	1,800	0,105	1,850	0,105	1,950
0,106	1,450	0,105	1,850	0,105	1,850	0,105	1,950
0,108	1,450	0,107	1,850	0,107	1,850	0,107	2,000
0,109	1,500	0,107	1,900	0,109	1,900	0,109	2,000
0,109	1,500	0,109	1,900	0,111	1,950	0,110	2,050
0,111	1,500	0,111	1,900	0,111	1,950	0,110	2,050
0,113	1,500	0,111	1,950	0,112	1,950	0,112	2,100
0,115	1,550	0,112	1,950	0,114	2,000	0,114	2,100
0,115	1,550	0,114	1,950	0,114	2,000	0,114	2,100
0,116	1,550	0,116	1,950	0,115	2,000	0,115	2,100
0,118	1,550	0,116	2,000	0,117	2,050	0,117	2,150
0,118	1,550	0,117	2,000	0,119	2,050	0,117	2,150
0,120	1,550	0,119	2,000	0,119	2,050	0,119	2,150
0,122	1,600	0,119	2,050	0,121	2,100	0,121	2,200
0,124	1,600	0,121	2,050	0,123	2,100	0,122	2,250
0,124	1,600	0,123	2,100	0,123	2,100	0,122	2,250
0,125	1,650	0,125	2,100	0,124	2,100	0,124	2,250
0,127	1,650	0,125	2,100	0,126	2,150	0,126	2,300
0,127	1,650	0,127	2,100	0,128	2,150	0,126	2,300
0,129	1,700	0,128	2,150	0,128	2,150	0,128	2,300

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,131	1,700	0,128	2,150	0,130	2,200	0,130	2,350
0,132	1,700	0,130	2,150	0,131	2,200	0,131	2,350
0,132	1,700	0,131	2,150	0,131	2,200	0,131	2,350
0,134	1,750	0,133	2,150	0,133	2,200	0,133	2,400
0,136	1,750	0,133	2,200	0,135	2,250	0,135	2,400
0,136	1,750	0,135	2,200	0,137	2,250	0,136	2,400
0,138	1,800	0,137	2,200	0,137	2,250	0,136	2,400
0,139	1,800	0,137	2,250	0,138	2,300	0,138	2,450
0,141	1,800	0,139	2,250	0,140	2,350	0,140	2,500
0,141	1,800	0,141	2,300	0,140	2,350	0,140	2,500
0,143	1,800	0,142	2,300	0,142	2,350	0,142	2,500
0,145	1,850	0,142	2,300	0,144	2,350	0,144	2,550
0,145	1,850	0,144	2,300	0,144	2,350	0,145	2,550
0,147	1,850	0,146	2,350	0,146	2,400	0,145	2,550
0,149	1,900	0,146	2,350	0,148	2,400	0,147	2,600
0,150	1,900	0,147	2,350	0,148	2,400	0,149	2,600
0,150	1,900	0,149	2,350	0,150	2,400	0,149	2,600
0,152	1,900	0,149	2,350	0,151	2,450	0,151	2,600
0,154	1,950	0,151	2,350	0,153	2,500	0,152	2,600
0,154	1,950	0,153	2,350	0,153	2,500	0,154	2,600
0,155	1,950	0,155	2,400	0,155	2,500	0,154	2,600
0,157	1,950	0,155	2,400	0,156	2,500	0,156	2,650
0,159	1,950	0,156	2,400	0,156	2,500	0,158	2,650
0,159	1,950	0,158	2,400	0,158	2,500	0,158	2,650
0,161	2,000	0,160	2,450	0,160	2,500	0,160	2,700
0,162	2,000	0,160	2,450	0,162	2,500	0,161	2,750
0,162	2,000	0,161	2,450	0,162	2,500	0,163	2,750

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,164	2,000	0,163	2,500	0,164	2,500	0,163	2,750
0,166	2,050	0,163	2,500	0,165	2,550	0,165	2,750
0,168	2,050	0,165	2,500	0,165	2,550	0,166	2,800
0,168	2,050	0,167	2,550	0,167	2,550	0,166	2,800
0,169	2,050	0,168	2,550	0,169	2,550	0,168	2,800
0,171	2,100	0,168	2,550	0,171	2,600	0,170	2,800
0,171	2,100	0,170	2,550	0,171	2,600	0,172	2,800
0,173	2,100	0,172	2,550	0,172	2,650	0,172	2,800
0,174	2,100	0,172	2,550	0,174	2,650	0,174	2,850
0,176	2,100	0,174	2,550	0,174	2,650	0,175	2,850
0,176	2,100	0,176	2,550	0,176	2,650	0,175	2,850
0,178	2,100	0,177	2,550	0,177	2,650	0,177	2,850
0,180	2,100	0,177	2,550	0,179	2,650	0,179	2,850
0,180	2,100	0,179	2,550	0,179	2,650	0,180	2,900
0,182	2,100	0,181	2,600	0,181	2,650	0,180	2,900
0,184	2,100	0,181	2,600	0,183	2,650	0,182	2,900
0,185	2,100	0,182	2,600	0,183	2,650	0,184	2,900
0,185	2,100	0,184	2,600	0,185	2,700	0,184	2,900
0,187	2,100	0,186	2,600	0,187	2,700	0,186	2,900
0,189	2,100	0,186	2,600	0,187	2,700	0,188	2,900
0,189	2,100	0,188	2,600	0,189	2,700	0,189	2,950
0,190	2,100	0,190	2,600	0,190	2,700	0,189	2,950
0,192	2,100	0,190	2,650	0,192	2,700	0,191	2,950
0,192	2,100	0,191	2,650	0,192	2,700	0,193	2,950
0,194	2,100	0,193	2,650	0,194	2,700	0,193	2,950
0,196	2,150	0,195	2,650	0,195	2,750	0,195	2,950
0,198	2,150	0,195	2,650	0,195	2,750	0,196	2,950

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,198	2,150	0,196	2,650	0,197	2,750	0,198	3,000
0,199	2,150	0,198	2,700	0,199	2,750	0,198	3,000
0,201	2,150	0,198	2,700	0,201	2,750	0,200	3,000
0,203	2,150	0,200	2,700	0,201	2,750	0,202	3,000
0,203	2,150	0,202	2,700	0,203	2,750	0,202	3,000
0,205	2,150	0,204	2,700	0,204	2,750	0,204	3,000
0,206	2,150	0,204	2,750	0,204	2,750	0,205	2,950
0,206	2,150	0,206	2,750	0,206	2,750	0,207	2,950
0,208	2,150	0,207	2,750	0,208	2,750	0,207	2,950
0,210	2,150	0,207	2,750	0,209	2,800	0,209	2,950
0,212	2,150	0,209	2,750	0,209	2,800	0,210	2,950
0,212	2,150	0,211	2,750	0,211	2,800	0,210	2,950
0,214	2,150	0,212	2,700	0,213	2,750	0,212	2,950
0,215	2,150	0,212	2,700	0,213	2,750	0,214	2,950
0,215	2,150	0,214	2,700	0,215	2,750	0,216	3,000
0,217	2,200	0,216	2,650	0,217	2,750	0,216	3,000
0,219	2,200	0,216	2,650	0,217	2,750	0,218	3,000
0,219	2,200	0,218	2,650	0,218	2,750	0,218	3,000
0,220	2,200	0,219	2,700	0,220	2,800	0,220	3,000
0,222	2,200	0,221	2,700	0,222	2,800	0,221	3,000
0,224	2,150	0,221	2,700	0,222	2,800	0,221	3,000
0,224	2,150	0,223	2,700	0,224	2,800	0,223	3,000
0,226	2,150	0,225	2,650	0,225	2,800	0,225	2,950
0,228	2,150	0,225	2,650	0,227	2,850	0,227	2,950
0,229	2,150	0,226	2,650	0,227	2,850	0,227	2,950
0,229	2,150	0,228	2,650	0,229	2,850	0,229	2,950
0,231	2,100	0,230	2,650	0,230	2,850	0,230	2,950

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,233	2,100	0,230	2,650	0,230	2,850	0,232	2,950
0,233	2,100	0,231	2,650	0,232	2,850	0,232	2,950
0,234	2,100	0,233	2,650	0,234	2,800	0,234	2,950
0,236	2,100	0,233	2,600	0,236	2,800	0,235	2,950
0,236	2,100	0,235	2,600	0,236	2,800	0,237	2,950
0,238	2,100	0,237	2,550	0,238	2,750	0,237	2,950
0,240	2,100	0,237	2,550	0,240	2,700	0,239	2,900
0,242	2,100	0,239	2,550	0,240	2,700	0,241	2,900
0,242	2,100	0,241	2,500	0,242	2,700	0,241	2,900
0,243	2,150	0,243	2,500	0,243	2,700	0,243	2,900
0,245	2,100	0,243	2,500	0,243	2,700	0,244	2,950
0,245	2,100	0,244	2,500	0,245	2,700	0,246	2,950
0,247	2,100	0,246	2,500	0,246	2,700	0,246	2,950
0,249	2,100	0,246	2,500	0,248	2,650	0,248	2,900
0,251	2,100	0,248	2,500	0,248	2,650	0,250	2,900
0,251	2,100	0,249	2,450	0,250	2,600	0,250	2,900
0,252	2,150	0,251	2,450	0,252	2,600	0,251	2,900
0,254	2,150	0,251	2,400	0,252	2,600	0,253	2,850
0,254	2,150	0,253	2,400	0,254	2,550	0,255	2,850
0,256	2,100	0,255	2,400	0,256	2,500	0,255	2,850
0,258	2,100	0,255	2,350	0,257	2,450	0,257	2,800
0,259	2,050	0,257	2,350	0,257	2,450	0,258	2,800
0,259	2,050	0,259	2,350	0,259	2,350	0,258	2,800
0,261	2,050	0,260	2,350	0,261	2,300	0,260	2,750
0,263	2,050	0,260	2,350	0,261	2,300	0,262	2,750
0,263	2,050	0,262	2,350	0,262	2,300	0,264	2,750
0,265	2,050	0,263	2,350	0,264	2,250	0,264	2,750

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,267	2,050	0,263	2,350	0,266	2,200	0,265	2,700
0,267	2,050	0,265	2,350	0,266	2,200	0,267	2,700
0,268	2,050	0,267	2,350	0,268	2,150	0,267	2,700
0,270	2,050	0,269	2,350	0,269	2,100	0,269	2,700
0,272	2,000	0,269	2,350	0,269	2,100	0,271	2,700
0,272	2,000	0,270	2,350	0,271	2,100	0,271	2,700
0,273	2,000	0,272	2,350	0,273	2,100	0,272	2,650
0,275	1,950	0,272	2,350	0,275	2,100	0,274	2,650
0,277	1,900	0,274	2,350	0,275	2,100	0,276	2,650
0,277	1,900	0,276	2,350	0,276	2,050	0,276	2,650
0,279	1,900	0,278	2,350	0,278	2,000	0,278	2,650
0,281	1,900	0,278	2,350	0,278	2,000	0,280	2,650
0,281	1,900	0,279	2,350	0,280	1,950	0,281	2,650
0,282	1,900	0,281	2,350	0,282	1,900	0,281	2,650
0,284	1,900	0,281	2,300	0,283	1,850	0,283	2,600
0,284	1,900	0,283	2,300	0,283	1,850	0,285	2,550
0,286	1,900	0,285	2,250	0,285	1,800	0,285	2,550
0,288	1,900	0,286	2,200	0,287	1,800	0,287	2,550
0,289	1,900	0,286	2,150	0,287	1,800	0,289	2,500
0,289	1,900	0,288	2,150	0,289	1,750	0,290	2,500
0,291	1,900	0,290	2,150	0,291	1,700	0,290	2,500
0,293	1,850	0,290	2,150	0,292	1,700	0,292	2,450
0,293	1,850	0,292	2,150	0,292	1,700	0,294	2,450
0,295	1,850	0,293	2,150	0,294	1,650	0,294	2,450
0,297	1,850	0,293	2,200	0,296	1,600	0,296	2,450
0,299	1,850	0,295	2,200	0,296	1,600	0,298	2,400
0,299	1,850	0,297	2,200	0,298	1,600	0,298	2,400

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,300	1,850	0,299	2,150	0,300	1,550	0,299	2,400
0,302	1,850	0,299	2,150	0,301	1,550	0,301	2,400
0,302	1,850	0,301	2,150	0,301	1,550	0,302	2,400
0,304	1,800	0,302	2,150	0,303	1,550	0,302	2,400
0,305	1,800	0,304	2,150	0,305	1,550	0,304	2,350
0,307	1,750	0,304	2,100	0,305	1,550	0,306	2,350
0,307	1,750	0,306	2,100	0,307	1,500	0,306	2,350
0,309	1,700	0,308	2,050	0,308	1,500	0,308	2,300
0,310	1,700	0,308	2,000	0,310	1,500	0,309	2,250
0,310	1,700	0,309	2,000	0,310	1,500	0,309	2,250
0,312	1,700	0,311	1,950	0,312	1,500	0,311	2,200
0,314	1,650	0,313	1,900	0,314	1,450	0,313	2,200
0,316	1,650	0,313	1,900	0,314	1,450	0,315	2,150
0,316	1,650	0,314	1,900	0,315	1,400	0,315	2,150
0,318	1,600	0,316	1,850	0,317	1,350	0,317	2,150
0,319	1,600	0,316	1,850	0,319	1,300	0,319	2,150
0,319	1,600	0,318	1,850	0,319	1,300	0,319	2,150
0,321	1,550	0,320	1,850	0,321	1,250	0,320	2,150
0,323	1,550	0,322	1,800	0,322	1,200	0,322	2,150
0,324	1,500	0,322	1,800	0,322	1,200	0,324	2,150
0,324	1,500	0,323	1,800	0,324	1,200	0,324	2,150
0,326	1,500	0,325	1,750	0,326	1,200	0,325	2,100
0,328	1,450	0,325	1,750	0,328	1,200	0,327	2,100
0,328	1,450	0,327	1,750	0,328	1,200	0,327	2,100
0,330	1,400	0,328	1,750	0,329	1,200	0,329	2,050
0,332	1,400	0,330	1,700	0,331	1,250	0,331	2,050
0,334	1,400	0,330	1,700	0,331	1,250	0,333	2,000

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,334	1,400	0,332	1,700	0,333	1,200	0,333	2,000
0,335	1,400	0,334	1,650	0,335	1,200	0,334	1,950
0,337	1,400	0,334	1,650	0,337	1,150	0,336	1,950
0,337	1,400	0,336	1,650	0,337	1,150	0,336	1,950
0,338	1,350	0,338	1,650	0,338	1,150	0,338	1,950
0,340	1,350	0,339	1,700	0,340	1,150	0,340	1,950
0,342	1,350	0,339	1,700	0,340	1,150	0,341	1,950
0,342	1,350	0,341	1,700	0,342	1,150	0,341	1,950
0,344	1,350	0,343	1,650	0,343	1,150	0,343	1,900
0,346	1,350	0,343	1,600	0,343	1,150	0,345	1,900
0,346	1,350	0,344	1,600	0,345	1,150	0,345	1,900
0,347	1,350	0,346	1,550	0,347	1,100	0,347	1,850
0,349	1,350	0,348	1,550	0,349	1,100	0,348	1,850
0,351	1,350	0,348	1,500	0,349	1,100	0,350	1,850
0,351	1,350	0,350	1,500	0,351	1,050	0,350	1,850
0,352	1,350	0,352	1,500	0,353	1,050	0,352	1,850
0,354	1,350	0,352	1,500	0,354	1,050	0,354	1,850
0,354	1,350	0,353	1,500	0,354	1,050	0,354	1,850
0,356	1,350	0,355	1,500	0,356	1,100	0,355	1,850
0,358	1,300	0,357	1,450	0,357	1,100	0,357	1,800
0,360	1,300	0,357	1,450	0,357	1,100	0,359	1,800
0,360	1,300	0,358	1,450	0,359	1,100	0,359	1,800
0,362	1,300	0,360	1,400	0,361	1,050	0,360	1,800
0,363	1,250	0,360	1,350	0,361	1,050	0,362	1,750
0,363	1,250	0,362	1,350	0,362	1,050	0,362	1,750
0,365	1,250	0,364	1,350	0,364	1,050	0,364	1,700
0,367	1,250	0,366	1,300	0,366	1,000	0,366	1,700

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,368	1,200	0,366	1,300	0,366	1,000	0,367	1,700
0,368	1,200	0,368	1,300	0,368	1,000	0,367	1,700
0,370	1,200	0,369	1,300			0,369	1,650
0,372	1,150	0,369	1,300			0,371	1,650
0,372	1,150	0,371	1,300			0,371	1,650
0,374	1,150	0,373	1,250			0,373	1,650
0,375	1,150	0,374	1,250			0,374	1,650
0,375	1,150	0,374	1,250			0,376	1,600
0,377	1,150	0,376	1,250			0,376	1,600
0,379	1,150	0,378	1,200			0,378	1,550
0,381	1,100	0,378	1,200			0,380	1,550
0,381	1,100	0,380	1,200			0,380	1,550
0,383	1,100	0,381	1,200			0,381	1,500
0,384	1,100	0,383	1,200			0,383	1,500
0,386	1,100	0,383	1,200			0,385	1,500
0,386	1,100	0,385	1,200			0,385	1,500
0,388	1,100	0,387	1,200			0,387	1,500
0,389	1,050	0,387	1,200			0,389	1,500
0,389	1,050	0,389	1,200			0,389	1,500
0,391	1,050	0,390	1,200			0,391	1,450
0,393	1,050	0,392	1,150			0,392	1,450
0,395	1,050	0,392	1,150			0,392	1,450
0,395	1,050	0,394	1,150			0,394	1,400
0,397	1,050	0,394	1,150			0,396	1,350
0,398	1,050	0,396	1,150			0,398	1,350
0,398	1,050	0,398	1,150			0,398	1,350
0,400	1,050	0,399	1,100			0,399	1,300

Продолжение Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,402	1,000	0,399	1,100			0,401	1,300
0,404	1,000	0,401	1,100			0,401	1,300
0,404	1,000	0,403	1,100			0,403	1,250
		0,403	1,050			0,405	1,250
		0,405	1,050			0,405	1,250
		0,406	1,050			0,406	1,200
		0,408	1,000			0,408	1,200
		0,408	1,000			0,408	1,200
		0,410	1,000			0,410	1,200
		0,412	1,050			0,411	1,200
		0,412	1,100			0,413	1,200
		0,413	1,100			0,413	1,200
		0,415	1,100			0,415	1,150
		0,417	1,100			0,417	1,150
		0,417	1,050			0,419	1,150
		0,419	1,050			0,419	1,150
		0,420	1,050			0,420	1,150
		0,420	1,000			0,422	1,150
		0,422	1,000			0,422	1,150
		0,422	1,000			0,424	1,150
						0,425	1,100
						0,427	1,100
						0,427	1,100
						0,429	1,050
						0,431	1,050
						0,431	1,050
						0,433	1,000

