

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.Н. КОСЫГИНА (ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО)»



На правах рукописи

Монахов Владислав Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СВОЙСТВ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.19.01

«Материаловедение производств текстильной и легкой промышленности»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор П. А. Севостьянов

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТАРЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМ ПРОЦЕССОВ	10
1.1 Возможности имитационного статистического моделирования при исследовании свойств текстильных материалов	13
1.2 Износ и старение текстильных материалов	23
1.3 Истирание текстильных материалов	33
1.4 Деформация текстильных материалов	38
1.5 Разрывные характеристики как показатель прочности текстильных материалов	43
Выводы по первой главе	50
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСТИРАНИЯ И ТРЕНИЯ МАТЕРИАЛА	53
2.1 Динамическая модель истирания материала	53
2.2 Статистические закономерности взаимосвязи между сухим и вязким трением в волокнистом материале	59
2.3 Моделирование испытаний образцов тканей на истирание	62
2.4 Исследование динамики истирания и сравнение методик приборов ИТ-3М и Martindale	68
2.5 Компьютерная модель истирания ткани	75
Выводы по второй главе	88
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ	91
3.1 Компьютерное моделирование динамики износа и старения материалов в условиях нормальной эксплуатации	91

3.2	Имитационные модели процессов износа и старения волокнистых материалов при нормальных условиях эксплуатации	97
3.3	Имитационная модель износа и старения одномерного материала в нестационарных условиях внешних воздействий	109
3.4	Модель динамики старения и износа одномерного полимерного материала	114
3.5	Исследование робастности старения полимерных нитей и волокон методами компьютерной имитации	119
3.6	Анализ старения синтетических нитей методами компьютерного моделирования	124
3.7	Фрактальная модель статистической динамики старения одномерных полимерных материалов	129
3.8	Методы и алгоритмы обработки экспериментальных данных при компьютерном моделировании процессов старения и износа волокнистых материалов	133
3.9	Планирование экспериментов и обработка данных моделирования процессов старения полимерных материалов	136
	Выводы по третьей главе	139
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРЫВА ТКАНЫХ ПОЛОТЕН И НИТЕЙ		142
4.1	Динамика удлинения и разрыва комплексных нитей и ее связь со свойствами элементарных нитей при моделировании полуцикловых деформаций	142
4.2	Некоторые аспекты моделирования задач структурной механики тканых полотен	146
4.3	Робастность моделей разрыва тканых полотен	149
4.4	Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна	154

4.5	Одномерная модель удлинения нитей основы в тканом полотне с учетом сил трения.....	160
4.6	Моделирование удлинения основной нити в ткани	166
4.7	Распределение деформаций по основе и влияние уточных нитей на деформацию при моделировании удлинения основной нити в ткани	170
4.8	Моделирование неравномерности распределения деформации основных нитей в тканых полотнах методом конечных элементов.....	174
4.9	Особенности и методы моделирования деформации и разрыва тканых полотен	182
	Выводы по четвертой главе.....	186
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	187
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	189
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	213

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Постоянное расширение ассортимента производимых текстильных материалов и диапазона их применения не только в потребительских, но в технических и специальных целях делают все более актуальной тему оценки устойчивости текстильных материалов к внешним воздействиям в условиях нормальной эксплуатации. Основными факторами, влияющими на потерю текстильными материалами их эксплуатационных свойств, являются действующие в течение продолжительного времени механические воздействия, электромагнитные излучения от радиации до тепловой части спектра. Воздействие этих факторов приводит к изменению в худшую сторону (деградации) свойств как волокон, образующих текстильный материал, так и структуры этого материала – нитей, пряжи, тканых и нетканых полотен.

Исследование динамики развития эффектов старения, износа, истирания, разрушения текстильных материалов экспериментальными методами хотя и дает наиболее точную и конкретную информацию об испытуемых образцах, но требует специальной аппаратуры, занимает много, а иногда и неприемлемо много времени, не позволяет получить системное представление об изучаемом явлении.

Поэтому перспективным является использование методов компьютерного моделирования для имитации явлений старения, износа, истирания, разрушения текстильных материалов, которое позволяет получить обобщенное представление о роли многих факторов и изучить динамику этих процессов.

Данная работа направлена на создание компьютерных средств исследования статистической динамики нестационарных процессов развития явлений износа, истирания, старения, разрушения в одномерных и плоских волокнистых материалах.

Целью диссертационной работы является разработка компьютерных моделей для имитации статистической динамики истирания, старения и разрушения одномерных и тканых волокнистых материалов методами имитационного статистического моделирования. Для достижения этой цели

необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ научно-технической литературы, посвященной проблемам исследования процессов истирания, старения и разрушения волокнистых материалов в условиях нормальной эксплуатации, теоретических методов и математических моделей, разработанных для решения этих проблем;
- исследовать возможности, преимущества и методы реализации компьютерных моделей для статистической имитации динамики истирания, старения и разрушения одномерных и тканых волокнистых материалов;
- разработать алгоритмы и их компьютерные программные реализации для моделирования статистической динамики истирания, старения и разрушения волокнистых материалов;
- построить планы проведения вычислительных экспериментов с разработанными моделями и методику обработки их результатов;
- оценить прогностические возможности моделей и их адекватность в сравнении с известной информацией по ранее проведенным исследованиям и с основными физическими представлениями о взаимодействии различных параметров и факторов воздействия на динамику процессов деградации волокнистых материалов.

Объектом исследования являются одномерные волокнистые материалы: волокна, нити, пряжа и двумерные материалы в виде однослойных тканых полотен, произведенных как из натуральных, так и химических волокон различного происхождения.

Методы исследования

Основным методом исследования являлся метод компьютерного имитационного статистического моделирования объектов – материалов и процессов износа, истирания, старения, разрушения этих материалов. При реализации этого метода использовались методы и средства теории вероятностей, математической статистики, теории вероятностных процессов и статистической динамики, планирования экспериментов, подобия и анализа размерностей, корреляционного и регрессионного анализа. Разработанные программные

средства исследования были реализованы в вычислительной программной системе Matlab.

Научная новизна работы

При проведении теоретических исследований и вычислительных экспериментов автором впервые:

- разработаны алгоритм и компьютерная статистическая модель динамики истирания тканого полотна. Исследована динамика истирания полотен на испытательных приборах при анализе устойчивости тканей к истиранию;

- исследована динамика возникновения и распространения структурных изменений в одномерных волокнистых материалах при их старении для нормальных условий эксплуатации и при нестационарных локальных экстремальных воздействий на материал. Разработаны алгоритм и компьютерная статистическая модель динамики процесса старения этих материалов;

- выполнено исследование и сравнение двух основных видов механического взаимодействия элементов волокнистого материала – сухого и вязкого трения с использованием разработанных компьютерных программ имитации. Показано, что статистический разброс параметров волокнистых материалов приводит к эффекту превращения законов сухого трения в закономерности, характерные для вязкого трения и необратимых деформаций и изменений в волокнистых материалах;

- исследована динамика нарастания деформации образцов тканого полотна на испытательных разрывных машинах, разработаны алгоритмы и их программные реализации для моделирования статистической динамики удлинения образцов тканого полотна. Построенные модели доказывают специфические особенности динамики распределения разрывной нагрузки по плоскости образца и возникновения и развития областей разрыва нитей, которые отличают разрушение тканых полотен от механизмов разрушения образцов металлов и полимеров;

- исследована роль неравномерности необратимых деформаций в образцах тканых полотен при их удлинении на испытательном оборудовании, для чего

разработаны алгоритм и методика моделирования.

Практическая значимость результатов работы заключается в:

- создании единой методики разработки компьютерных моделей, позволяющей создать автоматизированный моделирующий комплекс для исследования процессов износа, старения, истирания и разрушения одномерных волокнистых материалов и тканых текстильных полотен;

- получении новой информации: о динамике взаимодействия волокон и элементов волокнистого материала при его эксплуатации; о развитии процессов старения и деструкции волокнистых материалов; о роли вероятностных факторов и неравномерности волокнистых материалов на их деформации и разрушении.