Окончание Таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
						0,434	1,000
						0,436	1,000
						0,436	1,000

**Приложение Г. Результаты исследования корреляционных
зависимостей основных показателей полиамидной ткани в
процессе ее деформации**

Таблица 3. Зависимость удлинения от приложенной силы во времени для
5-ти образцов полиамидной ткани

1		2		3		4		5	
L, мм	P, dH	L, мм	P, dH	L, мм	P, dH	L, мм	P, dH	L, мм	P, dH
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	0	200	0	200	0	200	0	200	0
200	0	200	0	200	0	200	0	200,005	0
200,125	0	200,1	0	200,14	0	200,105	0	200,005	0
200,125	0	200,1	0	200,265	0	200,105	0	200,2	0
200,3	0	200,275	0	200,265	0	200,275	0	200,325	0
200,435	0	200,415	0	200,45	0	200,42	0	200,325	0
200,625	0,1	200,6	0,05	200,635	0,05	200,42	0	200,505	0,05
200,625	0,1	200,6	0,05	200,635	0,05	200,605	0,05	200,645	0,1
200,815	0,25	200,79	0,2	200,78	0,2	200,795	0,2	200,835	0,25
200,955	0,35	200,93	0,35	200,97	0,4	200,935	0,35	200,835	0,25
200,955	0,35	200,93	0,35	201,16	0,6	200,935	0,35	201,03	0,45
201,15	0,55	201,12	0,55	201,16	0,6	201,125	0,5	201,175	0,65
201,34	0,7	201,31	0,75	201,305	0,75	201,27	0,65	201,175	0,65
201,48	0,85	201,455	0,85	201,495	0,95	201,27	0,65	201,365	0,85
201,48	0,85	201,455	0,85	201,495	0,95	201,46	0,85	201,555	1,05
201,67	1,05	201,65	1,1	201,685	1,1	201,655	1	201,695	1,2
201,82	1,2	201,79	1,25	201,83	1,25	201,795	1,15	201,695	1,2
201,82	1,2	201,79	1,25	202,025	1,45	201,795	1,15	201,885	1,4
202,015	1,4	201,985	1,45	202,025	1,45	201,985	1,35	202,08	1,65
202,21	1,65	202,18	1,7	202,17	1,65	202,18	1,55	202,08	1,65
202,35	1,85	202,32	1,85	202,36	1,85	202,325	1,7	202,23	1,8
202,35	1,85	202,32	1,85	202,36	1,85	202,325	1,7	202,42	2,05
202,545	2,1	202,515	2,1	202,555	2,1	202,515	1,95	202,61	2,3

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
202,735	2,4	202,705	2,35	202,745	2,4	202,705	2,2	202,61	2,3
202,735	2,4	202,705	2,35	202,89	2,65	202,705	2,2	202,755	2,5
202,885	2,55	202,855	2,65	202,89	2,65	202,855	2,35	202,945	2,8
203,08	2,85	203,05	2,95	203,09	2,95	203,05	2,75	202,945	2,8
203,275	3,15	203,24	3,25	203,235	3,15	203,245	3,05	203,145	3,05
203,275	3,15	203,24	3,25	203,235	3,15	203,245	3,05	203,29	3,35
203,42	3,35	203,385	3,5	203,43	3,5	203,39	3,25	203,485	3,7
203,61	3,65	203,58	3,85	203,62	3,85	203,58	3,6	203,485	3,7
203,61	3,65	203,58	3,85	203,765	4,05	203,58	3,6	203,68	4,1
203,805	4	203,77	4,25	203,765	4,05	203,775	3,9	203,82	4,3
203,95	4,25	203,92	4,45	203,955	4,45	203,92	4,15	203,82	4,3
204,145	4,65	204,115	4,85	204,155	4,8	204,115	4,5	204,015	4,7
204,145	4,65	204,115	4,85	204,155	4,8	204,115	4,5	204,165	4,95
204,34	5,05	204,31	5,25	204,3	5,05	204,26	4,75	204,36	5,35
204,485	5,45	204,455	5,55	204,495	5,45	204,455	5,1	204,36	5,35
204,485	5,45	204,455	5,55	204,685	5,9	204,455	5,1	204,55	5,8
204,675	5,85	204,645	5,95	204,685	5,9	204,65	5,5	204,695	6,1
204,82	6,15	204,79	6,4	204,83	6,35	204,79	5,8	204,695	6,1
205,01	6,65	204,985	6,9	205,02	6,8	204,985	6,4	204,885	6,6
205,01	6,65	204,985	6,9	205,02	6,8	204,985	6,4	205,08	7,05
205,205	7,1	205,175	7,4	205,21	7,3	205,18	6,85	205,22	7,55
205,35	7,45	205,32	7,75	205,36	7,65	205,32	7,2	205,22	7,55
205,35	7,45	205,32	7,75	205,535	8,15	205,32	7,2	205,415	8,05
205,535	7,95	205,5	8,3	205,535	8,15	205,5	7,65	205,6	8,6
205,725	8,5	205,69	8,85	205,725	8,7	205,69	8,15	205,6	8,6
205,865	8,85	205,83	9,2	205,865	9,05	205,83	8,5	205,74	8,95
205,865	8,85	205,83	9,2	205,865	9,05	205,83	8,5	205,93	9,55
206,06	9,4	206,025	9,75	206,06	9,6	206,025	9,05	206,125	10,15
206,25	9,95	206,22	10,35	206,205	10	206,22	9,6	206,125	10,15
206,25	9,95	206,22	10,35	206,395	10,6	206,22	9,6	206,265	10,5
206,395	10,6	206,36	10,75	206,395	10,6	206,36	10	206,455	11,1

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
206,59	11,2	206,55	11,35	206,59	11,2	206,55	10,55	206,455	11,1
206,78	11,65	206,74	12	206,73	11,85	206,74	11,15	206,6	11,55
206,78	11,65	206,74	12	206,73	11,85	206,74	11,15	206,795	12,15
206,92	12,3	206,885	12,65	206,92	12,5	206,885	11,55	206,985	12,8
207,115	12,95	207,08	13,3	207,115	13,15	207,08	12,15	206,985	12,8
207,115	12,95	207,08	13,3	207,26	13,6	207,08	12,15	207,13	13,5
207,265	13,35	207,275	13,95	207,26	13,6	207,225	12,8	207,325	14,15
207,455	14,05	207,415	14,4	207,455	14,3	207,42	13,45	207,325	14,15
207,645	14,75	207,61	15,15	207,645	15	207,61	14,1	207,515	14,85
207,645	14,75	207,61	15,15	207,645	15	207,61	14,1	207,665	15,35
207,79	15,2	207,8	15,85	207,79	15,45	207,755	14,55	207,855	16,05
207,985	15,95	207,945	16,35	207,985	16,2	207,945	15,2	207,855	16,05
207,985	15,95	207,945	16,35	208,18	16,9	207,945	15,2	208,05	16,8
208,18	16,7	208,145	17,1	208,18	16,9	208,145	15,9	208,195	17,3
208,33	17,45	208,29	17,6	208,33	17,4	208,29	16,35	208,195	17,3
208,525	18,15	208,485	18,4	208,525	18,15	208,485	17,05	208,39	18,05
208,525	18,15	208,485	18,4	208,525	18,15	208,485	17,05	208,58	18,8
208,715	18,95	208,675	19,15	208,665	18,95	208,68	17,75	208,73	19,3
208,86	19,45	208,82	19,9	208,86	19,75	208,82	18,5	208,73	19,3
208,86	19,45	208,82	19,9	209,05	20,5	208,82	18,5	208,925	20,1
209,05	20,2	209,015	20,7	209,05	20,5	209,015	19,25	209,115	20,9
209,245	21	209,21	21,5	209,195	21,05	209,21	20	209,115	20,9
209,39	21,55	209,36	22,05	209,39	21,85	209,36	20,5	209,26	21,7
209,39	21,55	209,36	22,05	209,39	21,85	209,36	20,5	209,455	22,55
209,585	22,35	209,55	22,85	209,585	22,65	209,55	21,25	209,6	23,1
209,785	23,15	209,745	23,7	209,78	23,5	209,745	22,05	209,6	23,1
209,785	23,15	209,745	23,7	209,78	23,5	209,745	22,05	209,79	23,95
209,925	23,75	209,885	24,25	209,975	24,35	209,885	22,55	209,985	24,8
210,115	24,6	210,08	25,1	210,115	24,95	210,075	23,4	209,985	24,8
210,255	25,45	210,27	25,95	210,305	25,8	210,22	23,95	210,13	25,4
210,255	25,45	210,27	25,95	210,305	25,8	210,22	23,95	210,32	26,25

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
210,44	26,35	210,41	26,55	210,445	26,4	210,41	24,75	210,505	27,15
210,63	27,2	210,595	27,45	210,63	27,3	210,585	25,55	210,505	27,15
210,63	27,2	210,595	27,45	210,63	27,3	210,585	25,55	210,65	27,75
210,775	27,8	210,785	28,35	210,825	28,15	210,73	26,4	210,84	28,65
210,965	28,7	210,925	29,25	210,965	29,05	210,92	27,2	210,84	28,65
211,155	29,65	211,12	30,15	210,965	29,05	211,11	28,1	211,035	29,55
211,155	29,65	211,12	30,15	211,155	29,7	211,11	28,1	211,175	30,45
211,3	30,25	211,26	30,75	211,35	30,6	211,25	28,65	211,37	31,4
211,49	31,15	211,455	31,65	211,49	31,55	211,445	29,55	211,37	31,4
211,49	31,15	211,455	31,65	211,49	31,55	211,445	29,55	211,56	32,3
211,68	32,05	211,65	32,6	211,68	32,5	211,64	30,4	211,7	32,95
211,83	32,7	211,79	33,2	211,875	33,45	211,78	31	211,7	32,95
212,02	33,65	211,985	34,15	212,02	34,1	211,975	31,9	211,895	33,9
212,02	33,65	211,985	34,15	212,02	34,1	211,975	31,9	212,09	34,85
212,215	34,6	212,175	35,1	212,215	35,05	212,17	32,8	212,24	35,5
212,355	35,55	212,32	35,75	212,405	36,05	212,31	33,4	212,24	35,5
212,355	35,55	212,32	35,75	212,405	36,05	212,31	33,4	212,43	36,5
212,545	36,55	212,51	36,7	212,55	36,7	212,5	34,3	212,62	37,45
212,74	37,5	212,705	37,7	212,74	37,7	212,7	35,25	212,62	37,45
212,885	38,2	212,85	38,7	212,93	38,65	212,84	35,9	212,765	38,1
212,885	38,2	212,85	38,7	212,93	38,65	212,84	35,9	212,955	39,1
213,085	39,2	213,05	39,65	213,085	39,65	213,035	37,15	213,11	40,15
213,23	39,85	213,24	40,7	213,275	40,3	213,18	37,8	213,11	40,15
213,23	39,85	213,24	40,7	213,275	40,3	213,18	37,8	213,3	41,15
213,42	40,85	213,435	41,7	213,425	41,35	213,375	38,75	213,495	42,2
213,615	41,85	213,58	42,35	213,615	42,35	213,57	39,7	213,495	42,2
213,76	42,5	213,58	42,35	213,81	43,15	213,715	40,35	213,64	42,85
213,76	42,5	213,77	43,3	213,81	43,15	213,715	40,35	213,83	43,9
213,955	43,5	213,965	44,25	213,955	43,6	213,91	41,35	214,025	44,9
214,15	44,5	214,115	44,9	214,15	44,25	214,105	42,35	214,025	44,9
214,15	44,5	214,115	44,9	214,15	44,25	214,105	42,35	214,17	45,55

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
214,295	45,55	214,31	45,85	214,345	45,15	214,25	43,05	214,37	46,55
214,49	46,6	214,505	46,85	214,49	45,95	214,44	44	214,37	46,55
214,68	47,7	214,505	46,85	214,685	47,15	214,635	45	214,56	47,6
214,68	47,7	214,645	47,5	214,685	47,15	214,635	45	214,705	48,35
214,825	48,45	214,835	48,55	214,875	48,3	214,825	46,05	214,895	49,45
215,015	49,55	215,03	49,6	215,065	49,4	214,975	47,1	214,895	49,45
215,015	49,55	215,03	49,6	215,065	49,4	214,975	47,1	215,085	50,55
215,205	50,7	215,175	50,65	215,205	50,45	215,165	48,15	215,23	51,65
215,35	51,45	215,365	51,7	215,4	51,5	215,355	48,85	215,23	51,65
215,54	52,55	215,365	51,7	215,4	51,5	215,355	48,85	215,42	52,7
215,54	52,55	215,55	52,75	215,59	52,55	215,495	49,9	215,615	53,8
215,68	53,3	215,69	53,5	215,73	53,3	215,685	50,95	215,755	54,5
215,87	54,45	215,69	53,5	215,92	54,35	215,875	52	215,755	54,5
215,87	54,45	215,88	54,6	215,92	54,35	215,875	52	215,945	55,6
216,065	55,55	216,025	55,3	216,11	55,45	216,02	52,7	216,085	56,35
216,21	56,7	216,22	56,4	216,305	56,6	216,21	53,8	216,085	56,35
216,4	57,8	216,22	56,4	216,305	56,6	216,21	53,8	216,28	57,45
216,4	57,8	216,41	57,45	216,45	57,35	216,405	54,85	216,47	58,55
216,59	58,95	216,55	58,15	216,64	58,45	216,545	55,55	216,615	59,3
216,735	59,75	216,55	58,15	216,78	59,2	216,735	56,6	216,615	59,3
216,735	59,75	216,74	59,2	216,78	59,2	216,735	56,6	216,805	60,4
216,925	60,9	216,935	60,25	216,975	60,35	216,93	57,65	217	61,55
217,12	62,05	217,08	61,4	217,17	61,5	217,075	58,65	217	61,55
217,27	62,85	217,08	61,4	217,17	61,5	217,075	58,65	217,145	62,65
217,27	62,85	217,275	62,55	217,315	62,75	217,27	59,65	217,34	63,8
217,46	64	217,47	63,75	217,505	63,95	217,415	60,3	217,34	63,8
217,655	65,15	217,61	64,55	217,7	65,15	217,605	61,35	217,535	64,95
217,655	65,15	217,61	64,55	217,7	65,15	217,605	61,35	217,68	65,75
217,795	65,9	217,805	65,75	217,845	65,95	217,8	62,45	217,87	66,9
217,99	67	217,995	66,95	218,04	67,15	217,94	63,2	217,87	66,9
218,185	68,2	217,995	66,95	218,04	67,15	217,94	63,2	218,065	68

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
218,185	68,2	218,14	67,75	218,235	68,4	218,135	64,3	218,21	68,75
218,33	69,35	218,335	68,95	218,38	69,2	218,33	65,45	218,4	69,95
218,525	70,6	218,535	70,15	218,57	70,45	218,475	66,2	218,4	69,95
218,525	70,6	218,535	70,15	218,57	70,45	218,475	66,2	218,545	70,75
218,67	71,4	218,68	71	218,765	71,7	218,67	67,35	218,745	71,95
218,865	72,55	218,87	72,25	218,91	72,55	218,865	68,55	218,745	71,95
219,055	73,75	218,87	72,25	218,91	72,55	218,865	68,55	218,94	73,2
219,055	73,75	219,015	73,5	219,105	73,8	219,01	69,7	219,08	74,4
219,2	74,55	219,205	74,75	219,3	75,1	219,2	70,8	219,275	75,6
219,395	75,75	219,4	76	219,445	75,95	219,395	71,9	219,275	75,6
219,395	75,75	219,4	76	219,445	75,95	219,395	71,9	219,465	76,8
219,59	77	219,55	76,9	219,635	77,2	219,545	72,6	219,61	77,6
219,735	77,85	219,74	78,25	219,83	78,95	219,735	73,65	219,61	77,6
219,925	79,05	219,74	78,25	219,83	78,95	219,735	73,65	219,805	78,8
219,925	79,05	219,935	79,55	220,02	80,25	219,925	74,75	220	80,1
220,115	80,3	220,075	80,4	220,165	81,1	220,07	75,5	220,14	81
220,26	81,55	220,265	81,7	220,165	81,1	220,26	76,65	220,14	81
220,26	81,55	220,265	81,7	220,355	82,45	220,26	76,65	220,33	82,4
220,445	82,45	220,455	83,05	220,545	83,8	220,41	77,45	220,525	83,8
220,635	83,85	220,6	83,95	220,685	84,7	220,595	78,6	220,525	83,8
220,78	85,25	220,6	83,95	220,685	84,7	220,595	78,6	220,665	84,7
220,78	85,25	220,79	85,35	220,875	86,05	220,785	79,75	220,855	86,1
220,975	86,65	220,98	86,75	221,07	87,45	220,925	80,95	221,045	87,5
221,115	87,6	221,125	88,15	221,07	87,45	221,12	82,25	221,045	87,5
221,115	87,6	221,125	88,15	221,215	88,4	221,12	82,25	221,195	88,9
221,305	89	221,315	89,55	221,405	89,8	221,31	83,6	221,385	90,3
221,5	90,4	221,455	90,45	221,595	91,2	221,455	84,5	221,385	90,3
221,645	91,35	221,455	90,45	221,595	91,2	221,455	84,5	221,525	91,2
221,645	91,35	221,65	91,85	221,74	92,6	221,645	85,85	221,715	92,6
221,835	92,75	221,845	93,3	221,93	94,05	221,84	87,15	221,91	94
222,03	94,2	221,99	94,25	221,93	94,05	221,985	88,05	221,91	94

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
222,03	94,2	221,99	94,25	222,13	95,5	221,985	88,05	222,06	94,95
222,18	95,15	222,185	95,65	222,28	96,5	222,18	89,35	222,26	96,4
222,37	97,1	222,375	97,1	222,47	97,95	222,375	90,65	222,26	96,4
222,37	97,1	222,375	97,1	222,47	97,95	222,375	90,65	222,45	97,8
222,565	98,6	222,52	98,05	222,66	99,4	222,515	91,55	222,595	98,75
222,755	100,05	222,71	99,5	222,805	100,35	222,71	92,9	222,785	100,2
222,9	101,05	222,91	100,9	222,805	100,35	222,855	94,25	222,785	100,2
222,9	101,05	222,91	100,9	222,995	101,8	222,855	94,25	222,98	101,65
223,095	102,55	223,055	102,35	223,14	102,75	223,05	95,6	223,125	103,1
223,29	104,05	223,245	103,8	223,335	104,2	223,245	96,5	223,125	103,1
223,29	104,05	223,245	103,8	223,335	104,2	223,245	96,5	223,32	104,6
223,435	105,05	223,44	105,3	223,535	105,65	223,385	97,85	223,51	106,05
223,625	106,55	223,585	106,25	223,725	107,1	223,58	99,2	223,655	107
223,82	108,05	223,775	107,7	223,725	107,1	223,77	100,6	223,655	107
223,82	108,05	223,775	107,7	223,87	108,55	223,77	100,6	223,85	108,45
223,965	109,05	223,97	109,1	224,06	110	223,92	101,5	224,04	109,95
224,16	110,5	224,115	110,1	224,255	111,45	224,115	102,85	224,04	109,95
224,16	110,5	224,115	110,1	224,255	111,45	224,115	102,85	224,185	110,9
224,355	112	224,31	111,5	224,4	112,45	224,305	104,25	224,38	112,4
224,5	113,5	224,455	112,45	224,595	113,9	224,45	105,15	224,53	113,35
224,695	115	224,65	113,9	224,595	113,9	224,45	105,15	224,53	113,35
224,695	115	224,65	113,9	224,74	114,9	224,645	106,5	224,72	114,85
224,835	116	224,84	115,35	224,935	116,3	224,835	107,9	224,915	116,3
225,025	117,45	224,99	116,8	225,125	117,75	224,985	109,25	224,915	116,3
225,025	117,45	224,99	116,8	225,125	117,75	224,985	109,25	225,055	117,75
225,215	118,95	225,18	118,3	225,265	118,75	225,175	110,6	225,245	119,25
225,365	119,95	225,37	119,75	225,455	120,2	225,365	111,95	225,435	120,7
225,55	121,35	225,51	120,75	225,455	120,2	225,505	112,85	225,435	120,7
225,55	121,35	225,51	120,75	225,645	121,6	225,505	112,85	225,585	121,65
225,74	122,8	225,7	122,15	225,79	122,95	225,695	114,15	225,775	123,1
225,88	123,7	225,89	123,55	225,98	124,3	225,835	115,05	225,775	123,1

Продолжение Таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
225,88	123,7	225,89	123,55	225,98	124,3	225,835	115,05	225,965	124,45
226,075	125,05	226,035	124,5	226,175	125,7	226,035	116,35	226,11	125,35
226,265	126,4	226,23	125,85	226,315	126,65	226,225	117,65	226,3	126,65
226,415	127,7	226,42	127,15	226,315	126,65	226,37	118,5	226,3	126,65
226,415	127,7	226,42	127,15	226,505	128	226,37	118,5	226,45	127,55
226,605	128,95	226,565	128	226,7	129,3	226,56	119,7	226,64	128,8
226,795	130,2	226,755	129,35	226,845	130,2	226,75	120,9	226,83	130,1
226,795	130,2	226,755	129,35	226,845	130,2	226,75	120,9	226,83	130,1
226,99	131,4	226,945	130,7	227,04	131,45	226,895	122,15	226,97	131,4
227,135	132,2	227,09	131,95	227,24	132,75	227,09	123	227,17	132,65
227,135	132,2	227,09	131,95	227,24	132,75	227,29	124,7	227,17	132,65
227,33	133,4	227,29	133,15	227,38	133,55	227,29	124,7	227,365	133,8
227,52	134,6	227,435	133,95	227,57	134,8	227,43	125,55	227,505	134,6
227,67	135,45	227,625	135,1	227,765	136,05	227,625	126,8	227,705	135,75
227,67	135,45	227,625	135,1	227,765	136,05	227,625	126,8	227,705	135,75
227,86	136,7	227,82	136,1	227,91	137,3	227,815	128,05	227,89	136,9
228,055	137,95	227,965	135,6	228,105	138,4	227,955	128,8	228,04	137,6
228,055	137,95	228,16	125,5	228,105	138,4	228,155	129,95	228,04	137,6
228,2	138,75	228,16	125,5	228,25	139,15	228,155	129,95	228,235	138,7
228,39	139,9	228,355	94,3	228,44	140,3	228,35	130,45	228,425	139,8
228,585	141,1	228,5	64,8	228,635	140,9	228,495	127,9	228,57	140,5
228,585	141,1	228,5	64,8	228,635	140,9	228,495	127,9	228,57	140,5
228,735	141,85	228,695	26,55	228,78	138,55	228,69	110,65	228,76	141,5
228,93	142,6	228,885	9,35	228,975	121,15	228,885	74,2	228,96	142,5
228,93	142,6	229,03	6,45	228,975	121,15	229,025	36,15	228,96	142,5
229,12	133,6	229,03	6,45	229,165	81,75	229,025	36,15	229,105	143,05
229,265	116	229,225	6,75	229,315	51,35	229,22	20,55	229,3	137,3
229,46	71,95	229,42	7,15	229,51	19,05	229,37	12,5	229,44	123,2
229,46	71,95	229,42	7,15	229,51	19,05	229,37	12,5	229,44	123,2
229,655	28,6	229,565	7,4	229,7	8,15	229,565	12,2	229,635	83
229,795	11,7	229,76	7,85	229,845	7,15	229,755	12,8	229,825	37,6

Окончание Таблицы 3.

[illegible]

Приложение Д. Результаты исследования корреляционных зависимостей основных показателей смесовой ткани в процессе ее деформации

Таблица 4. Результаты полуцикловых испытаний для 5-ти образцов смесовой ткани при их удлинении по основе

Обр.1			Обр. 2			Обр. 3			Обр. 4			Обр. 5		
<i>L</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>P</i> , дН	<i>L</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>P</i> , дН	<i>L</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>P</i> , дН	<i>L</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>P</i> , дН	<i>L</i> , мм	<i>S</i> , мм	<i>P</i> , дН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
200	0	0	200	0	0	200	0	0	200	0	0,05	200	0	0
200,02	0,015	0	200	0	0	200	0	0	200	0	0	200,02	0,02	0
200,16	0,16	0	200	0	0	200	0	0	200,15	0,15	0	200,02	0,02	0
200,35	0,35	0	200,13	0,125	0	200,17	0,17	0	200,15	0,15	0	200,21	0,21	0
200,35	0,35	0	200,27	0,265	0	200,36	0,36	0	200,34	0,34	0	200,41	0,405	0
200,54	0,54	0	200,27	0,265	0	200,5	0,5	0,05	200,48	0,48	0	200,55	0,545	0
200,68	0,68	0	200,46	0,455	0	200,5	0,5	0,05	200,67	0,67	0,2	200,55	0,545	0
200,68	0,68	0	200,64	0,64	0,2	200,69	0,69	0,25	200,67	0,67	0,2	200,72	0,715	0,25
200,87	0,87	0	200,79	0,785	0,4	200,83	0,83	0,45	200,85	0,855	0,55	200,9	0,9	0,65
201,06	1,06	0	200,79	0,785	0,4	200,83	0,83	0,45	201	1	0,95	200,9	0,9	0,65
201,21	1,21	0	200,98	0,975	0,9	201,03	1,025	0,9	201,18	1,18	1,55	201,05	1,045	1,05
201,21	1,21	0	201,12	1,12	1,3	201,22	1,215	1,4	201,18	1,18	1,55	201,24	1,24	1,6
201,41	1,405	0	201,12	1,12	1,3	201,36	1,36	1,75	201,37	1,37	2,15	201,44	1,435	2,2
201,6	1,595	0	201,32	1,315	1,9	201,36	1,36	1,75	201,51	1,515	2,55	201,44	1,435	2,2
201,6	1,595	0	201,51	1,505	2,5	201,55	1,55	2,3	201,51	1,515	2,55	201,58	1,575	2,6
201,74	1,735	0	201,66	1,655	3,15	201,74	1,74	2,9	201,7	1,705	3,2	201,77	1,77	3,2

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
201,93	1,93	0	201,66	1,655	3,15	201,74	1,74	2,9	201,9	1,9	3,8	201,77	1,77	3,2
202,08	2,075	0	201,85	1,845	3,75	201,89	1,885	3,25	202,04	2,045	4,45	201,96	1,96	3,85
202,08	2,075	0	202,04	2,035	4,4	202,08	2,08	4,05	202,04	2,045	4,45	202,11	2,105	4,45
202,27	2,265	0	202,04	2,035	4,4	202,27	2,27	4,45	202,23	2,235	5,15	202,3	2,295	5,1
202,46	2,455	0	202,18	2,175	4,85	202,27	2,27	4,45	202,42	2,425	5,85	202,3	2,295	5,1
202,46	2,455	0	202,37	2,365	5,5	202,41	2,41	5,05	202,42	2,425	5,85	202,44	2,44	5,55
202,6	2,595	0	202,56	2,56	6,15	202,6	2,6	5,65	202,56	2,565	6,3	202,64	2,635	6,2
202,79	2,785	0	202,56	2,56	6,15	202,6	2,6	5,65	202,76	2,76	7	202,64	2,635	6,2
202,98	2,98	0	202,7	2,695	6,6	202,78	2,78	6,3	202,9	2,905	7,45	202,83	2,825	6,9
202,98	2,98	0	202,89	2,885	7,25	202,93	2,925	6,7	202,9	2,905	7,45	202,97	2,965	7,35
203,13	3,125	0	202,89	2,885	7,25	202,93	2,925	6,7	203,09	3,095	8,15	203,16	3,16	8
203,31	3,31	0	203,08	3,075	7,9	203,12	3,12	7,35	203,29	3,29	8,8	203,16	3,16	8
203,31	3,31	0	203,22	3,22	8,35	203,26	3,26	7,8	203,29	3,29	8,8	203,35	3,35	8,65
203,5	3,495	0	203,41	3,41	9	203,45	3,45	8,45	203,43	3,43	9,3	203,5	3,495	9,1
203,64	3,635	0	203,41	3,41	9	203,45	3,45	8,45	203,62	3,62	10	203,5	3,495	9,1
203,83	3,825	0	203,55	3,55	9,65	203,65	3,645	9,1	203,81	3,81	10,7	203,69	3,69	9,8
203,83	3,825	0	203,75	3,745	10,3	203,79	3,785	9,75	203,81	3,81	10,7	203,88	3,88	10,45
204,02	4,015	0	203,75	3,745	10,3	203,79	3,785	9,75	203,96	3,96	11,4	204,02	4,02	11,15
204,17	4,165	0	203,94	3,935	10,95	203,98	3,975	10,4	204,15	4,15	12,05	204,02	4,02	11,15
204,17	4,165	0	204,08	4,075	11,4	204,17	4,165	11,05	204,15	4,15	12,05	204,21	4,21	11,85
204,36	4,355	0	204,27	4,265	12,05	204,31	4,31	11,5	204,34	4,34	12,75	204,4	4,4	12,5
204,55	4,545	0	204,27	4,265	12,05	204,31	4,31	11,5	204,48	4,48	13,2	204,4	4,4	12,5
204,69	4,69	0	204,46	4,455	12,7	204,5	4,5	12,15	204,67	4,67	13,9	204,55	4,545	12,95

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
204,69	4,69	0	204,6	4,6	13,15	204,7	4,695	12,8	204,67	4,67	13,9	204,74	4,74	13,65
204,88	4,88	0	204,6	4,6	13,15	204,7	4,695	12,8	204,86	4,865	14,6	204,88	4,88	14,1
205,08	5,075	0	204,79	4,79	13,8	204,84	4,835	13,2	205,01	5,01	15,1	204,88	4,88	14,1
205,08	5,075	0	204,99	4,985	14,45	205,03	5,03	13,9	205,01	5,01	15,1	205,08	5,075	14,8
205,22	5,215	0	205,13	5,13	14,9	205,22	5,22	14,55	205,2	5,205	15,8	205,27	5,265	15,45
205,41	5,41	0	205,13	5,13	14,9	205,22	5,22	14,55	205,39	5,395	16,45	205,27	5,265	15,45
205,6	5,6	0	205,32	5,32	15,55	205,37	5,365	15	205,53	5,535	16,95	205,41	5,41	15,95
205,6	5,6	0	205,51	5,51	16,2	205,56	5,555	15,65	205,53	5,535	16,95	205,6	5,6	16,6
205,74	5,74	0	205,51	5,51	16,2	205,74	5,74	16,35	205,72	5,725	17,6	205,79	5,79	17,25
205,93	5,925	0	205,65	5,645	16,85	205,74	5,74	16,35	205,86	5,865	18,3	205,79	5,79	17,25
205,93	5,925	0	205,84	5,835	17,5	205,89	5,885	17	205,86	5,865	18,3	205,93	5,93	17,9
206,07	6,07	0	206,03	6,03	18,15	206,08	6,075	17,65	206,05	6,055	18,95	206,12	6,12	18,55
206,26	6,26	0	206,03	6,03	18,15	206,08	6,075	17,65	206,25	6,255	19,65	206,12	6,12	18,55
206,46	6,455	0	206,18	6,175	18,55	206,22	6,22	18,1	206,4	6,4	20,05	206,32	6,315	19,2
206,46	6,455	0	206,37	6,37	19,2	206,42	6,415	18,75	206,4	6,4	20,05	206,46	6,46	19,6
206,61	6,605	0	206,37	6,37	19,2	206,61	6,61	19,4	206,59	6,59	20,7	206,66	6,655	20,3
206,79	6,79	0	206,51	6,51	19,6	206,61	6,61	19,4	206,78	6,785	21,35	206,66	6,655	20,3
206,79	6,79	0	206,71	6,705	20,25	206,75	6,75	19,85	206,78	6,785	21,35	206,85	6,85	20,95
206,99	6,985	0	206,9	6,895	20,9	206,95	6,945	20,5	206,92	6,925	21,8	206,99	6,99	21,4
207,13	7,125	0	206,9	6,895	20,9	206,95	6,945	20,5	207,12	7,12	22,45	206,99	6,99	21,4
207,32	7,315	0	207,04	7,04	21,3	207,14	7,135	21,15	207,31	7,31	23,15	207,19	7,185	22,05
207,32	7,315	0	207,23	7,23	21,95	207,28	7,28	21,55	207,31	7,31	23,15	207,38	7,375	22,65
207,51	7,505	0	207,23	7,23	21,95	207,47	7,47	22,2	207,45	7,455	23,55	207,52	7,515	23,1

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
207,7	7,7	0	207,43	7,425	22,55	207,47	7,47	22,2	207,64	7,645	24,2	207,52	7,515	23,1
207,7	7,7	0	207,57	7,565	23,2	207,66	7,66	22,85	207,64	7,645	24,2	207,71	7,705	23,7
207,85	7,845	0	207,76	7,755	23,8	207,81	7,805	23,25	207,84	7,84	24,85	207,86	7,855	24,35
208,04	8,035	0	207,76	7,755	23,8	207,81	7,805	23,25	207,98	7,98	25,5	207,86	7,855	24,35
208,04	8,035	0	207,95	7,945	24,4	208	7,995	24,15	208,17	8,17	26,1	208,05	8,045	24,95
208,23	8,225	0	208,1	8,095	24,8	208,19	8,185	24,8	208,17	8,17	26,1	208,24	8,235	25,6
208,37	8,37	0	208,1	8,095	24,8	208,33	8,33	25,2	208,32	8,32	26,55	208,38	8,38	26
208,56	8,56	0	208,29	8,285	25,45	208,33	8,33	25,2	208,51	8,51	27,15	208,38	8,38	26
208,56	8,56	0	208,48	8,475	26,05	208,53	8,525	25,85	208,51	8,51	27,15	208,57	8,57	26,65
208,75	8,75	0	208,62	8,615	26,45	208,67	8,665	26,25	208,7	8,7	27,8	208,76	8,76	27,3
208,9	8,895	0	208,62	8,615	26,45	208,67	8,665	26,25	208,84	8,84	28,25	208,76	8,76	27,3
208,9	8,895	0	208,81	8,805	27,1	208,86	8,855	26,85	209,03	9,03	28,85	208,91	8,905	27,7
209,09	9,085	0	209	8,995	27,75	209,05	9,045	27,5	209,03	9,03	28,85	209,1	9,095	28,35
209,28	9,275	0	209	8,995	27,75	209,19	9,19	27,95	209,22	9,22	29,5	209,29	9,285	28,95
209,42	9,42	0	209,14	9,14	28,15	209,19	9,19	27,95	209,37	9,37	29,95	209,29	9,285	28,95
209,42	9,42	0	209,34	9,335	28,75	209,43	9,425	28,75	209,37	9,37	29,95	209,43	9,43	29,4
209,61	9,61	0	209,48	9,475	29,35	209,58	9,575	29,15	209,56	9,56	30,55	209,62	9,62	30
209,8	9,8	0	209,48	9,475	29,35	209,58	9,575	29,15	209,75	9,75	31,2	209,62	9,62	30
209,8	9,8	0	209,67	9,665	29,95	209,77	9,765	29,8	209,89	9,895	31,8	209,81	9,81	30,65
209,95	9,95	0	209,86	9,86	30,55	209,96	9,96	30,4	209,89	9,895	31,8	209,96	9,96	31,25
210,15	10,15	0	209,86	9,86	30,55	209,96	9,96	30,4	210,08	10,09	32,4	210,16	10,16	31,85
210,34	10,34	0	210,01	10,01	31	210,11	10,105	30,85	210,28	10,28	33	210,16	10,16	31,85
210,34	10,34	0	210,2	10,2	31,6	210,3	10,295	31,45	210,28	10,28	33	210,35	10,35	32,5

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
210,52	10,52	0	210,39	10,39	32,2	210,44	10,435	32,05	210,42	10,42	33,45	210,49	10,49	32,9
210,66	10,66	0	210,39	10,39	32,2	210,44	10,435	32,05	210,61	10,62	34,05	210,49	10,49	32,9
210,66	10,66	0	210,53	10,53	32,55	210,63	10,625	32,65	210,8	10,81	34,7	210,67	10,67	33,5
210,85	10,85	0	210,72	10,72	33,15	210,82	10,815	33,25	210,8	10,81	34,7	210,86	10,86	34,15
211,04	11,04	0	210,72	10,72	33,15	210,82	10,815	33,25	210,94	10,95	35,1	210,86	10,86	34,15
211,19	11,19	0	210,91	10,91	33,8	210,96	10,955	33,7	211,13	11,14	35,7	211,05	11,05	34,75
211,19	11,19	0	211,05	11,05	34,2	211,15	11,145	34,3	211,13	11,14	35,7	211,2	11,2	35,15
211,39	11,39	0	211,25	11,25	34,8	211,35	11,345	34,9	211,28	11,28	36,1	211,4	11,4	35,75
211,53	11,53	0	211,25	11,25	34,8	211,35	11,345	34,9	211,47	11,48	36,7	211,4	11,4	35,75
211,53	11,53	0	211,44	11,44	35,4	211,49	11,485	35,3	211,67	11,67	37,3	211,59	11,59	36,35
211,72	11,72	0,05	211,59	11,59	35,95	211,68	11,68	35,9	211,67	11,67	37,3	211,73	11,73	36,75
211,91	11,91	0,05	211,59	11,59	35,95	211,68	11,68	35,9	211,81	11,82	37,9	211,73	11,73	36,75
212,06	12,06	0,1	211,78	11,78	36,55	211,88	11,875	36,5	212,01	12,01	38,55	211,93	11,93	37,35
212,06	12,06	0,1	211,92	11,92	36,95	212,02	12,02	36,9	212,01	12,01	38,55	212,12	12,12	38
212,25	12,25	0,15	212,11	12,11	37,55	212,21	12,21	37,5	212,2	12,2	39,1	212,26	12,26	38,6
212,44	12,44	0,2	212,11	12,11	37,55	212,21	12,21	37,5	212,34	12,34	39,5	212,26	12,26	38,6
212,44	12,44	0,2	212,3	12,3	38,15	212,4	12,4	38,1	212,53	12,53	40,1	212,45	12,45	39,2
212,58	12,58	0,25	212,45	12,45	38,5	212,54	12,54	38,7	212,53	12,53	40,1	212,6	12,6	39,6
212,77	12,77	0,35	212,45	12,45	38,5	212,54	12,54	38,7	212,72	12,72	40,7	212,6	12,6	39,6
212,96	12,96	0,45	212,64	12,64	39,15	212,74	12,735	39,3	212,87	12,87	41,1	212,79	12,79	40,2
212,96	12,96	0,45	212,83	12,83	39,75	212,93	12,925	39,9	212,87	12,87	41,1	212,98	12,98	40,85
213,11	13,11	0,55	212,97	12,97	40,1	213,07	13,07	40,3	213,06	13,06	41,7	213,13	13,13	41,2
213,3	13,3	0,65	212,97	12,97	40,1	213,07	13,07	40,3	213,25	13,25	42,35	213,13	13,13	41,2