- получении ряда зависимостей, отображающих влияние наиболее значимых факторов на процессы износа и старения, истирания и разрыва одномерных волокнистых материалов и тканых полотен.

- разработке комплекса программ для прогнозирования влияния параметров волокнистого материала на показатели динамики развития этих процессов;

- разработке методик моделирования и проведения компьютерных экспериментов с моделями для анализа влияния различных факторов: свойств волокон и структуры волокнистого материала, - на динамику процессов износа и старения, истирания и разрыва одномерных волокнистых материалов и тканых полотен.

Апробация и реализация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на VIII Международной научно-практической конференции «Академическая наука - проблемы и достижения» / Academic science - problems and achievements VIII (2016, North Charleston, USA);

- на международной научно-практической конференции «Моделирование в технике и экономике» (2016, ВГТУ, Витебск);

- на 68-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» (2016, КГТУ, Кострома);

- на международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (2016, 2017, ВГТУ, Витебск);

- на международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2016, 2018, РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва);

- на межвузовской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (ПОИСК-2017, 2018, 2019, ИВГПУ, Иваново);

- на международном научно-техническом форуме «Первые международные Косыгинские чтения» (МНТФ Косыгин – 2017, РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва);

- на международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности» (2017, ВГТУ, Витебск).

По результатам работы оформлено «ноу-хау»:

- Севостьянов П.А., Самойлова Т.А., Монахов В.В. Разработка алгоритмов компьютерного имитационного статистического моделирования износа и старения одномерных волокнистых материалов. 05.05.2017 № 13-51-04-17КТ.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 28 печатных работах, 13 из которых – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы. По своей структуре диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, списка литературы, приложений. Работа изложена на 205 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 25 таблиц. Список литературы включает 193 библиографических и электронных источников. Приложения представлены на 1 странице.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТАРЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И СВЯЗАННЫХ С НИМ ПРОЦЕССОВ

Общий курс на ускоренное развитие инновационных технологий как основу для технического и технологического прогресса предполагает интенсификацию создания новых материалов бытового, технического и специального назначения. Важнейшее место среди материалов такого рода занимают материалы, произведенные или содержащие в своей основе волокна и/или нити самого разного происхождения: от традиционных натуральных волокон хлопка, шерсти, льна, шелка до синтетических нитей из полимерных молекул на основе углеводов, кремния (стекловолокна), углерода (карбоновые волокна), металлов и сплавов, базальта и др.

Все эти виды волокнистых (текстильных) материалов обладают широчайшим спектром различных свойств. На их основе созданы и чуть ли ни каждодневно создаются новые и модифицируются известные текстильные материалы. Это достигается за счет применения трех базовых подходов:

1. Разработка новых и адаптация известных многочисленных вариантов структуры изготовленных из волокон и/или нитей материалов: тканых переплетений, вязаных и трикотажных полотен, нетканых материалов, композитных материалов на их основе.

2. Использование различных смесовых комбинаций волокнистых материалов различной природы и свойств позволяет получить ни с чем несравнимое разнообразие материалов для производства изделий, необходимых практически в любых областях человеческой деятельности: от повседневной одежды до элементов микроэлектронной техники, оболочек и устройств космических аппаратов и медицинских протезов.

3. Модификация, адаптация существующих и разработка новых технологий переработки волокнистых материалов. Технология переработки и специально подобранные режимы ее реализации, включая конструирование нового и/или адаптацию действующего оборудования, позволяют реализовать

проектные требования к получаемым текстильным материалам и изделиям из них.

Одним из важнейших составляющих и условий успеха в этой гонке технологий является проектирование и прогнозирование свойств инновационных материалов. Решение этой ключевой проблемы в области проектирования производства инновационных материалов является получение для материалов и изделий из них материаловедческой информации. Именно материаловедение, в данном случае, текстильное материаловедение призвано обеспечить надежную информационную основу, выбор правильного и оптимального пути достижения целей производства инновационных материалов [1-3].