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
213,3	13,3	0,65	213,16	13,16	40,7	213,26	13,26	40,9	213,39	13,4	42,75	213,32	13,32	41,8
213,49	13,49	0,75	213,35	13,35	41,3	213,46	13,455	41,5	213,39	13,4	42,75	213,51	13,51	42,4
213,63	13,63	0,85	213,35	13,35	41,3	213,46	13,455	41,5	213,58	13,59	43,35	213,51	13,51	42,4
213,63	13,63	0,85	213,5	13,5	41,9	213,65	13,645	42,1	213,77	13,78	43,95	213,65	13,65	42,8
213,82	13,82	1	213,69	13,69	42,5	213,79	13,785	42,5	213,77	13,78	43,95	213,84	13,84	43,4
214,01	14,01	1,15	213,88	13,88	43,1	213,79	13,785	42,5	213,92	13,92	44,6	214,03	14,03	44
214,16	14,16	1,3	213,88	13,88	43,1	213,98	13,975	43,1	214,11	14,11	45,2	214,03	14,03	44
214,16	14,16	1,3	214,02	14,02	43,5	214,17	14,165	43,7	214,3	14,3	45,8	214,17	14,17	44,6
214,35	14,35	1,5	214,21	14,21	44,1	214,17	14,165	43,7	214,3	14,3	45,8	214,37	14,37	45,25
214,49	14,49	1,75	214,21	14,21	44,1	214,32	14,315	44,35	214,44	14,45	46,25	214,37	14,37	45,25
214,68	14,68	2	214,4	14,4	44,7	214,51	14,505	44,95	214,63	14,64	46,85	214,56	14,56	45,9
214,68	14,68	2	214,55	14,55	45,15	214,7	14,695	45,55	214,63	14,64	46,85	214,7	14,7	46,3
214,87	14,87	2,25	214,74	14,74	45,75	214,7	14,695	45,55	214,83	14,83	47,5	214,89	14,89	46,95
215,07	15,07	2,55	214,74	14,74	45,75	214,84	14,84	45,95	214,97	14,98	47,9	214,89	14,89	46,95
215,07	15,07	2,55	214,94	14,94	46,35	215,03	15,03	46,55	215,17	15,17	48,5	215,09	15,09	47,5
215,26	15,26	2,85	215,08	15,08	46,75	215,18	15,18	46,95	215,17	15,17	48,5	215,23	15,23	47,9
215,4	15,4	3,1	215,08	15,08	46,75	215,18	15,18	46,95	215,36	15,36	49,15	215,23	15,23	47,9
215,4	15,4	3,1	215,27	15,27	47,35	215,37	15,37	47,6	215,5	15,5	49,55	215,42	15,42	48,55
215,59	15,59	3,45	215,46	15,46	48	215,56	15,555	48,2	215,5	15,5	49,55	215,56	15,56	48,95
215,78	15,78	3,8	215,6	15,6	48,6	215,56	15,555	48,2	215,68	15,69	50,2	215,75	15,75	49,6
215,92	15,92	4,1	215,6	15,6	48,6	215,7	15,695	48,6	215,83	15,84	50,85	215,75	15,75	49,6
215,92	15,92	4,1	215,79	15,79	49,2	215,89	15,885	49,2	216,02	16,03	51,45	215,94	15,94	50,2
216,11	16,11	4,5	215,98	15,98	49,85	216,08	16,08	49,8	216,02	16,03	51,45	216,08	16,08	50,85

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
216,26	16,26	4,8	215,98	15,98	49,85	216,08	16,08	49,8	216,21	16,22	52,1	216,08	16,08	50,85
216,26	16,26	4,8	216,12	16,12	50,25	216,23	16,225	50,45	216,36	16,36	52,55	216,28	16,28	51,5
216,46	16,46	5,25	216,32	16,32	50,9	216,42	16,42	51,05	216,36	16,36	52,55	216,47	16,47	52,15
216,65	16,65	5,75	216,32	16,32	50,9	216,42	16,42	51,05	216,55	16,56	53,2	216,62	16,62	52,55
216,79	16,79	6,25	216,46	16,46	51,35	216,62	16,615	51,5	216,74	16,75	53,85	216,62	16,62	52,55
216,79	16,79	6,25	216,66	16,66	51,95	216,76	16,755	52,15	216,89	16,89	54,3	216,81	16,81	53,2
216,98	16,98	6,75	216,85	16,85	52,6	216,95	16,945	52,75	216,89	16,89	54,3	217,01	17,01	53,85
217,17	17,17	7,3	216,85	16,85	52,6	216,95	16,945	52,75	217,08	17,09	54,95	217,01	17,01	53,85
217,17	17,17	7,3	216,99	16,99	53	217,14	17,14	53,4	217,28	17,28	55,65	217,15	17,15	54,3
217,31	17,31	7,65	217,18	17,18	53,65	217,29	17,285	53,85	217,28	17,28	55,65	217,34	17,34	54,95
217,5	17,5	8,2	217,37	17,37	54,25	217,29	17,285	53,85	217,42	17,42	56,05	217,53	17,53	55,6
217,7	17,7	8,8	217,37	17,37	54,25	217,48	17,475	54,5	217,61	17,61	56,75	217,53	17,53	55,6
217,7	17,7	8,8	217,52	17,52	54,9	217,67	17,665	55,1	217,8	17,81	57,4	217,68	17,68	56,05
217,84	17,84	9,2	217,71	17,71	55,6	217,81	17,81	55,55	217,8	17,81	57,4	217,87	17,87	56,75
218,03	18,03	9,8	217,71	17,71	55,6	217,81	17,81	55,55	217,94	17,95	58,1	217,87	17,87	56,75
218,03	18,03	9,8	217,9	17,9	56,25	218	18	56,2	218,13	18,14	58,8	218,06	18,06	57,4
218,22	18,22	10,4	218,05	18,05	56,7	218,15	18,145	56,7	218,13	18,14	58,8	218,2	18,2	58,05
218,36	18,36	10,8	218,24	18,24	57,4	218,15	18,145	56,7	218,33	18,34	59,45	218,39	18,39	58,75
218,55	18,55	11,45	218,24	18,24	57,4	218,34	18,335	57,6	218,47	18,48	59,9	218,39	18,39	58,75
218,55	18,55	11,45	218,43	18,43	58,05	218,53	18,53	58,3	218,66	18,67	60,65	218,54	18,54	59,2
218,75	18,75	12,1	218,57	18,57	58,5	218,68	18,675	58,7	218,66	18,67	60,65	218,73	18,73	59,9
218,89	18,89	12,7	218,57	18,57	58,5	218,68	18,675	58,7	218,8	18,81	61,1	218,73	18,73	59,9
218,89	18,89	12,7	218,76	18,76	59,2	218,86	18,86	59,4	218,99	19	61,8	218,92	18,92	60,6

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
219,08	19,08	13,35	218,96	18,96	59,85	219,05	19,05	60,05	218,99	19	61,8	219,06	19,06	61,05
219,27	19,27	14	219,1	19,1	60,35	219,05	19,05	60,05	219,18	19,19	62,5	219,25	19,25	61,75
219,41	19,41	14,5	219,1	19,1	60,35	219,2	19,195	60,5	219,33	19,34	63	219,25	19,25	61,75
219,41	19,41	14,5	219,29	19,29	61,05	219,39	19,385	61,2	219,52	19,53	63,75	219,44	19,44	62,5
219,61	19,61	15,2	219,43	19,43	61,75	219,58	19,58	61,95	219,52	19,53	63,75	219,63	19,63	63,2
219,75	19,75	15,65	219,43	19,43	61,75	219,58	19,58	61,95	219,71	19,72	64,5	219,63	19,63	63,2
219,95	19,95	16,35	219,62	19,62	62,45	219,73	19,725	62,4	219,86	19,86	65,25	219,78	19,78	63,7
219,95	19,95	16,35	219,81	19,81	63,15	219,92	19,915	63,1	219,86	19,86	65,25	219,97	19,97	64,4
220,14	20,14	17	219,96	19,96	63,65	219,92	19,915	63,1	220,05	20,06	65,95	220,12	20,12	65,15
220,28	20,28	17,5	219,96	19,96	63,65	220,11	20,11	63,85	220,24	20,25	66,7	220,12	20,12	65,15
220,28	20,28	17,5	220,15	20,15	64,4	220,25	20,25	64,3	220,39	20,39	67,2	220,31	20,31	65,85
220,47	20,47	18,2	220,35	20,35	65,1	220,44	20,44	65,05	220,39	20,39	67,2	220,5	20,5	66,6
220,66	20,66	18,9	220,35	20,35	65,1	220,44	20,44	65,05	220,58	20,58	67,95	220,5	20,5	66,6
220,8	20,8	19,6	220,49	20,49	65,55	220,63	20,63	65,8	220,77	20,77	68,7	220,64	20,64	67,1
220,8	20,8	19,6	220,67	20,67	66,3	220,78	20,775	66,5	220,77	20,77	68,7	220,83	20,83	67,85
220,99	20,99	20,3	220,86	20,86	67,05	220,78	20,775	66,5	220,91	20,91	69,2	221,02	21,02	68,6
221,18	21,18	21	220,86	20,86	67,05	220,97	20,965	67,25	221,1	21,1	70	221,02	21,02	68,6
221,18	21,18	21	221,01	21,01	67,55	221,11	21,105	67,75	221,29	21,3	70,75	221,16	21,16	69,1
221,38	21,38	21,7	221,2	21,2	68,3	221,3	21,3	68,5	221,29	21,3	70,75	221,36	21,36	69,9
221,52	21,52	22,15	221,2	21,2	68,3	221,3	21,3	68,5	221,44	21,45	71,3	221,36	21,36	69,9
221,52	21,52	22,15	221,4	21,4	69,1	221,5	21,495	69,25	221,63	21,64	72,1	221,55	21,55	70,7
221,71	21,71	22,8	221,54	21,54	69,85	221,69	21,685	70,05	221,63	21,64	72,1	221,7	21,7	71,2
221,9	21,9	23,45	221,73	21,73	70,65	221,69	21,685	70,05	221,78	21,78	72,9	221,89	21,89	72

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
222,05	22,05	23,9	221,73	21,73	70,65	221,84	21,835	70,55	221,97	21,98	73,75	221,89	21,89	72
222,05	22,05	23,9	221,88	21,88	71,15	222,03	22,025	71,35	222,16	22,17	74,55	222,08	22,08	72,75
222,24	22,24	24,55	222,07	22,07	71,95	222,22	22,215	72,15	222,16	22,17	74,55	222,23	22,23	73,55
222,43	22,43	25,2	222,07	22,07	71,95	222,22	22,215	72,15	222,3	22,31	75,15	222,23	22,23	73,55
222,43	22,43	25,2	222,26	22,26	72,75	222,36	22,355	72,95	222,5	22,5	75,95	222,42	22,42	74,4
222,57	22,57	25,6	222,4	22,4	73,3	222,55	22,55	73,75	222,5	22,5	75,95	222,61	22,61	75,2
222,76	22,76	26,25	222,4	22,4	73,3	222,55	22,55	73,75	222,69	22,7	76,8	222,75	22,75	75,75
222,95	22,95	26,85	222,59	22,59	74,1	222,7	22,695	74,25	222,83	22,84	77,35	222,75	22,75	75,75
222,95	22,95	26,85	222,78	22,78	74,9	222,89	22,885	75,1	222,83	22,84	77,35	222,94	22,94	76,6
223,15	23,15	27,5	222,93	22,93	75,45	223,08	23,08	75,95	223,03	23,03	78,2	223,09	23,09	77,15
223,29	23,29	28,1	222,93	22,93	75,45	223,08	23,08	75,95	223,22	23,22	79,05	223,09	23,09	77,15
223,29	23,29	28,1	223,12	23,12	76,3	223,22	23,22	76,5	223,36	23,36	79,6	223,28	23,28	78
223,48	23,48	28,7	223,31	23,31	77,15	223,42	23,415	77,35	223,36	23,36	79,6	223,47	23,47	78,85
223,67	23,67	29,25	223,46	23,46	78	223,42	23,415	77,35	223,55	23,55	80,5	223,62	23,62	79,4
223,82	23,82	29,65	223,46	23,46	78	223,61	23,605	78,15	223,75	23,75	81,35	223,62	23,62	79,4
223,82	23,82	29,65	223,65	23,65	78,8	223,75	23,75	78,7	223,89	23,89	82,25	223,81	23,81	80,25
224	24	30,2	223,84	23,84	79,65	223,94	23,94	79,55	223,89	23,89	82,25	224	24	81,15
224,2	24,2	30,75	223,84	23,84	79,65	223,94	23,94	79,55	224,08	24,08	83,15	224	24	81,15
224,2	24,2	30,75	223,98	23,98	80,25	224,13	24,13	80,4	224,27	24,27	84,05	224,14	24,14	82
224,34	24,34	31,1	224,17	24,17	81,1	224,27	24,27	81	224,27	24,27	84,05	224,33	24,33	82,9
224,53	24,53	31,65	224,36	24,36	82	224,27	24,27	81	224,41	24,41	84,65	224,52	24,52	83,8
224,73	24,73	32,2	224,36	24,36	82	224,46	24,46	82,15	224,6	24,61	85,55	224,52	24,52	83,8
224,73	24,73	32,2	224,51	24,51	82,6	224,66	24,655	83,05	224,6	24,61	85,55	224,72	24,72	84,7

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
224,87	24,87	32,55	224,7	24,7	83,5	224,8	24,795	83,6	224,75	24,75	86,2	224,86	24,86	85,3
225,06	25,06	33,1	224,7	24,7	83,5	224,8	24,795	83,6	224,94	24,95	87,1	224,86	24,86	85,3
225,06	25,06	33,1	224,84	24,84	84,1	225	24,995	84,5	225,13	25,14	88,05	225,05	25,05	86,2
225,21	25,21	33,65	225,03	25,03	85	225,19	25,185	85,4	225,13	25,14	88,05	225,24	25,24	87,1
225,4	25,4	34,15	225,22	25,22	85,9	225,19	25,185	85,4	225,28	25,28	88,65	225,24	25,24	87,1
225,59	25,59	34,65	225,22	25,22	85,9	225,33	25,33	86	225,47	25,47	89,6	225,39	25,39	87,75
225,59	25,59	34,65	225,42	25,42	86,8	225,52	25,515	86,95	225,65	25,66	90,55	225,58	25,58	88,65
225,73	25,73	35	225,56	25,56	87,75	225,66	25,655	87,55	225,65	25,66	90,55	225,77	25,77	89,55
225,92	25,92	35,5	225,56	25,56	87,75	225,66	25,655	87,55	225,8	25,8	91,5	225,77	25,77	89,55
225,92	25,92	35,5	225,75	25,75	88,7	225,85	25,845	88,45	225,99	25,99	92,5	225,91	25,91	90,2
226,11	26,11	36,05	225,94	25,94	89,6	226,04	26,04	89,4	225,99	25,99	92,5	226,1	26,1	91,15
226,25	26,25	36,4	226,08	26,08	90,25	226,04	26,04	89,4	226,18	26,19	93,5	226,1	26,1	91,15
226,45	26,45	36,9	226,08	26,08	90,25	226,19	26,185	90,35	226,33	26,33	94,15	226,29	26,29	92,1
226,45	26,45	36,9	226,27	26,27	91,2	226,38	26,38	90,95	226,52	26,52	95,1	226,44	26,44	93,05
226,64	26,64	37,4	226,47	26,47	92,2	226,57	26,57	91,95	226,52	26,52	95,1	226,63	26,63	94,05
226,83	26,83	37,9	226,47	26,47	92,2	226,57	26,57	91,95	226,71	26,72	96,1	226,63	26,63	94,05
226,83	26,83	37,9	226,62	26,62	92,85	226,72	26,715	92,9	226,86	26,87	96,8	226,83	26,83	95,05
227,02	27,02	38,4	226,81	26,81	93,8	226,91	26,91	93,9	226,86	26,87	96,8	226,97	26,97	95,75
227,16	27,16	38,75	226,95	26,95	94,45	226,91	26,91	93,9	227,05	27,06	97,8	226,97	26,97	95,75
227,16	27,16	38,75	226,95	26,95	94,45	227,1	27,1	94,85	227,25	27,25	98,85	227,16	27,16	96,75
227,35	27,35	39,25	227,14	27,14	95,45	227,25	27,245	95,55	227,39	27,39	99,55	227,35	27,35	97,75
227,54	27,54	39,8	227,33	27,33	96,45	227,44	27,435	96,55	227,39	27,39	99,55	227,5	27,5	98,45
227,69	27,69	40,3	227,33	27,33	96,45	227,44	27,435	96,55	227,58	27,58	100,6	227,5	27,5	98,45

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
227,69	27,69	40,3	227,48	27,48	97,45	227,63	27,625	97,55	227,72	27,73	101,6	227,69	27,69	99,45
227,88	27,88	40,85	227,67	27,67	98,45	227,77	27,77	98,25	227,72	27,73	101,6	227,83	27,83	100,1
228,03	28,03	41,2	227,86	27,86	99,5	227,77	27,77	98,25	227,92	27,92	102,7	227,83	27,83	100,1
228,03	28,03	41,2	227,86	27,86	99,5	227,96	27,96	99,25	228,11	28,11	103,7	228,03	28,03	101,2
228,22	28,22	41,75	228	28	100,2	228,15	28,15	100,3	228,25	28,26	104,4	228,22	28,22	102,2
228,41	28,41	42,25	228,19	28,19	101,2	228,3	28,3	101,3	228,25	28,26	104,4	228,36	28,36	103,3
228,55	28,55	42,6	228,19	28,19	101,2	228,3	28,3	101,3	228,44	28,45	105,5	228,36	28,36	103,3
228,55	28,55	42,6	228,38	28,38	102,3	228,49	28,49	102,4	228,63	28,64	106,6	228,55	28,55	104,3
228,74	28,74	43,15	228,53	28,53	103	228,63	28,63	103	228,63	28,64	106,6	228,75	28,75	105,4
228,93	28,93	43,7	228,72	28,72	104	228,63	28,63	103	228,78	28,78	107,3	228,75	28,75	105,4
228,93	28,93	43,7	228,72	28,72	104	228,83	28,825	104,1	228,96	28,97	108,4	228,89	28,89	106,1
229,08	29,08	44,1	228,91	28,91	105,1	229,01	29,01	105,1	229,16	29,17	109,5	229,08	29,08	107,2
229,27	29,27	44,65	229,05	29,05	105,8	229,16	29,16	105,8	229,16	29,17	109,5	229,27	29,27	108,3
229,46	29,46	45,2	229,05	29,05	105,8	229,16	29,16	105,8	229,3	29,31	110,2	229,27	29,27	108,3
229,46	29,46	45,2	229,24	29,24	106,9	229,4	29,395	107,3	229,49	29,5	111,4	229,41	29,41	109
229,6	29,6	45,75	229,43	29,43	107,9	229,4	29,395	107,3	229,49	29,5	111,4	229,6	29,6	110,1
229,79	29,79	46,35	229,58	29,58	109	229,59	29,585	108,3	229,69	29,69	112,5	229,6	29,6	110,1
229,79	29,79	46,35	229,58	29,58	109	229,74	29,735	109,1	229,83	29,83	113,6	229,79	29,79	111,2
229,99	29,99	46,95	229,77	29,77	110,1	229,93	29,925	110,2	229,83	29,83	113,6	229,94	29,94	111,9
230,13	30,13	47,35	229,92	29,92	110,9	229,93	29,925	110,2	230,07	30,07	114,8	230,13	30,13	113
230,32	30,32	47,95	229,92	29,92	110,9	230,12	30,115	111,3	230,21	30,22	115,9	230,13	30,13	113
230,32	30,32	47,95	230,11	30,11	112	230,26	30,26	112	230,41	30,41	117	230,33	30,33	114,2
230,46	30,46	48,35	230,3	30,3	113,1	230,26	30,26	112	230,41	30,41	117	230,47	30,47	115,3

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
230,65	30,65	48,95	230,44	30,44	113,8	230,45	30,45	113,1	230,55	30,55	117,8	230,47	30,47	115,3
230,65	30,65	48,95	230,44	30,44	113,8	230,64	30,64	114,2	230,74	30,74	118,9	230,66	30,66	116,4
230,84	30,84	49,6	230,63	30,63	114,9	230,79	30,785	115,3	230,74	30,74	118,9	230,8	30,8	117,1
230,99	30,99	50	230,82	30,82	116	230,79	30,785	115,3	230,92	30,93	120,1	230,99	30,99	118,3
230,99	30,99	50	230,82	30,82	116	230,97	30,97	116,1	231,07	31,07	120,8	230,99	30,99	118,3
231,18	31,18	50,6	231,01	31,01	117,2	231,17	31,165	117,6	231,26	31,27	122	231,18	31,18	119,4
231,37	31,37	51,25	231,2	31,2	118,3	231,17	31,165	117,6	231,26	31,27	122	231,33	31,33	120,2
231,56	31,56	51,9	231,2	31,2	118,3	231,31	31,31	118,3	231,46	31,46	123,2	231,33	31,33	120,2
231,56	31,56	51,9	231,35	31,35	119,1	231,51	31,505	119,5	231,65	31,66	124,3	231,52	31,52	121,4
231,71	31,71	52,6	231,54	31,54	120,2	231,7	31,695	120,6	231,65	31,66	124,3	231,71	31,71	122,5
231,9	31,9	53,25	231,69	31,69	121,4	231,7	31,695	120,6	231,85	31,85	125,5	231,86	31,86	123,3
232,09	32,09	53,9	231,69	31,69	121,4	231,85	31,845	121,4	231,99	32	126,3	231,86	31,86	123,3
232,09	32,09	53,9	231,88	31,88	122,5	232,04	32,035	122,6	231,99	32	126,3	232,05	32,05	124,5
232,23	32,23	54,35	232,07	32,07	123,7	232,04	32,035	122,6	232,18	32,19	127,5	232,24	32,24	125,7
232,42	32,42	55,05	232,07	32,07	123,7	232,23	32,225	123,7	232,32	32,33	128,7	232,24	32,24	125,7
232,42	32,42	55,05	232,21	32,21	124,5	232,37	32,365	124,5	232,51	32,52	129,9	232,38	32,38	126,8
232,57	32,57	55,55	232,41	32,41	125,7	232,56	32,555	125,7	232,51	32,52	129,9	232,58	32,58	128
232,76	32,76	56,25	232,6	32,6	126,9	232,56	32,555	125,7	232,71	32,71	131,1	232,77	32,77	129,3
232,76	32,76	56,25	232,6	32,6	126,9	232,71	32,705	126,5	232,85	32,86	131,9	232,77	32,77	129,3
232,95	32,95	56,95	232,74	32,74	127,7	232,9	32,895	127,7	232,85	32,86	131,9	232,91	32,91	130,1
233,09	33,09	57,45	232,93	32,93	128,9	232,9	32,895	127,7	233,04	33,05	133,1	233,11	33,11	131,3
233,28	33,28	58,15	232,93	32,93	128,9	233,09	33,085	128,8	233,23	33,24	134,3	233,11	33,11	131,3
233,28	33,28	58,15	233,12	33,12	130,1	233,23	33,23	130	233,38	33,38	135,1	233,25	33,25	132,1

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
233,48	33,48	58,9	233,27	33,27	130,9	233,42	33,42	131,2	233,38	33,38	135,1	233,44	33,44	133,3
233,62	33,62	59,6	233,46	33,46	132,1	233,42	33,42	131,2	233,57	33,57	136,4	233,44	33,44	133,3
233,81	33,81	60,35	233,46	33,46	132,1	233,61	33,61	132,4	233,76	33,77	137,6	233,63	33,63	134,5
233,81	33,81	60,35	233,65	33,65	133,3	233,76	33,755	133,2	233,76	33,77	137,6	233,77	33,77	135,3
234	34	61,15	233,79	33,79	134,5	233,76	33,755	133,2	233,91	33,91	138,4	233,96	33,96	136,5
234,14	34,14	61,65	233,79	33,79	134,5	233,95	33,95	134,5	234,1	34,1	139,6	233,96	33,96	136,5
234,14	34,14	61,65	233,98	33,98	135,7	234,14	34,14	135,7	234,29	34,29	140,9	234,16	34,16	137,8
234,33	34,33	62,4	234,17	34,17	136,9	234,14	34,14	135,7	234,29	34,29	140,9	234,3	34,3	139
234,53	34,53	63,2	234,32	34,32	137,8	234,28	34,28	136,5	234,43	34,43	142,1	234,49	34,49	140,2
234,67	34,67	63,75	234,32	34,32	137,8	234,47	34,47	137,8	234,62	34,63	143,3	234,49	34,49	140,2
234,67	34,67	63,75	234,51	34,51	139	234,67	34,665	139	234,77	34,77	144,2	234,68	34,68	141,5
234,86	34,86	64,55	234,65	34,65	139,8	234,67	34,665	139	234,77	34,77	144,2	234,83	34,83	142,3
235,05	35,05	65,4	234,65	34,65	139,8	234,81	34,805	139,8	234,96	34,97	145,4	234,83	34,83	142,3
235,05	35,05	65,4	234,84	34,84	141,1	235	35	141,4	235,15	35,16	146,6	235,02	35,02	143,6
235,2	35,2	65,95	235,04	35,04	142,3	235,2	35,195	142,7	235,15	35,16	146,6	235,21	35,21	144,8
235,39	35,39	66,8	235,18	35,18	143,1	235,2	35,195	142,7	235,35	35,35	147,9	235,36	35,36	145,6
235,53	35,53	67,6	235,18	35,18	143,1	235,34	35,335	143,5	235,49	35,49	148,7	235,36	35,36	145,6
235,53	35,53	67,6	235,37	35,37	144,4	235,53	35,525	144,7	235,49	35,49	148,7	235,55	35,55	146,9
235,72	35,72	68,45	235,56	35,56	145,6	235,53	35,525	144,7	235,67	35,68	149,9	235,73	35,73	148,1
235,91	35,91	69,35	235,56	35,56	145,6	235,72	35,715	146	235,86	35,87	151,1	235,73	35,73	148,1
235,91	35,91	69,35	235,7	35,7	146,8	235,86	35,855	146,8	236,01	36,01	152	235,87	35,87	148,9
236,05	36,05	69,9	235,89	35,89	148,1	236,05	36,045	148	236,01	36,01	152	236,07	36,07	150,2
236,25	36,25	70,8	236,08	36,08	149,3	236,05	36,045	148	236,2	36,21	153,2	236,26	36,26	151,5

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
236,25	36,25	70,8	236,08	36,08	149,3	236,25	36,245	149,3	236,4	36,4	154,5	236,26	36,26	151,5
236,44	36,44	71,65	236,23	36,23	150,2	236,39	36,385	150,1	236,4	36,4	154,5	236,41	36,41	152,7
236,63	36,63	72,6	236,43	36,43	151,5	236,39	36,385	150,1	236,54	36,54	155,7	236,6	36,6	154
236,82	36,82	73,5	236,43	36,43	151,5	236,58	36,58	151,4	236,73	36,74	157	236,6	36,6	154
236,82	36,82	73,5	236,62	36,62	152,7	236,78	36,775	152,7	236,93	36,93	158,2	236,79	36,79	155,3
236,96	36,96	74,15	236,76	36,76	153,6	236,92	36,915	153,9	236,93	36,93	158,2	236,94	36,94	156,1
237,16	37,16	75,05	236,76	36,76	153,6	236,92	36,915	153,9	237,07	37,08	159,1	237,13	37,13	157,4
237,16	37,16	75,05	236,95	36,95	154,8	237,11	37,105	155,2	237,27	37,27	160,3	237,13	37,13	157,4
237,3	37,3	75,7	237,14	37,14	156,1	237,3	37,295	156	237,27	37,27	160,3	237,32	37,32	158,7
237,49	37,49	76,65	237,29	37,29	157	237,45	37,445	157,3	237,46	37,46	161,6	237,47	37,47	159,5
237,68	37,68	77,65	237,48	37,48	158,2	237,45	37,445	157,3	237,6	37,6	162,5	237,47	37,47	159,5
237,68	37,68	77,65	237,48	37,48	158,2	237,59	37,585	158,1	237,79	37,79	163,7	237,66	37,66	160,8
237,83	37,83	78,6	237,62	37,62	159,5	237,78	37,775	159,4	237,79	37,79	163,7	237,85	37,85	162,1
238,02	38,02	79,6	237,81	37,81	160,8	237,78	37,775	159,4	237,93	37,94	164,6	237,99	37,99	162,9
238,02	38,02	79,6	237,81	37,81	160,8	237,97	37,97	160,7	238,13	38,13	165,9	237,99	37,99	162,9
238,21	38,21	80,6	238	38	162,1	238,12	38,115	161,5	238,13	38,13	165,9	238,18	38,18	164,2
238,35	38,35	81,25	238,19	38,19	163,4	238,12	38,115	161,5	238,32	38,33	167,2	238,33	38,33	165,5
238,54	38,54	82,3	238,19	38,19	163,4	238,31	38,305	162,8	238,46	38,47	168,5	238,33	38,33	165,5
238,54	38,54	82,3	238,34	38,34	164,2	238,5	38,5	164,1	238,65	38,66	169,7	238,52	38,52	166,8
238,74	38,74	83,35	238,53	38,53	165,5	238,64	38,64	164,9	238,65	38,66	169,7	238,71	38,71	168,1
238,88	38,88	84,05	238,72	38,72	166,8	238,64	38,64	164,9	238,84	38,85	171	238,85	38,85	169
238,88	38,88	84,05	238,72	38,72	166,8	238,83	38,83	166,6	238,99	38,99	171,9	238,85	38,85	169
239,07	39,07	85,1	238,86	38,86	167,7	239,02	39,02	167,4	238,99	38,99	171,9	239,05	39,05	170,2

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
239,26	39,26	86,2	239,06	39,06	169	239,17	39,165	168,7	239,18	39,18	173,2	239,23	39,23	171,5
239,4	39,4	86,9	239,06	39,06	169	239,17	39,165	168,7	239,37	39,38	174,5	239,23	39,23	171,5
239,4	39,4	86,9	239,2	39,2	169,8	239,36	39,355	170	239,51	39,52	175,3	239,38	39,38	172,4
239,59	39,59	88	239,39	39,39	171,1	239,55	39,55	171,2	239,51	39,52	175,3	239,57	39,57	173,7
239,59	39,59	88	239,58	39,58	172,4	239,55	39,55	171,2	239,71	39,71	176,6	239,77	39,77	174,9
239,79	39,79	89,15	239,58	39,58	172,4	239,74	39,74	172,5	239,9	39,9	177,9	239,77	39,77	174,9
239,98	39,98	90,25	239,73	39,73	173,7	239,89	39,885	173,3	239,9	39,9	177,9	239,91	39,91	175,8
240,12	40,12	91,4	239,92	39,92	175	239,89	39,885	173,3	240,04	40,05	178,7	240,1	40,1	177,1
240,12	40,12	91,4	239,92	39,92	175	240,08	40,08	174,6	240,23	40,24	180	240,1	40,1	177,1
240,31	40,31	92,55	240,11	40,11	176,3	240,27	40,27	175,8	240,38	40,39	181,3	240,29	40,29	178,4
240,5	40,5	93,7	240,25	40,25	177,1	240,42	40,415	176,6	240,38	40,39	181,3	240,43	40,43	179,7
240,64	40,64	94,5	240,44	40,44	178,4	240,42	40,415	176,6	240,57	40,57	182,5	240,63	40,63	180,9
240,64	40,64	94,5	240,44	40,44	178,4	240,61	40,605	177,9	240,76	40,76	183,8	240,63	40,63	180,9
240,83	40,83	95,65	240,63	40,63	179,7	240,79	40,79	179,1	240,76	40,76	183,8	240,82	40,82	182,2
241,03	41,03	96,85	240,78	40,78	180,6	240,79	40,79	179,1	240,9	40,9	184,6	240,96	40,96	183
241,03	41,03	96,85	240,78	40,78	180,6	240,93	40,93	180	241,09	41,09	185,9	240,96	40,96	183
241,17	41,17	97,7	240,97	40,97	181,8	241,13	41,125	181,6	241,28	41,29	187,2	241,15	41,15	184,3
241,36	41,36	98,9	241,16	41,16	183,1	241,32	41,315	182,5	241,28	41,29	187,2	241,29	41,29	185,2
241,51	41,51	99,75	241,3	41,3	184	241,32	41,315	182,5	241,43	41,44	188	241,49	41,49	186,4
241,51	41,51	99,75	241,3	41,3	184	241,46	41,46	183,7	241,63	41,63	189,3	241,49	41,49	186,4
241,7	41,7	101	241,5	41,5	185,3	241,66	41,66	184,9	241,63	41,63	189,3	241,68	41,68	187,7
241,89	41,89	102,3	241,69	41,69	186,5	241,66	41,66	184,9	241,82	41,82	190,5	241,88	41,88	188,9
241,89	41,89	102,3	241,69	41,69	186,5	241,8	41,8	185,7	241,96	41,97	191,4	241,88	41,88	188,9

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
242,04	42,04	103,5	241,83	41,83	187,8	242	41,995	187	242,16	42,16	192,7	242,02	42,02	189,8
242,23	42,23	104,8	242,02	42,02	189,1	242,19	42,185	188,2	242,16	42,16	192,7	242,21	42,21	191
242,42	42,42	106,2	242,17	42,17	189,9	242,19	42,185	188,2	242,35	42,35	193,9	242,4	42,4	192,3
242,42	42,42	106,2	242,17	42,17	189,9	242,33	42,325	189,1	242,54	42,54	195,2	242,4	42,4	192,3
242,56	42,56	107,1	242,36	42,36	191,2	242,52	42,515	190,3	242,54	42,54	195,2	242,54	42,54	193,5
242,75	42,75	108,4	242,55	42,55	192,4	242,52	42,515	190,3	242,68	42,69	196,4	242,74	42,74	194,8
242,75	42,75	108,4	242,55	42,55	192,4	242,71	42,71	191,6	242,87	42,88	197,7	242,74	42,74	194,8
242,94	42,94	109,8	242,7	42,7	193,3	242,86	42,855	192,4	242,87	42,88	197,7	242,88	42,88	195,6
243,09	43,09	110,7	242,89	42,89	194,5	243,05	43,05	194,1	243,02	43,02	198,5	243,08	43,08	196,9
243,28	43,28	112,1	243,08	43,08	195,7	243,05	43,05	194,1	243,21	43,22	199,8	243,27	43,27	198,1
243,28	43,28	112,1	243,08	43,08	195,7	243,24	43,24	194,9	243,4	43,41	201	243,27	43,27	198,1
243,47	43,47	113,5	243,22	43,22	196,6	243,38	43,38	196,1	243,4	43,41	201	243,46	43,46	199,4
243,61	43,61	114,4	243,46	43,46	198,2	243,38	43,38	196,1	243,55	43,55	201,8	243,46	43,46	199,4
243,61	43,61	114,4	243,46	43,46	198,2	243,58	43,575	197,4	243,74	43,75	203,1	243,65	43,65	200,6
243,8	43,8	115,8	243,6	43,6	199	243,77	43,765	198,6	243,93	43,94	204,3	243,84	43,84	201,8
243,99	43,99	117,3	243,79	43,79	200,2	243,91	43,91	199,4	243,93	43,94	204,3	243,98	43,98	202,7
244,14	44,14	118,7	243,79	43,79	200,2	243,91	43,91	199,4	244,07	44,08	205,2	243,98	43,98	202,7
244,14	44,14	118,7	243,94	43,94	201,5	244,1	44,1	200,6	244,26	44,27	206,4	244,17	44,17	203,9
244,33	44,33	120,2	244,13	44,13	202,7	244,29	44,29	201,9	244,26	44,27	206,4	244,37	44,37	205,1
244,47	44,47	121,2	244,32	44,32	203,9	244,29	44,29	201,9	244,45	44,46	207,7	244,37	44,37	205,1
244,47	44,47	121,2	244,32	44,32	203,9	244,44	44,435	202,7	244,6	44,6	208,9	244,51	44,51	205,9
244,66	44,66	122,7	244,46	44,46	204,7	244,63	44,625	203,9	244,79	44,8	210,1	244,7	44,7	207,1
244,86	44,86	124,2	244,66	44,66	205,9	244,78	44,775	204,7	244,79	44,8	210,1	244,7	44,7	207,1