Традиционный, наиболее распространенный и надежный способ получения такой информации заключается в производстве малых объемов инновационного материала и, по возможности, всестороннем испытании его образцов на испытательном оборудовании и измерительных приборах [4, 5]. За прошедшие десятилетия были разработаны многочисленные методы проведения подобных «натурных» экспериментов с образцами материалов и изделий, нашедшие свое отражение в работах проф. А.Н. Соловьева, С.М. Кирюхина, К.Е. Перепелкина и др. [6-8]. Многие из них были закреплены в различных Государственных стандартах, нормах и технических условиях.

Однако такой подход обладает и рядом недостатков. К **первой проблеме** можно отнести своего рода проблему размерности. Количество вариантов текстильных материалов, изделий из них и технологий производства в условиях курса на инновационные подходы быстро нарастает. Выработать даже в малых объемах необходимое число вариантов изделий для надежного оптимального выбора оказывается все более затратным делом, как по времени, так и по расходуемым ресурсам. **Другая проблема** традиционного подхода состоит в недостатке или отсутствии соответствующей приборной базы, позволяющей достаточно быстро и надежно получать результаты натурных исследований образцов различных вариантов материалов или изделий из них. Стоимость подобного измерительного оборудования составляет значительную долю затрат

на всю разработку и проектирование нового материала. **Третья проблема**, связанная с методом натуральных экспериментов – это ограниченный объем получаемой информации и, зачастую, недоступность многих важных показателей либо из-за отсутствия необходимых измерительных средств, либо из-за отсутствия даже и методов измерения параметра материала, представляющего интерес. **Четвертая проблема** состоит в малой точности измерений из-за малых объемов выборок и большой дисперсии ряда измеряемых величин. Например, исследование истираемости образцов тканых полотен требует выполнения десятков тысяч циклов, что занимает несколько суток на один вариант. Очевидно, что в таких условиях накопить надежный объем статистических данных по многим образцам проблематично. **Пятая проблема** проявляется при необходимости дать прогноз свойств волокнистого материала или изделия на его основе, связанных с их поведением в течение длительного интервала времени, например, процессов, старения, износа, потери эксплуатационных качеств, разрушения и т.п. Длительность этих процессов заставляет использовать метод ускоренных испытаний, что, в свою очередь, требует создания специального оборудования, измерительных комплексов. При этом надежность прогноза в ряде случаев остается проблемой [9-11]. **Шестой проблемой** натуральных экспериментов является частный характер получаемых результатов. Как бы успешны не были эти эксперименты, нет никаких гарантий, что их результаты можно надежно перенести на другие материалы. Близость двух конкурирующих вариантов материала по свойствам применяемого волокнистого материала и его структуре не является гарантией близости этих материалов по их поведению в процессе эксплуатации в изделиях. Причиной существенных расхождений может быть, например, различие в технологических условиях их производства. **Седьмой проблемой** натурального экспериментирования является проблема влияния неучтенных и побочных факторов, которые могут оказать на результат эксперимента гораздо большее влияние, чем априори предполагается. Ситуация особенно осложняется, если исключить влияние этих факторов на результаты натурального эксперимента не представляется возможным.

1.1 Возможности имитационного статистического моделирования при исследовании свойств текстильных материалов

Наиболее мощной и перспективной альтернативой методу натуральных экспериментов в исследованиях свойств новых и модифицированных текстильных волокнистых материалов является метод компьютерного математического и имитационного моделирования. Этот метод предполагает использование всех возможностей современной компьютерной техники и информационных технологий в сочетании с достижениями в области математического моделирования физико-механических свойств и поведения в условиях эксплуатации различных материалов и сред. Использование компьютерной техники и информационных технологий лежит в русле общей тенденции мирового и российского национального развития, так называемой «цифровизации» различных областей человеческой деятельности, которая была объявлена приоритетным направлением развития России на ближайший исторический период.

Впервые методы компьютерного имитационного статистического моделирования в области исследования текстильных технологий и свойств текстильных материалов были разработаны и применены на практике решения ряда актуальных технологических задач проф. П.А. Севостьяновым в 70-е – 80-е годы 20-го века [12-15]. Затем им и его школой эти методы были распространены на задачи статистической механики нити волокон, нитей, тканых плотен, нетканых материалов [16-30], и в настоящее время нашли признание и получили свое развитие в работах Санкт-Петербургского государственного университета технологии и промышленного дизайна [31-38], Ивановского государственного политехнического университета [39, 40], Костромского государственного университета [41, 42].

В статье [43] Голубков Д.В. осуществил моделирование текстильных материалов и их свойств на базе программного комплекса ANSYS, работа которого основана на методе конечных элементов (МКЭ). В работе

анализируются механические свойства, влияние которых на ход технологических процессов и переработки текстильного материала весьма значительно. Кроме того, механические свойства являются важной составляющей в совокупности эксплуатационных свойств готовых изделий. Построенная автором модель нити позволяет учитывать геометрическую неоднородность (неровнота, колебания размеров и формы поперечного сечения). На ее основе создана трехмерная конечно-элементная модель ткани, позволяющая учитывать объемное контактное взаимодействие нитей основы и утка (рис. 1.1).

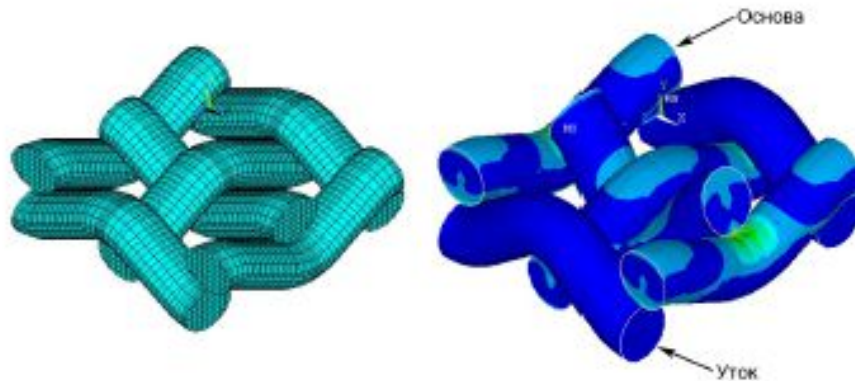


Рисунок 1.1 - Трехмерная конечно-элементная модель ткани (4 раппорта) и картина напряжений в деформированном состоянии (растяжение вдоль основы)

Ломов С.В. и Ферпуст И. в работе [44] описали среду моделирования текстильных полотен и композитов WiseTex, которая включает модели внутреннего строения ткани в свободном и деформированном состоянии, ее сопротивления сжатию, растяжению и сдвигу.

В работе [45] Коржева И.А., Верняева И.Л., Нелюбова Р.Б. с помощью имитационной модели исследовали деформацию сжатия трикотажных полотен специального назначения в зависимости от вида переплетения и линейной плотности комбинированной нити с целью определения оптимальных параметров структуры трикотажа. Для проведения эксперимента использовались опытные образцы трикотажного полотна переплетений: ластик, полуфанг и фанг из

комбинированных нитей четырех вариантов. Характеристики нитей представлены в таблице 1.1. Авторами определена величина предельной деформации сжатия, она составляет 100 Н.

Таблица 1.1 – Характеристики нитей

Варианты	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Переплетение	фанг				полуфанг				ластик			
Линейная плотность исходной нити, текс	505	901	1322	694	505	901	1322	694	505	901	1322	694
Процентное содержание компонентов в нити, %:												
- вольфрам	45	46	46	-	45	46	46	-	45	46	46	-
- углерод	52	51	51	100	52	51	51	100	52	51	51	100
- хлопок	3	3	3	-	3	3	3	-	3	3	3	-
Фактическая поверхностная плотность трикотажа, г/м ²	701	1315	2080	1288	1185	2256	3420	1784	1267	2465	3897	1566
Толщина трикотажа в свободном состоянии, мм	5,5	6,2	6,6	4,9	5,3	5,7	6,2	4,65	4,9	5,5	6,0	4,4
Толщина трикотажа в сжатом состоянии (нагрузка 160 Н), мм	0,9	2,2	2,7	1,97	0,8	2,3	2,5	1,90	0,8	2,2	2,6	1,90
Предельная деформация сжатия (нагрузка 160 Н), %	83,6	64,5	58,9	59,8	84,9	59,6	59,4	59,1	83,7	60,0	56,6	56,8