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
245	45	125,2	244,66	44,66	205,9	244,78	44,775	204,7	244,99	44,99	211,3	244,9	44,9	208,3
245	45	125,2	244,85	44,85	207,1	244,97	44,965	205,9	245,13	45,14	212,1	245,04	45,04	209,6
245,2	45,2	126,7	245	45	207,9	245,16	45,155	207,1	245,13	45,14	212,1	245,23	45,23	210,8
245,39	45,39	128,3	245,19	45,19	209,1	245,16	45,155	207,1	245,32	45,33	213,4	245,23	45,23	210,8
245,39	45,39	128,3	245,19	45,19	209,1	245,3	45,3	208,3	245,46	45,47	214,2	245,42	45,42	212
245,53	45,53	129,4	245,38	45,38	210,3	245,49	45,49	209,4	245,65	45,66	215,4	245,57	45,57	212,8
245,71	45,71	131	245,52	45,52	211	245,68	45,675	210,6	245,65	45,66	215,4	245,76	45,76	214
245,9	45,9	132,6	245,52	45,52	211	245,68	45,675	210,6	245,84	45,85	216,6	245,76	45,76	214
245,9	45,9	132,6	245,71	45,71	212,2	245,83	45,825	211,4	245,99	45,99	217,4	245,95	45,95	215,2
246,05	46,05	134,2	245,9	45,9	213,4	246,02	46,015	212,6	245,99	45,99	217,4	246,09	46,09	216
246,24	46,24	135,8	246,04	46,04	214,6	246,02	46,015	212,6	246,18	46,19	218,5	246,09	46,09	216
246,24	46,24	135,8	246,04	46,04	214,6	246,21	46,205	213,8	246,38	46,38	219,7	246,28	46,28	217,1
246,44	46,44	137,4	246,23	46,23	215,7	246,35	46,35	214,5	246,52	46,52	220,9	246,43	46,43	217,9
246,58	46,58	138,6	246,38	46,38	216,5	246,55	46,545	215,7	246,52	46,52	220,9	246,62	46,62	219,1
246,77	46,77	140,3	246,38	46,38	216,5	246,55	46,545	215,7	246,71	46,72	222,1	246,62	46,62	219,1
246,77	46,77	140,3	246,57	46,57	217,6	246,74	46,735	216,9	246,9	46,91	223,3	246,82	46,82	220,2
246,91	46,91	141,4	246,76	46,76	218,8	246,88	46,88	218	246,9	46,91	223,3	246,96	46,96	221,4
247,1	47,1	143,1	246,91	46,91	219,5	246,88	46,88	218	247,05	47,06	224	246,96	46,96	221,4
247,1	47,1	143,1	246,91	46,91	219,5	247,08	47,075	219,2	247,24	47,25	225,2	247,15	47,15	222,6
247,29	47,29	144,8	247,1	47,1	220,7	247,22	47,215	220	247,44	47,44	226,4	247,34	47,34	223,7
247,44	47,44	146	247,29	47,29	221,8	247,41	47,405	221,1	247,44	47,44	226,4	247,49	47,49	224,5
247,63	47,63	147,8	247,29	47,29	221,8	247,41	47,405	221,1	247,58	47,58	227,2	247,49	47,49	224,5
247,63	47,63	147,8	247,43	47,43	222,6	247,6	47,6	222,3	247,77	47,77	228,3	247,68	47,68	225,6

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
247,82	47,82	149,6	247,62	47,62	223,7	247,74	47,74	223	247,77	47,77	228,3	247,87	47,87	226,8
247,96	47,96	151,4	247,82	47,82	224,8	247,74	47,74	223	247,96	47,97	229,5	247,87	47,87	226,8
247,96	47,96	151,4	247,82	47,82	224,8	247,93	47,93	224,1	248,11	48,11	230,2	248,01	48,01	227,5
248,16	48,16	153,2	247,96	47,96	225,9	248,13	48,125	225,3	248,3	48,31	231,4	248,21	48,21	228,7
248,35	48,35	155	248,15	48,15	227,1	248,27	48,27	226	248,3	48,31	231,4	248,21	48,21	228,7
248,49	48,49	156,2	248,15	48,15	227,1	248,27	48,27	226	248,44	48,45	232,5	248,4	48,4	229,8
248,49	48,49	156,2	248,34	48,34	228,2	248,47	48,465	227,2	248,63	48,64	233,7	248,54	48,54	230,5
248,69	48,69	158,1	248,49	48,49	228,9	248,66	48,655	228,3	248,63	48,64	233,7	248,74	48,74	231,6
248,88	48,88	160	248,68	48,68	230	248,66	48,655	228,3	248,83	48,83	234,8	248,74	48,74	231,6
248,88	48,88	160	248,68	48,68	230	248,8	48,795	229,1	248,97	48,97	235,5	248,93	48,93	232,7
249,02	49,02	161,2	248,87	48,87	231	248,99	48,985	230,2	249,16	49,17	236,6	249,07	49,07	233,9
249,21	49,21	163,1	249,01	49,01	231,7	249,18	49,175	231,6	249,16	49,17	236,6	249,07	49,07	233,9
249,4	49,4	165,1	249,01	49,01	231,7	249,18	49,175	231,6	249,35	49,36	237,7	249,26	49,26	235
249,4	49,4	165,1	249,2	49,2	232,8	249,33	49,325	232,4	249,5	49,5	238,4	249,45	49,45	236,1
249,55	49,55	166,3	249,35	49,35	233,5	249,52	49,515	233,4	249,5	49,5	238,4	249,45	49,45	236,1
249,74	49,74	168,3	249,54	49,54	234,6	249,52	49,515	233,4	249,69	49,69	239,5	249,59	49,59	236,8
249,74	49,74	168,3	249,54	49,54	234,6	249,71	49,705	234,5	249,88	49,89	240,6	249,79	49,79	237,9
249,88	49,88	170,2	249,73	49,73	235,7	249,85	49,85	235,2	250,02	50,03	241,4	249,98	49,98	239
250,07	50,07	172,2	249,88	49,88	236,7	250,04	50,04	236,3	250,02	50,03	241,4	249,98	49,98	239
250,26	50,26	174,2	249,88	49,88	236,7	250,04	50,04	236,3	250,22	50,22	242,5	250,13	50,13	239,7
250,26	50,26	174,2	250,07	50,07	237,8	250,19	50,19	237	250,41	50,42	243,5	250,32	50,32	240,8
250,41	50,41	175,5	250,26	50,26	238,8	250,38	50,38	238,1	250,41	50,42	243,5	250,51	50,51	241,9
250,6	50,6	177,5	250,41	50,41	239,5	250,38	50,38	238,1	250,55	50,56	244,6	250,51	50,51	241,9

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
250,6	50,6	177,5	250,41	50,41	239,5	250,57	50,57	239,1	250,74	50,75	245,6	250,65	50,65	242,6
250,79	50,79	179,5	250,59	50,59	240,5	250,71	50,71	240,2	250,88	50,89	246,3	250,84	50,84	243,6
250,93	50,93	180,8	250,78	50,78	241,5	250,9	50,9	241,2	250,88	50,89	246,3	250,84	50,84	243,6
251,12	51,12	182,8	250,78	50,78	241,5	250,9	50,9	241,2	251,07	51,08	247,4	250,98	50,98	244,7
251,12	51,12	182,8	250,92	50,92	242,2	251,09	51,09	242,3	251,27	51,27	248,4	251,17	51,17	245,7
251,36	51,36	185,5	251,11	51,11	243,3	251,24	51,24	242,9	251,27	51,27	248,4	251,37	51,37	246,8
251,36	51,36	185,5	251,31	51,31	244,3	251,24	51,24	242,9	251,42	51,42	249,1	251,37	51,37	246,8
251,51	51,51	186,8	251,31	51,31	244,3	251,43	51,43	244	251,61	51,61	250,1	251,51	51,51	247,5
251,7	51,7	188,8	251,46	51,46	245	251,63	51,625	245	251,61	51,61	250,1	251,71	51,71	248,5
251,89	51,89	190,9	251,65	51,65	246	251,77	51,765	245,6	251,8	51,81	251,1	251,71	51,71	248,5
251,89	51,89	190,9	251,65	51,65	246	251,77	51,765	245,6	251,95	51,95	251,8	251,9	51,9	249,5
252,03	52,03	192,2	251,84	51,84	246,9	251,96	51,96	246,6	252,14	52,14	252,8	252,05	52,05	250,2
252,22	52,22	194,3	251,98	51,98	247,9	252,15	52,15	247,6	252,14	52,14	252,8	252,24	52,24	251,3
252,22	52,22	194,3	252,17	52,17	248,9	252,15	52,15	247,6	252,33	52,34	253,8	252,24	52,24	251,3
252,41	52,41	196,4	252,17	52,17	248,9	252,3	52,295	248,3	252,48	52,48	254,8	252,43	52,43	252,2
252,56	52,56	198,5	252,31	52,31	249,6	252,49	52,49	249,3	252,67	52,67	255,8	252,57	52,57	252,9
252,75	52,75	200,6	252,51	52,51	250,6	252,49	52,49	249,3	252,67	52,67	255,8	252,57	52,57	252,9
252,75	52,75	200,6	252,51	52,51	250,6	252,63	52,63	250,3	252,86	52,87	256,8	252,76	52,76	253,9
252,94	52,94	202,7	252,7	52,7	251,5	252,82	52,82	251	253	53,01	257,4	252,96	52,96	254,9
253,09	53,09	204,1	252,84	52,84	252,2	253,02	53,015	251,9	253	53,01	257,4	253,1	53,1	255,8
253,09	53,09	204,1	253,04	53,04	253,1	253,02	53,015	251,9	253,2	53,2	258,4	253,1	53,1	255,8
253,28	53,28	206,2	253,04	53,04	253,1	253,16	53,155	252,9	253,39	53,39	259,4	253,3	53,3	256,8
253,42	53,42	207,7	253,23	53,23	254,1	253,35	53,35	253,9	253,54	53,54	260	253,44	53,44	257,5

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
253,61	53,61	209,8	253,37	53,37	254,7	253,54	53,54	254,8	253,54	53,54	260	253,44	53,44	257,5
253,61	53,61	209,8	253,37	53,37	254,7	253,54	53,54	254,8	253,73	53,73	261	253,63	53,63	258,5
253,8	53,8	211,9	253,56	53,56	255,7	253,69	53,685	255,5	253,87	53,87	261,6	253,82	53,82	259,4
253,95	53,95	213,3	253,75	53,75	256,6	253,88	53,875	256,4	253,87	53,87	261,6	253,96	53,96	260,1
253,95	53,95	213,3	253,9	53,9	257,5	253,88	53,875	256,4	254,06	54,06	262,5	253,96	53,96	260,1
254,14	54,14	215,5	253,9	53,9	257,5	254,07	54,065	257,3	254,25	54,26	263,5	254,16	54,16	261
254,33	54,33	217,6	254,09	54,09	258,5	254,21	54,21	258	254,39	54,4	264,4	254,35	54,35	261,9
254,47	54,47	219,8	254,28	54,28	259,4	254,4	54,4	258,9	254,39	54,4	264,4	254,35	54,35	261,9
254,47	54,47	219,8	254,28	54,28	259,4	254,4	54,4	258,9	254,58	54,59	265,3	254,49	54,49	262,6
254,66	54,66	222	254,42	54,42	260	254,59	54,59	259,8	254,78	54,79	266,2	254,68	54,68	263,5
254,86	54,86	224,3	254,61	54,61	260,9	254,74	54,74	260,7	254,78	54,79	266,2	254,88	54,88	264,4
254,86	54,86	224,3	254,76	54,76	261,5	254,74	54,74	260,7	254,93	54,93	266,8	254,88	54,88	264,4
255	55	225,8	254,76	54,76	261,5	254,94	54,935	261,6	255,12	55,12	267,7	255,07	55,07	265,3
255,19	55,19	228,1	254,95	54,95	262,4	255,13	55,125	262,5	255,31	55,32	268,6	255,07	55,07	265,3
255,38	55,38	230,4	255,15	55,15	263,3	255,27	55,265	263,1	255,31	55,32	268,6	255,26	55,26	266,2
255,38	55,38	230,4	255,15	55,15	263,3	255,27	55,265	263,1	255,45	55,46	269,2	255,45	55,45	267,1
255,52	55,52	231,9	255,29	55,29	263,9	255,46	55,455	264	255,64	55,65	270,1	255,6	55,6	267,9
255,71	55,71	234,2	255,48	55,48	264,8	255,6	55,6	264,5	255,64	55,65	270,1	255,6	55,6	267,9
255,71	55,71	234,2	255,66	55,66	265,6	255,6	55,6	264,5	255,83	55,84	270,9	255,78	55,78	268,8
255,9	55,9	236,5	255,66	55,66	265,6	255,79	55,79	265,4	255,98	55,98	271,5	255,97	55,97	269,7
256,04	56,04	238	255,81	55,81	266,5	255,98	55,98	266,2	256,17	56,17	272,3	255,97	55,97	269,7
256,24	56,24	240,3	256	56	267,3	256,12	56,12	266,8	256,17	56,17	272,3	256,12	56,12	270,3
256,24	56,24	240,3	256	56	267,3	256,12	56,12	266,8	256,36	56,37	273,1	256,31	56,31	271,1

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
256,38	56,38	242,6	256,19	56,19	268,2	256,32	56,315	267,7	256,51	56,51	274	256,5	56,5	272
256,58	56,58	245	256,33	56,33	268,7	256,51	56,51	268,5	256,51	56,51	274	256,5	56,5	272
256,58	56,58	245	256,53	56,53	269,6	256,51	56,51	268,5	256,7	56,7	274,8	256,65	56,65	272,5
256,77	56,77	247,3	256,53	56,53	269,6	256,66	56,655	269,3	256,85	56,85	275,3	256,84	56,84	273,4
256,91	56,91	248,8	256,72	56,72	270,4	256,85	56,85	270,2	257,04	57,05	276,2	256,84	56,84	273,4
257,1	57,1	251,1	256,87	56,87	270,9	257,04	57,04	271	257,04	57,05	276,2	256,99	56,99	273,9
257,1	57,1	251,1	256,87	56,87	270,9	257,04	57,04	271	257,23	57,24	277	257,18	57,18	274,8
257,29	57,29	253,4	257,06	57,06	271,8	257,23	57,23	271,6	257,37	57,38	277,5	257,37	57,37	275,6
257,44	57,44	255	257,25	57,25	272,6	257,38	57,375	272,4	257,37	57,38	277,5	257,37	57,37	275,6
257,44	57,44	255	257,39	57,39	273,1	257,38	57,375	272,4	257,57	57,57	278,3	257,51	57,51	276,4
257,63	57,63	257,3	257,39	57,39	273,1	257,57	57,565	273,2	257,76	57,76	279,1	257,71	57,71	277,2
257,82	57,82	259,5	257,58	57,58	273,9	257,71	57,705	273,7	257,9	57,91	279,6	257,71	57,71	277,2
257,96	57,96	261	257,77	57,77	274,7	257,91	57,905	274,5	257,9	57,91	279,6	257,9	57,9	278
257,96	57,96	261	257,77	57,77	274,7	257,91	57,905	274,5	258,1	58,1	280,4	258,04	58,04	278,6
258,15	58,15	263,2	257,92	57,92	275,5	258,1	58,095	275,3	258,29	58,29	281,2	258,24	58,24	279,4
258,34	58,34	265,4	258,11	58,11	276,3	258,24	58,24	275,8	258,29	58,29	281,2	258,24	58,24	279,4
258,34	58,34	265,4	258,25	58,25	276,8	258,24	58,24	275,8	258,43	58,44	282	258,43	58,43	280,1
258,49	58,49	267,6	258,25	58,25	276,8	258,43	58,43	276,6	258,62	58,63	282,8	258,57	58,57	280,7
258,68	58,68	269,8	258,45	58,45	277,5	258,62	58,62	277,4	258,82	58,82	283,5	258,57	58,57	280,7
258,82	58,82	271,2	258,64	58,64	278,3	258,77	58,765	277,9	258,82	58,82	283,5	258,76	58,76	281,5
258,82	58,82	271,2	258,64	58,64	278,3	258,77	58,765	277,9	258,96	58,96	284	258,96	58,96	282,2
259,01	59,01	273,3	258,78	58,78	278,8	258,96	58,955	278,7	259,15	59,16	284,8	259,1	59,1	282,7
259,2	59,2	275,4	258,97	58,97	279,6	259,15	59,15	279,7	259,15	59,16	284,8	259,1	59,1	282,7

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
259,2	59,2	275,4	259,16	59,16	280,3	259,15	59,15	279,7	259,34	59,35	285,6	259,29	59,29	283,5
259,35	59,35	276,8	259,16	59,16	280,3	259,29	59,29	280,2	259,54	59,54	286,3	259,48	59,48	284,2
259,54	59,54	278,8	259,3	59,3	280,8	259,48	59,48	280,9	259,54	59,54	286,3	259,48	59,48	284,2
259,74	59,74	280,7	259,5	59,5	281,6	259,68	59,675	281,7	259,68	59,68	286,8	259,63	59,63	285
259,74	59,74	280,7	259,5	59,5	281,6	259,68	59,675	281,7	259,87	59,87	287,5	259,82	59,82	285,7
259,88	59,88	282	259,69	59,69	282,3	259,82	59,815	282,1	260,06	60,07	288,3	259,96	59,96	286,2
260,07	60,07	283,9	259,83	59,83	282,9	260,01	60,01	282,9	260,06	60,07	288,3	259,96	59,96	286,2
260,07	60,07	283,9	260,02	60,02	283,7	260,01	60,01	282,9	260,21	60,21	288,7	260,16	60,16	286,9
260,26	60,26	285,7	260,02	60,02	283,7	260,21	60,205	283,6	260,4	60,41	289,5	260,35	60,35	287,7
260,41	60,41	287,5	260,22	60,22	284,4	260,35	60,35	284,1	260,4	60,41	289,5	260,35	60,35	287,7
260,59	60,59	289,3	260,36	60,36	284,9	260,54	60,535	284,8	260,59	60,6	290,2	260,49	60,49	288,1
260,59	60,59	289,3	260,36	60,36	284,9	260,54	60,535	284,8	260,73	60,74	290,9	260,68	60,68	288,8
260,78	60,78	291	260,55	60,55	285,6	260,68	60,675	285,5	260,92	60,93	291,5	260,68	60,68	288,8
260,92	60,92	292	260,69	60,69	286	260,87	60,865	286,2	260,92	60,93	291,5	260,87	60,87	289,5
260,92	60,92	292	260,69	60,69	286	260,87	60,865	286,2	261,11	61,12	292,2	261,02	61,02	290
261,12	61,12	293,6	260,88	60,88	286,7	261,06	61,055	286,8	261,26	61,26	292,7	261,21	61,21	290,7
261,31	61,31	295,1	261,07	61,07	287,4	261,21	61,205	287,3	261,26	61,26	292,7	261,21	61,21	290,7
261,46	61,46	296,1	261,22	61,22	287,8	261,4	61,4	288	261,46	61,46	293,4	261,4	61,4	291,4
261,46	61,46	296,1	261,22	61,22	287,8	261,4	61,4	288	261,65	61,66	294,1	261,55	61,55	292
261,65	61,65	297,5	261,41	61,41	288,5	261,59	61,59	288,7	261,79	61,8	294,5	261,74	61,74	292,7
261,84	61,84	298,9	261,61	61,61	289,2	261,74	61,735	289,1	261,79	61,8	294,5	261,74	61,74	292,7
261,84	61,84	298,9	261,75	61,75	289,9	261,74	61,735	289,1	261,99	61,99	295,2	261,93	61,93	293,3
261,98	61,98	299,7	261,75	61,75	289,9	261,93	61,925	289,8	262,13	62,14	295,6	262,08	62,08	293,8