В работе [46] Чебунькиной Т.А., Земляковой И.В. и др. рассматриваются вопросы имитационного моделирования характера расположения металлических частиц на поверхности ткани. Авторами запрограммирована модель, имитирующая распределение металлизированных полос по поверхности ткани для различных параметров режима работы электрометаллизатора. Данная

программа позволяет получить ряд показателей, характеризующих результат моделирования процесса электродуговой металлизации для заданного режима.

Моделирование используется для широкого спектра задач, в том числе для имитации процесса сжатия волокнистых материалов в массе [47]. В данной работе Киселевым А.М. в системе ANSYS разработана вероятностная трехмерная конечно-элементная модель волокнистого материала и программное обеспечение для ее построения в зависимости от различных геометрических и физико-механических факторов. А также создана динамическая модель процесса сжатия волокон в массе, позволяющая строить диаграммы деформирования материала при деформации сжатия.

Примером математического моделирования является модель поперечного сечения хлопковых волокон, разработанная Матрохиным А.Ю., Шаломиним О.А., Кругловым А.В., Гусевым Б.Н. [48]. Указанная модель дает возможность интерпретировать результаты оценки зрелости волокон с помощью геометрических параметров. Структура модели следующая (рис. 1.2). Она образована прямоугольником со сторонами A и B , к боковым сторонам которого примыкают два полукруга диаметром D , равным стороне B . В центральной части модели размещена скругленная прямоугольная фигура, имитирующая канал. Ключевое значение для оценки зрелости имеют площадь фигуры S_v или доля E от площади поперечного сечения.

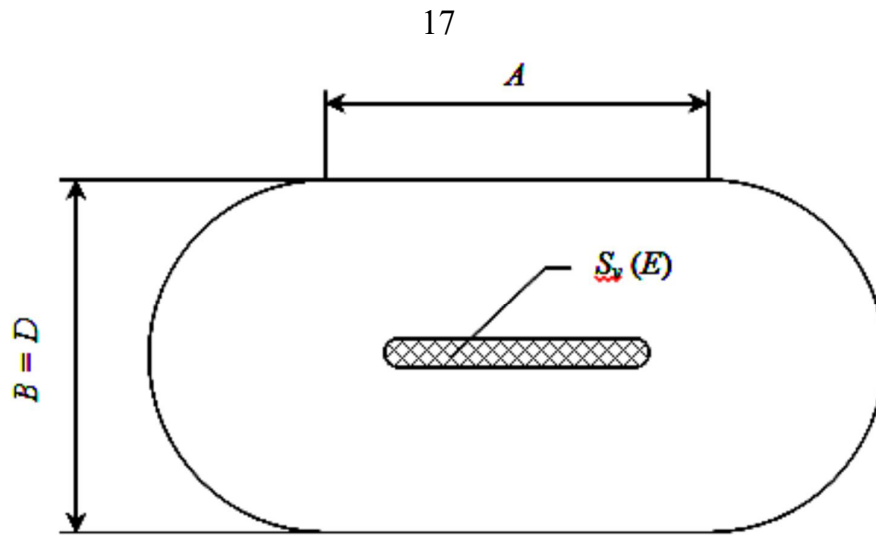


Рисунок 1.2 - Геометрическая модель поперечного сечения хлопкового волокна

Киселевым А.М., Соркиным А.П., Киселевым М.В. в работе [49] построена динамическая конечно-элементная модель процесса растяжения материала. А также разработана вероятностная трехмерная модель нетканого материала на примере материала холлофайбер и программное обеспечение для ее построения в зависимости от различных геометрических и физико-механических факторов. Примеры моделирования элементарных волокон представлены на рис. 1.3.