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
262,17	62,17	301	261,94	61,94	290,6	262,12	62,12	290,4	262,13	62,14	295,6	262,08	62,08	293,8
262,36	62,36	302,2	262,13	62,13	291,2	262,27	62,265	290,8	262,32	62,33	296,3	262,27	62,27	294,5
262,36	62,36	302,2	262,13	62,13	291,2	262,27	62,265	290,8	262,51	62,52	297	262,41	62,41	294,9
262,5	62,5	303,4	262,28	62,28	291,7	262,46	62,455	291,5	262,66	62,67	297,6	262,6	62,6	295,6
262,7	62,7	304,5	262,47	62,47	292,3	262,65	62,645	292,1	262,66	62,67	297,6	262,6	62,6	295,6
262,7	62,7	304,5	262,66	62,66	293	262,65	62,645	292,1	262,85	62,86	298,3	262,8	62,8	296,2
262,84	62,84	305,2	262,66	62,66	293	262,79	62,79	292,7	263,04	63,05	298,9	262,94	62,94	296,6
263,03	63,03	306,2	262,8	62,8	293,4	262,98	62,98	293,4	263,04	63,05	298,9	262,94	62,94	296,6
263,23	63,23	307,2	262,99	62,99	294	263,13	63,125	293,8	263,19	63,19	299,3	263,13	63,13	297,3
263,23	63,23	307,2	262,99	62,99	294	263,13	63,125	293,8	263,43	63,43	300,2	263,33	63,33	297,9
263,37	63,37	307,8	263,18	63,18	294,7	263,37	63,365	294,4	263,43	63,43	300,2	263,33	63,33	297,9
263,56	63,56	308,7	263,33	63,33	295,1	263,51	63,51	295,1	263,57	63,58	300,6	263,47	63,47	298,5
263,56	63,56	308,7	263,52	63,52	295,7	263,51	63,51	295,1	263,77	63,77	301,3	263,66	63,66	299,2
263,75	63,75	309,6	263,52	63,52	295,7	263,71	63,705	295,7	263,91	63,92	301,7	263,85	63,85	299,8
263,9	63,9	310,1	263,66	63,66	296,4	263,9	63,895	296,3	263,91	63,92	301,7	263,85	63,85	299,8
264,09	64,09	310,9	263,85	63,85	297	263,9	63,895	296,3	264,1	64,11	302,3	264	64	300,2
264,09	64,09	310,9	263,85	63,85	297	264,04	64,035	296,7	264,29	64,3	302,9	264,19	64,19	300,8
264,28	64,28	311,7	264,04	64,04	297,6	264,23	64,225	297,3	264,29	64,3	302,9	264,38	64,38	301,4
264,42	64,42	312,4	264,19	64,19	298	264,42	64,415	297,9	264,43	64,44	303,3	264,38	64,38	301,4
264,42	64,42	312,4	264,38	64,38	298,6	264,42	64,415	297,9	264,63	64,63	303,9	264,52	64,52	301,8
264,61	64,61	313	264,38	64,38	298,6	264,57	64,565	298,3	264,82	64,83	304,5	264,72	64,72	302,4
264,8	64,8	313,7	264,57	64,57	299,1	264,76	64,76	298,9	264,82	64,83	304,5	264,72	64,72	302,4
264,95	64,95	314,1	264,72	64,72	299,5	264,76	64,76	298,9	264,97	64,97	305,1	264,91	64,91	302,9

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
264,95	64,95	314,1	264,72	64,72	299,5	264,9	64,9	299,4	265,16	65,17	305,7	265,05	65,05	303,3
265,14	65,14	314,7	264,91	64,91	300,1	265,1	65,095	299,8	265,16	65,17	305,7	265,25	65,25	303,9
265,33	65,33	315,2	265,1	65,1	300,7	265,29	65,285	300,4	265,35	65,36	306,3	265,25	65,25	303,9
265,33	65,33	315,2	265,24	65,24	301	265,29	65,285	300,4	265,5	65,5	306,6	265,39	65,39	304,5
265,47	65,47	315,6	265,24	65,24	301	265,43	65,425	300,9	265,68	65,69	307,2	265,58	65,58	305
265,66	65,66	316,1	265,43	65,43	301,6	265,62	65,62	301,5	265,68	65,69	307,2	265,58	65,58	305
265,81	65,81	316,4	265,63	65,63	302,1	265,62	65,62	301,5	265,87	65,88	307,8	265,77	65,77	305,6
265,81	65,81	316,4	265,63	65,63	302,1	265,81	65,81	302	266,02	66,02	308,2	265,91	65,91	306
266	66	316,9	265,81	65,81	302,7	265,95	65,95	302,4	266,02	66,02	308,2	266,1	66,1	306,5
266,19	66,19	317,4	265,96	65,96	303,2	266,14	66,14	302,9	266,21	66,22	308,7	266,1	66,1	306,5
266,19	66,19	317,4	265,96	65,96	303,2	266,14	66,14	302,9	266,41	66,41	309,2	266,3	66,3	307,1
266,33	66,33	317,9	266,15	66,15	303,8	266,34	66,335	303,4	266,55	66,56	309,6	266,45	66,45	307,5
266,53	66,53	318,3	266,34	66,34	304,3	266,48	66,48	303,8	266,55	66,56	309,6	266,45	66,45	307,5
266,72	66,72	318,8	266,48	66,48	304,7	266,48	66,48	303,8	266,74	66,75	310,1	266,64	66,64	308
266,72	66,72	318,8	266,48	66,48	304,7	266,67	66,67	304,3	266,89	66,89	310,7	266,83	66,83	308,6
266,86	66,86	319,1	266,68	66,68	305,2	266,87	66,87	304,9	266,89	66,89	310,7	266,98	66,98	308,9
267,05	67,05	319,5	266,87	66,87	305,7	267,01	67,01	305,2	267,08	67,09	311,2	266,98	66,98	308,9
267,05	67,05	319,5	266,87	66,87	305,7	267,01	67,01	305,2	267,28	67,28	311,8	267,17	67,17	309,5
267,24	67,24	319,9	267,02	67,02	306,1	267,21	67,205	305,9	267,42	67,43	312,1	267,36	67,36	310
267,39	67,39	320,2	267,21	67,21	306,6	267,39	67,39	306,3	267,42	67,43	312,1	267,36	67,36	310
267,58	67,58	320,6	267,4	67,4	307,1	267,39	67,39	306,3	267,61	67,62	312,6	267,5	67,5	310,5
267,58	67,58	320,6	267,4	67,4	307,1	267,54	67,535	306,8	267,8	67,81	313,1	267,7	67,7	311,1
267,77	67,77	321	267,54	67,54	307,5	267,73	67,725	307,3	267,8	67,81	313,1	267,89	67,89	311,6

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
267,77	67,77	321	267,73	67,73	308	267,88	67,875	307,6	267,95	67,95	313,5	267,89	67,89	311,6
267,96	67,96	321,4	267,73	67,73	308	267,88	67,875	307,6	268,14	68,14	314	268,03	68,03	312
268,15	68,15	321,7	267,88	67,88	308,5	268,07	68,065	308,1	268,33	68,34	314,5	268,22	68,22	312,5
268,34	68,34	322,1	268,07	68,07	309	268,26	68,26	308,6	268,33	68,34	314,5	268,22	68,22	312,5
268,34	68,34	322,1	268,26	68,26	309,4	268,26	68,26	308,6	268,48	68,48	314,8	268,37	68,37	312,9
268,49	68,49	322,4	268,26	68,26	309,4	268,4	68,4	309	268,67	68,68	315,3	268,56	68,56	313,4
268,68	68,68	322,7	268,4	68,4	309,8	268,6	68,595	309,4	268,67	68,68	315,3	268,75	68,75	313,9
268,68	68,68	322,7	268,59	68,59	310,3	268,79	68,785	309,9	268,86	68,87	315,8	268,75	68,75	313,9
268,82	68,82	323	268,59	68,59	310,3	268,79	68,785	309,9	269,01	69,01	316,2	268,95	68,95	314,3
269,01	69,01	323,4	268,79	68,79	310,7	268,93	68,93	310,2	269,2	69,2	316,7	269,14	69,14	314,8
269,2	69,2	323,7	268,93	68,93	311,1	269,12	69,12	310,9	269,2	69,2	316,7	269,14	69,14	314,8
269,2	69,2	323,7	269,12	69,12	311,5	269,12	69,12	310,9	269,39	69,39	317,2	269,28	69,28	315,2
269,4	69,4	324	269,12	69,12	311,5	269,31	69,31	311,2	269,53	69,54	317,5	269,47	69,47	315,7
269,59	69,59	324,3	269,31	69,31	312	269,46	69,455	311,6	269,53	69,54	317,5	269,47	69,47	315,7
269,59	69,59	324,3	269,45	69,45	312,3	269,65	69,645	312,1	269,73	69,73	318	269,67	69,67	316,1
269,74	69,74	324,5	269,45	69,45	312,3	269,65	69,645	312,1	269,87	69,88	318,2	269,81	69,81	316,6
269,93	69,93	324,8	269,65	69,65	312,7	269,84	69,84	312,5	270,06	70,07	318,7	270	70	317
269,93	69,93	324,8	269,84	69,84	313,2	269,99	69,985	312,8	270,06	70,07	318,7	270	70	317
270,07	70,07	325	269,99	69,99	313,6	269,99	69,985	312,8	270,26	70,26	319,1	270,2	70,2	317,5
270,26	70,26	325,4	269,99	69,99	313,6	270,18	70,18	313,2	270,41	70,41	319,4	270,34	70,34	317,8
270,45	70,45	325,7	270,18	70,18	314	270,37	70,37	313,7	270,41	70,41	319,4	270,34	70,34	317,8
270,45	70,45	325,7	270,37	70,37	314,4	270,51	70,51	313,9	270,6	70,6	319,8	270,53	70,53	318,2
270,6	70,6	325,8	270,37	70,37	314,4	270,51	70,51	313,9	270,78	70,79	320,2	270,72	70,72	318,6

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
270,78	70,78	326,1	270,51	70,51	314,7	270,7	70,7	314,3	270,92	70,93	320,7	270,86	70,86	318,9
270,78	70,78	326,1	270,7	70,7	315,1	270,89	70,89	314,7	270,92	70,93	320,7	270,86	70,86	318,9
270,97	70,97	326,4	270,84	70,84	315,4	270,89	70,89	314,7	271,12	71,12	321,1	271,05	71,05	319,3
271,12	71,12	326,7	270,84	70,84	315,4	271,04	71,035	315,1	271,31	71,32	321,5	271,2	71,2	319,6
271,31	71,31	327	271,03	71,03	315,8	271,23	71,23	315,6	271,31	71,32	321,5	271,2	71,2	319,6
271,31	71,31	327	271,23	71,23	316,3	271,43	71,425	315,9	271,46	71,46	321,7	271,4	71,4	320
271,5	71,5	327,3	271,23	71,23	316,3	271,43	71,425	315,9	271,65	71,66	322,1	271,59	71,59	320,4
271,65	71,65	327,5	271,37	71,37	316,5	271,57	71,565	316,2	271,85	71,85	322,5	271,73	71,73	320,8
271,65	71,65	327,5	271,56	71,56	316,9	271,76	71,755	316,6	271,85	71,85	322,5	271,73	71,73	320,8
271,84	71,84	327,8	271,76	71,76	317,3	271,76	71,755	316,6	271,99	71,99	322,8	271,92	71,92	321,2
272,03	72,03	328	271,76	71,76	317,3	271,95	71,95	317	272,18	72,19	323,2	272,12	72,12	321,6
272,17	72,17	328,2	271,9	71,9	317,7	272,1	72,095	317,3	272,18	72,19	323,2	272,12	72,12	321,6
272,17	72,17	328,2	272,09	72,09	318,1	272,29	72,29	317,7	272,33	72,33	323,5	272,27	72,27	321,8
272,36	72,36	328,5	272,09	72,09	318,1	272,29	72,29	317,7	272,52	72,52	323,9	272,46	72,46	322,2
272,55	72,55	328,7	272,28	72,28	318,5	272,43	72,43	317,9	272,71	72,71	324,3	272,65	72,65	322,6
272,55	72,55	328,7	272,43	72,43	318,8	272,62	72,62	318,3	272,71	72,71	324,3	272,65	72,65	322,6
272,7	72,7	328,9	272,62	72,62	319,2	272,62	72,62	318,3	272,86	72,86	324,5	272,79	72,79	322,9
272,89	72,89	329,2	272,62	72,62	319,2	272,82	72,815	318,7	273,05	73,05	325	272,98	72,98	323,3
273,04	73,04	329,4	272,81	72,81	319,6	272,96	72,955	318,9	273,05	73,05	325	272,98	72,98	323,3
273,04	73,04	329,4	272,95	72,95	319,9	273,15	73,15	319,3	273,24	73,25	325,4	273,17	73,17	323,7
273,23	73,23	329,7	272,95	72,95	319,9	273,15	73,15	319,3	273,38	73,39	325,6	273,32	73,32	324
273,42	73,42	330	273,14	73,14	320,3	273,34	73,34	319,8	273,58	73,58	326	273,51	73,51	324,4
273,42	73,42	330	273,33	73,33	320,7	273,49	73,485	320	273,58	73,58	326	273,51	73,51	324,4

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
273,56	73,56	330,2	273,48	73,48	320,9	273,49	73,485	320	273,77	73,77	326,4	273,71	73,71	324,7
273,75	73,75	330,4	273,48	73,48	320,9	273,68	73,68	320,4	273,92	73,92	326,6	273,85	73,85	325,1
273,95	73,95	330,7	273,67	73,67	321,3	273,87	73,87	320,7	273,92	73,92	326,6	273,85	73,85	325,1
273,95	73,95	330,7	273,81	73,81	321,6	274,01	74,01	321	274,11	74,11	327	274,04	74,04	325,4
274,09	74,09	330,9	273,81	73,81	321,6	274,01	74,01	321	274,3	74,3	327,4	274,23	74,23	325,8
274,28	74,28	331,1	274	74	322	274,2	74,2	321,3	274,44	74,44	327,6	274,38	74,38	326,1
274,28	74,28	331,1	274,19	74,19	322,3	274,39	74,39	321,7	274,44	74,44	327,6	274,38	74,38	326,1
274,47	74,47	331,4	274,34	74,34	322,6	274,39	74,39	321,7	274,63	74,64	328	274,57	74,57	326,4
274,66	74,66	331,6	274,34	74,34	322,6	274,54	74,54	321,9	274,83	74,83	328,4	274,71	74,71	326,7
274,66	74,66	331,6	274,53	74,53	322,9	274,74	74,735	322,2	274,83	74,83	328,4	274,71	74,71	326,7
274,81	74,81	331,8	274,72	74,72	323,2	274,88	74,875	322,6	274,97	74,98	328,7	274,91	74,91	327
275	75	332	274,72	74,72	323,2	274,88	74,875	322,6	275,17	75,17	329,1	275,1	75,1	327,3
275,19	75,19	332,3	274,87	74,87	323,4	275,07	75,07	322,9	275,31	75,32	329,3	275,24	75,24	327,5
275,19	75,19	332,3	275,06	75,06	323,8	275,26	75,26	323,2	275,31	75,32	329,3	275,24	75,24	327,5
275,34	75,34	332,5	275,25	75,25	324,1	275,26	75,26	323,2	275,5	75,51	329,6	275,43	75,43	327,8
275,52	75,52	332,8	275,25	75,25	324,1	275,41	75,405	323,4	275,69	75,7	330	275,63	75,63	328,1
275,52	75,52	332,8	275,4	75,4	324,3	275,6	75,595	323,8	275,69	75,7	330	275,63	75,63	328,1
275,66	75,66	332,9	275,59	75,59	324,6	275,79	75,785	324,1	275,83	75,84	330,2	275,77	75,77	328,5
275,85	75,85	333,2	275,59	75,59	324,6	275,79	75,785	324,1	276,03	76,03	330,5	275,96	75,96	328,8
275,85	75,85	333,2	275,78	75,78	325	275,93	75,925	324,3	276,22	76,23	330,8	276,15	76,15	329,1
276,04	76,04	333,4	275,97	75,97	325,3	276,12	76,115	324,6	276,22	76,23	330,8	276,15	76,15	329,1
276,24	76,24	333,7	275,97	75,97	325,3	276,12	76,115	324,6	276,37	76,37	331	276,3	76,3	329,3
276,43	76,43	334	276,11	76,11	325,7	276,31	76,31	324,9	276,56	76,56	331,4	276,49	76,49	329,6