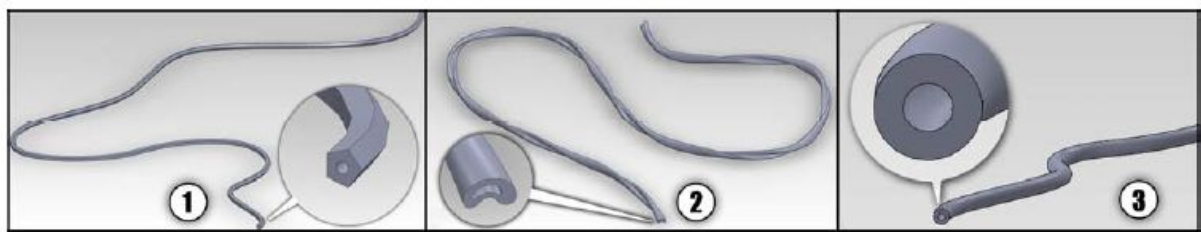


Рисунок 1.3 - Внешний вид и форма поперечных сечений компьютерных моделей элементарных волокон различных материалов: 1 – лен, 2 – хлопок, 3 – холлофайбер

На рис. 1.4 показаны примеры геометрической модели для материала холлофайбер софт Р 5190С, полученные с использованием созданного программного обеспечения.

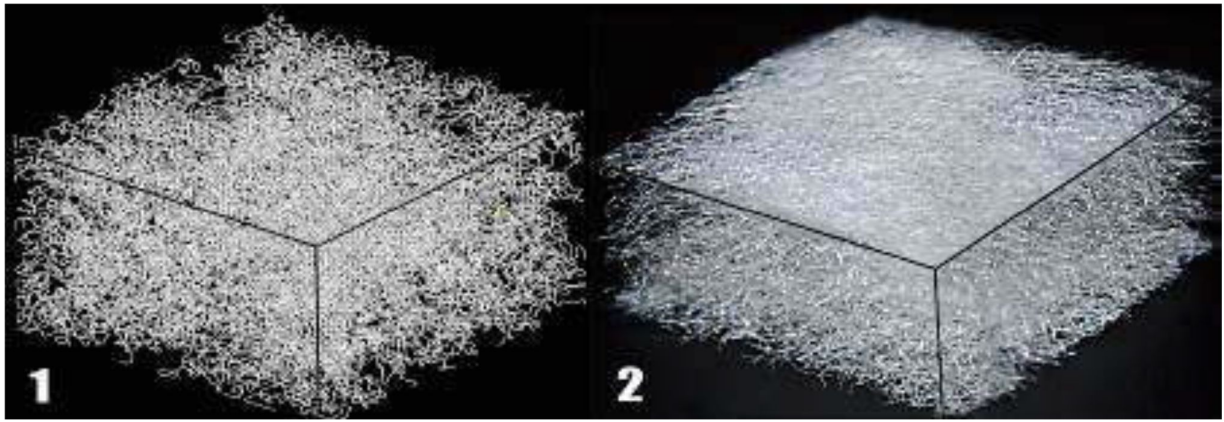


Рисунок 1.4 - Геометрическая структура материала холлофайбер софт Р 5190:
1 – математическая модель, 2 – натуральный образец

Для исследования показателей качества текстильных изделий применялись методы искусственного интеллекта. Шаломиним О.А., Матрохиным А.Ю. и Шубиным А.С. в статье [50] предложен единый подход и разработана методика проектирования номинальных значений показателей качества текстильных изделий на основе методологии рекуррентных искусственных нейронных сетей. На примере кардной хлопчатобумажной пряжи определены коэффициенты эмпирических уравнений, используемых в качестве нейронов искусственной нейронной сети, конкурирующих друг с другом. Определены номинальные значения по единичным показателям качества (ЕПК) пряжи (таблице 1.2).