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
276,43	76,43	334	276,3	76,3	326	276,46	76,455	325,1	276,56	76,56	331,4	276,49	76,49	329,6
276,58	76,58	334,1	276,5	76,5	326,2	276,66	76,655	325,4	276,75	76,76	331,7	276,68	76,68	329,9
276,77	76,77	334,4	276,5	76,5	326,2	276,66	76,655	325,4	276,89	76,9	332	276,83	76,83	330,1
276,77	76,77	334,4	276,64	76,64	326,4	276,85	76,845	325,7	277,09	77,09	332,3	277,02	77,02	330,4
276,96	76,96	334,6	276,83	76,83	326,7	276,99	76,99	326	277,09	77,09	332,3	277,02	77,02	330,4
277,1	77,1	334,8	276,83	76,83	326,7	276,99	76,99	326	277,24	77,24	332,5	277,22	77,22	330,7
277,29	77,29	335	277,02	77,02	327	277,18	77,18	326,2	277,43	77,43	332,8	277,36	77,36	331
277,29	77,29	335	277,17	77,17	327,2	277,37	77,37	326,6	277,43	77,43	332,8	277,36	77,36	331
277,49	77,49	335,3	277,36	77,36	327,5	277,52	77,515	326,8	277,62	77,63	333,1	277,55	77,55	331,3
277,63	77,63	335,5	277,36	77,36	327,5	277,52	77,515	326,8	277,76	77,77	333,3	277,7	77,7	331,6
277,63	77,63	335,5	277,55	77,55	327,8	277,71	77,705	327,1	277,96	77,96	333,6	277,89	77,89	331,9
277,82	77,82	335,8	277,7	77,7	328	277,85	77,85	327,3	277,96	77,96	333,6	277,89	77,89	331,9
277,96	77,96	336	277,7	77,7	328	277,85	77,85	327,3	278,15	78,15	333,9	278,08	78,08	332,2
278,15	78,15	336,2	277,89	77,89	328,3	278,05	78,045	327,6	278,34	78,34	334,2	278,27	78,27	332,6
278,15	78,15	336,2	278,03	78,03	328,6	278,24	78,235	327,9	278,34	78,34	334,2	278,27	78,27	332,6
278,35	78,35	336,4	278,22	78,22	328,9	278,38	78,38	328,1	278,49	78,49	334,3	278,42	78,42	332,8
278,54	78,54	336,7	278,22	78,22	328,9	278,38	78,38	328,1	278,68	78,69	334,6	278,61	78,61	333,1
278,54	78,54	336,7	278,41	78,41	329,2	278,57	78,57	328,4	278,68	78,69	334,6	278,61	78,61	333,1
278,73	78,73	336,9	278,55	78,55	329,4	278,76	78,76	328,6	278,83	78,83	334,8	278,8	78,8	333,4
278,87	78,87	337,1	278,55	78,55	329,4	278,76	78,76	328,6	279,02	79,02	335,1	278,95	78,95	333,6
278,87	78,87	337,1	278,75	78,75	329,7	278,91	78,91	328,9	279,21	79,21	335,4	279,14	79,14	333,9
279,06	79,06	337,3	278,94	78,94	330	279,1	79,1	329,2	279,21	79,21	335,4	279,14	79,14	333,9
279,26	79,26	337,5	279,08	79,08	330,2	279,29	79,29	329,4	279,35	79,36	335,6	279,33	79,33	334,3

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
279,4	79,4	337,7	279,08	79,08	330,2	279,29	79,29	329,4	279,55	79,55	335,9	279,47	79,47	334,5
279,4	79,4	337,7	279,27	79,27	330,5	279,43	79,43	329,6	279,55	79,55	335,9	279,47	79,47	334,5
279,59	79,59	337,9	279,46	79,46	330,7	279,63	79,625	329,9	279,74	79,75	336,1	279,67	79,67	334,8
279,74	79,74	338,1	279,46	79,46	330,7	279,63	79,625	329,9	279,93	79,94	336,4	279,81	79,81	335
279,74	79,74	338,1	279,61	79,61	330,9	279,82	79,815	330,1	280,12	80,13	336,6	280	80	335,3
279,93	79,93	338,3	279,8	79,8	331,1	279,97	79,965	330,3	280,12	80,13	336,6	280	80	335,3
280,12	80,12	338,4	280	80	331,4	280,16	80,155	330,5	280,32	80,32	336,9	280,2	80,2	335,6
280,26	80,26	338,6	280	80	331,4	280,16	80,155	330,5	280,46	80,46	337	280,34	80,34	335,8
280,26	80,26	338,6	280,14	80,14	331,6	280,35	80,345	330,7	280,46	80,46	337	280,34	80,34	335,8
280,45	80,45	338,7	280,33	80,33	331,9	280,49	80,49	330,8	280,65	80,65	337,3	280,53	80,53	336
280,64	80,64	338,9	280,33	80,33	331,9	280,49	80,49	330,8	280,84	80,84	337,5	280,72	80,72	336,3
280,64	80,64	338,9	280,52	80,52	332,1	280,68	80,675	331	280,84	80,84	337,5	280,86	80,86	336,5
280,79	80,79	339	280,66	80,66	332,3	280,82	80,82	331,2	280,98	80,99	337,7	280,86	80,86	336,5
280,97	80,97	339,2	280,85	80,85	332,5	281,01	81,01	331,4	281,18	81,18	337,9	281,05	81,05	336,8
281,17	81,17	339,4	280,85	80,85	332,5	281,01	81,01	331,4	281,37	81,38	338,2	281,25	81,25	337
281,17	81,17	339,4	280,99	80,99	332,7	281,21	81,205	331,6	281,37	81,38	338,2	281,25	81,25	337
281,31	81,31	339,6	281,18	81,18	333	281,35	81,35	331,9	281,52	81,52	338,4	281,4	81,4	337,2
281,5	81,5	339,8	281,18	81,18	333	281,35	81,35	331,9	281,71	81,71	338,6	281,59	81,59	337,5
281,5	81,5	339,8	281,38	81,38	333,2	281,54	81,54	332,1	281,71	81,71	338,6	281,78	81,78	337,7
281,69	81,69	340	281,52	81,52	333,4	281,74	81,735	332,4	281,9	81,91	338,9	281,78	81,78	337,7
281,84	81,84	340,2	281,71	81,71	333,6	281,88	81,875	332,5	282,05	82,06	339	281,92	81,92	338
282,03	82,03	340,4	281,71	81,71	333,6	281,88	81,875	332,5	282,24	82,25	339,3	282,12	82,12	338,2
282,03	82,03	340,4	281,91	81,91	333,9	282,08	82,075	332,8	282,24	82,25	339,3	282,12	82,12	338,2

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
282,22	82,22	340,6	282,05	82,05	334,1	282,27	82,265	333	282,44	82,44	339,5	282,27	82,27	338,4
282,36	82,36	340,7	282,05	82,05	334,1	282,27	82,265	333	282,58	82,58	339,7	282,46	82,46	338,7
282,36	82,36	340,7	282,24	82,24	334,3	282,41	82,41	333,2	282,58	82,58	339,7	282,65	82,65	338,9
282,55	82,55	340,9	282,43	82,43	334,5	282,6	82,6	333,4	282,77	82,78	339,9	282,65	82,65	338,9
282,7	82,7	341	282,58	82,58	334,7	282,79	82,79	333,6	282,92	82,92	340,1	282,79	82,79	339,1
282,89	82,89	341,3	282,58	82,58	334,7	282,79	82,79	333,6	283,11	83,12	340,3	282,98	82,98	339,3
282,89	82,89	341,3	282,77	82,77	334,9	282,93	82,93	333,8	283,11	83,12	340,3	282,98	82,98	339,3
283,08	83,08	341,5	282,96	82,96	335,1	283,13	83,125	334	283,3	83,31	340,6	283,18	83,18	339,6
283,23	83,23	341,6	282,96	82,96	335,1	283,13	83,125	334	283,45	83,45	340,9	283,32	83,32	339,7
283,23	83,23	341,6	283,11	83,11	335,3	283,32	83,32	334,2	283,45	83,45	340,9	283,52	83,52	340
283,42	83,42	341,8	283,3	83,3	335,5	283,47	83,465	334,5	283,64	83,64	341,1	283,52	83,52	340
283,61	83,61	342	283,49	83,49	335,7	283,66	83,655	334,7	283,83	83,84	341,3	283,71	83,71	340,2
283,75	83,75	342,1	283,49	83,49	335,7	283,66	83,655	334,7	283,98	83,98	341,5	283,85	83,85	340,4
283,75	83,75	342,1	283,63	83,63	335,9	283,8	83,8	334,9	283,98	83,98	341,5	283,85	83,85	340,4
283,95	83,95	342,3	283,82	83,82	336	283,99	83,99	335,1	284,17	84,17	341,7	284,04	84,04	340,7
284,14	84,14	342,4	283,82	83,82	336	283,99	83,99	335,1	284,31	84,32	341,9	284,23	84,23	340,9
284,14	84,14	342,4	283,96	83,96	336,2	284,18	84,18	335,3	284,31	84,32	341,9	284,38	84,38	341
284,28	84,28	342,5	284,16	84,16	336,4	284,33	84,325	335,4	284,5	84,51	342,1	284,38	84,38	341
284,47	84,47	342,7	284,35	84,35	336,6	284,52	84,52	335,6	284,7	84,7	342,3	284,57	84,57	341,2
284,66	84,66	342,8	284,35	84,35	336,6	284,52	84,52	335,6	284,7	84,7	342,3	284,77	84,77	341,4
284,66	84,66	342,8	284,49	84,49	336,7	284,71	84,71	335,8	284,84	84,85	342,4	284,77	84,77	341,4
284,81	84,81	342,9	284,68	84,68	336,8	284,86	84,855	336	285,03	85,04	342,6	284,91	84,91	341,5
285	85	343	284,68	84,68	336,8	284,86	84,855	336	285,23	85,23	342,8	285,1	85,1	341,7

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
285	85	343	284,88	84,88	336,4	285,05	85,045	336,1	285,23	85,23	342,8	285,24	85,24	341,9
285,14	85,14	343,1	285,02	85,02	335,7	285,24	85,24	336,3	285,38	85,38	343	285,24	85,24	341,9
285,34	85,34	343,3	285,21	85,21	334,1	285,39	85,385	336,4	285,57	85,57	343,1	285,44	85,44	342,1
285,52	85,52	343,4	285,21	85,21	334,1	285,39	85,385	336,4	285,76	85,76	343	285,63	85,63	342,3
285,52	85,52	343,4	285,41	85,41	332,9	285,58	85,575	336,6	285,76	85,76	343	285,63	85,63	342,3
285,71	85,71	343,5	285,55	85,55	332,6	285,76	85,76	336,5	285,9	85,9	342,5	285,77	85,77	342,5
285,85	85,85	343,6	285,55	85,55	332,6	285,76	85,76	336,5	286,09	86,09	341,1	285,96	85,96	342,7
285,85	85,85	343,6	285,73	85,73	332,5	285,91	85,905	336,1	286,09	86,09	341,1	286,16	86,16	342,9
286,04	86,04	343,7	285,92	85,92	332,6	286,1	86,095	334,7	286,28	86,29	339,6	286,16	86,16	342,9
286,24	86,24	343,8	285,92	85,92	332,6	286,25	86,245	333,7	286,43	86,44	339,1	286,3	86,3	343
286,24	86,24	343,8	286,06	86,06	332,8	286,25	86,245	333,7	286,63	86,63	338,9	286,49	86,49	343,2
286,38	86,38	343,9	286,26	86,26	332,9	286,44	86,435	332,8	286,63	86,63	338,9	286,64	86,64	343,3
286,58	86,58	344	286,46	86,46	333,1	286,63	86,63	332,5	286,82	86,82	339	286,64	86,64	343,3
286,77	86,77	344,1	286,46	86,46	333,1	286,63	86,63	332,5	286,96	86,97	339,1	286,83	86,83	343,5
286,77	86,77	344,1	286,6	86,6	333,2	286,77	86,77	332,6	286,96	86,97	339,1	287,03	87,03	343,7
286,91	86,91	344,1	286,79	86,79	333,4	286,97	86,965	332,8	287,16	87,16	339,3	287,03	87,03	343,7
287,1	87,1	344,2	286,93	86,93	333,5	287,16	87,16	332,9	287,3	87,3	339,4	287,17	87,17	343,8
287,1	87,1	344,2	286,93	86,93	333,5	287,16	87,16	332,9	287,5	87,5	339,6	287,36	87,36	344
287,25	87,25	344,3	287,17	87,17	333,7	287,3	87,3	333	287,5	87,5	339,6	287,55	87,55	344,1
287,44	87,44	344,4	287,32	87,32	333,8	287,5	87,495	333,1	287,69	87,69	339,8	287,55	87,55	344,1
287,63	87,63	344,5	287,32	87,32	333,8	287,5	87,495	333,1	287,83	87,84	339,9	287,7	87,7	344,3
287,63	87,63	344,5	287,51	87,51	333,9	287,69	87,685	333,2	287,83	87,84	339,9	287,89	87,89	344,4
287,77	87,77	344,7	287,7	87,7	334,1	287,83	87,83	333,3	288,03	88,03	340	287,89	87,89	344,4

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
287,96	87,96	344,8	287,7	87,7	334,1	288,02	88,02	333,4	288,22	88,22	340,2	288,09	88,09	344,6
287,96	87,96	344,8	287,84	87,84	334,2	288,02	88,02	333,4	288,36	88,37	340,3	288,23	88,23	344,7
288,15	88,15	344,9	288,04	88,04	334,3	288,22	88,215	333,3	288,36	88,37	340,3	288,42	88,42	344,8
288,31	88,31	344,8	288,23	88,23	334,5	288,36	88,355	333,2	288,55	88,56	340,5	288,42	88,42	344,8
288,5	88,5	339,5	288,23	88,23	334,5	288,36	88,355	333,2	288,75	88,76	340,6	288,62	88,62	345
288,5	88,5	339,5	288,37	88,37	334,6	288,55	88,55	333	288,75	88,76	340,6	288,81	88,81	345,2
288,69	88,69	303,2	288,56	88,56	334,8	288,75	88,75	332,5	288,89	88,9	340,7	288,81	88,81	345,2
288,83	88,83	247,3	288,56	88,56	334,8	288,89	88,89	322	289,09	89,09	340,9	288,95	88,95	345,2
288,83	88,83	247,3	288,71	88,71	334,9	288,89	88,89	322	289,28	89,28	341,1	289,14	89,14	345,4
289,02	89,02	132,6	288,9	88,9	335,1	289,08	89,08	295,1	289,28	89,28	341,1	289,14	89,14	345,4
289,21	89,21	40,85	289,09	89,09	335,2	289,22	89,22	210,6	289,42	89,42	341,2	289,34	89,34	345,5
289,36	89,36	11,7	289,09	89,09	335,2	289,22	89,22	210,6	289,61	89,62	341,3	289,48	89,48	345,5
289,36	89,36	11,7	289,23	89,23	335,3	289,41	89,41	105,1	289,61	89,62	341,3	289,68	89,68	339
			289,42	89,42	335,4	289,61	89,605	37,85	289,81	89,81	341,5	289,68	89,68	339
			289,42	89,42	335,4	289,75	89,75	21,35	289,95	89,96	341,5	289,87	89,87	298,7
			289,61	89,61	335,6	289,75	89,75	21,35	290,15	90,15	341,6	290,01	90,01	202,5
			289,76	89,76	335,6	289,95	89,945	17,25	290,15	90,15	341,6	290,01	90,01	202,5
			289,96	89,96	335,7	290,14	90,135	17,8	290,34	90,35	341,4	290,21	90,21	88,5
			289,96	89,96	335,7	290,14	90,135	17,8	290,34	90,35	341,4	290,4	90,4	18,85
			290,15	90,15	330,6	290,28	90,28	18,2	290,53	90,54	340,3	290,54	90,54	2,25
			290,29	90,29	294,9	290,47	90,47	18,7	290,67	90,68	339,2	290,54	90,54	2,25
			290,29	90,29	294,9	290,66	90,655	19,25	290,86	90,87	337,6			
			290,48	90,48	204,2	290,66	90,655	19,25	290,86	90,87	337,6			

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			290,67	90,67	91,85	290,8	90,8	19,6	291,05	91,06	336,6			
			290,82	90,82	37,55	290,99	90,99	20,3	291,2	91,21	336,2			
			290,82	90,82	37,55	290,99	90,99	20,3	291,4	91,4	335,8			
			291,01	91,01	2,65	291,18	91,18	20,6	291,4	91,4	335,8			
						291,33	91,33	21,1	291,6	91,6	335			
						291,52	91,52	21,6	291,74	91,75	328,8			
						291,52	91,52	21,6	291,74	91,75	328,8			
						291,72	91,715	22,1	291,94	91,94	310,7			
						291,87	91,865	22,4	292,08	92,09	241,4			
						291,87	91,865	22,4	292,28	92,29	133,4			
						292,06	92,055	22,9	292,28	92,29	133,4			
						292,2	92,2	23,2	292,47	92,48	45,05			
						292,39	92,39	23,7	292,62	92,62	15,7			
						292,39	92,39	23,7	292,62	92,62	15,7			
						292,58	92,58	24,2	292,81	92,82	2,75			
						292,72	92,72	24,75	293	93,01	1,1			
						292,72	92,72	24,75						
						292,92	92,915	25,2						
						293,11	93,11	25,55						
						293,25	93,25	26						
						293,25	93,25	26						
						293,44	93,44	26,5						
						293,64	93,635	27						

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
						293,64	93,635	27						
						293,78	93,775	27,3						
						293,97	93,965	27,75						
						294,16	94,16	28,25						
						294,16	94,16	28,25						
						294,3	94,3	28,55						
						294,5	94,495	29,05						
						294,5	94,495	29,05						
						294,69	94,685	29,5						
						294,83	94,83	29,8						
						294,83	94,83	29,8						
						295,02	95,02	30,25						
						295,17	95,17	30,65						
						295,36	95,36	31,1						
						295,36	95,36	31,1						
						295,55	95,55	31,6						
						295,69	95,69	31,9						
						295,88	95,875	32,35						
						295,88	95,875	32,35						
						296,07	96,07	32,75						
						296,22	96,215	33						
						296,22	96,215	33						
						296,41	96,41	33,35						

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
						296,61	96,605	33,7						
						296,61	96,605	33,7						
						296,8	96,8	34,05						
						296,94	96,94	34,3						
						297,14	97,135	34,6						
						297,14	97,135	34,6						
						297,33	97,325	35,05						
						297,47	97,47	35,25						
						297,47	97,47	35,25						
						297,66	97,66	35,5						
						297,86	97,855	35,75						
						298	97,995	35,85						
						298	97,995	35,85						
						298,24	98,235	36,05						
						298,24	98,235	36,05						
						298,43	98,425	36,25						
						298,57	98,57	36,4						
						298,76	98,76	36,6						
						298,76	98,76	36,6						
						298,96	98,955	36,65						
						299,1	99,095	36,65						
						299,1	99,095	36,65						
						299,29	99,285	36,5						

Продолжение Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
						299,48	99,48	36,25						
						299,62	99,62	36,05						
						299,62	99,62	36,05						
						299,82	99,815	35,45						
						299,96	99,96	35,1						
						299,96	99,96	35,1						
						300,16	100,16	34,55						
						300,35	100,35	34,2						
						300,35	100,35	34,2						
						300,54	100,54	33,95						
						300,68	100,68	33,8						
						300,87	100,87	33,55						
						300,87	100,87	33,55						
						301,06	101,06	33,25						
						301,2	101,2	33						
						301,2	101,2	33						
						301,4	101,4	32,45						
						301,59	101,59	31,9						
						301,74	101,74	31,6						
						301,74	101,74	31,6						
						301,93	101,93	31,1						
						302,08	102,08	30,6						
						302,08	102,08	30,6						

Окончание Таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
						302,27	102,27	29,5						
						302,46	102,46	27,1						
						302,6	102,6	24,95						
						302,6	102,6	24,95						
						302,79	102,79	21,85						
						302,98	102,98	20,05						
						302,98	102,98	20,05						
						303,13	103,13	19,35						
						303,32	103,32	18,45						
						303,51	103,51	17,2						
						303,51	103,51	17,2						
						303,65	103,65	16,05						
						303,85	103,85	13,85						
						303,85	103,85	13,85						
						304,04	104,04	10,65						
						304,18	104,18	6,55						
						304,37	104,37	2,5						
						304,37	104,37	2,5						