Таблица 1.2 – Результаты вычислений 5 значений для ЕПК пряжи

Наименование показателя качества пряжи	Расчетное значение ЕПК	Номинальное значение ЕПК
Удельная разрывная нагрузка, Н/Т	10,8	11,98
	12,4	
	11,0	
	14,2	
	11,5	
Коэффициент вариации по разрывной нагрузке, %	21,1	16,36
	14,3	
	14,8	
	16,5	
	15,1	
Коэффициент вариации по линейной	3,8	4,4

плотности, %	4,5	
	4,6	
	4,4	
	4,7	
Количество пороков на 1000 м	182	146
	125	
	99	
	154	
	170	
Коэффициент использования разрывной нагрузки волокон	0,67	0,662
	0,72	
	0,59	
	0,63	
	0,70	

Переборова Н.В. в работе [51] осуществила математическое моделирование функционально-потребительских релаксационно-восстановительных и деформационно-эксплуатационных свойств материалов текстильной и легкой промышленности, необходимых для оценки их качества.

Виноградова Н.А. в работе [52] разработала математическую модель зависимости кинетики изнашивания тканей медицинского назначения из хлопковых, льняных и смешанных волокон в зависимости от количества стирок и циклов истирания. В качестве критериев ухудшения свойств тканей в результате стирки были выбраны показатели стойкость к истиранию и воздухопроницаемость, а в результате истирания - воздухопроницаемость.

Рымкевич О.В. в работе [53] осуществила моделирование процесса термоусадки нитей в свободном состоянии и режиме изотермического нагрева, предложила общее уравнение деформации для нити эффектом памяти формы. Также было выполнено моделирование усадки термоусаживаемого полотна на основе усадки нитей, входящих в его состав с помощью двух подходов. Первый подход основан на представлении нитей основы линейными стержнями. Второй подход основан на учете таких факторов: сил упругости при деформации полотна, свободного пространства между нитями и параметра усадки уточных нитей.

Васильева Е.К. в работе [54] исследовала деформационно-релаксационные характеристики полиамидных тканей с использованием математического моделирования. Отмечена сложность проведения исследования обусловленная тем, что изучаемые свойства тканей зависят не только от аналогичных свойств составляющих ткани нитей. Существенное влияние оказывают такие геометрические факторы, как виды переплетений. Исследование проводилось на математической модели ползучести, описывающей временное изменение деформации ткани от значений приложенного усилия или напряжения. Математическая модель была реализована в виде компьютерной программы использовалась для прогнозирования деформационно-релаксационные характеристики полиамидных тканей.

Костомаров С.А. в работе [55] исследовал физико-математические свойства тканей для спецодежды от воздействия химических реактивов. Результаты лабораторных испытаний обрабатывались численными методами и методами математической статистики. Для получения функциональных зависимостей исследуемых свойств использовались методы корреляционно-регрессионного анализа с применением программ Excel и MathCAD.

Кудринский С.В. в работе [56] изучал эксплуатационные свойства тканей для спецодежды работников нефтяной отрасли. Результаты экспериментальных исследований, полученные на лабораторном оборудовании, обрабатывались на ЭВМ с использованием методов математической статистики и компьютерных программ.

Томилова М.В. в работе [57] изучала свойства текстильных полотен и стабильность их структуры при механическом сдвиге. Методом наименьших квадратов получены математические модели зависимости характеристики жесткости и устойчивости структуры полотна от структурных показателей.

В настоящее время компьютерное имитационное моделирование некоторой системы или процесса понимается как воспроизведение на компьютере динамики эволюции моделируемой системы или процесса во времени с учетом всех важных для решаемой задачи элементов системы и особенностей их взаимодействия. Как

правило, алгоритм модели и его программная реализация содержат вероятностные, случайные составляющие. Поэтому и моделирование является статистическим. Соответственно, и результаты моделирования носят вероятностный характер, что заставляет рассматривать получение информации о системе или процессе от модели как статистический эксперимент, имитирующий натуральный эксперимент с реальными образцами объекта моделирования. При исследовании волокнистых материалов такими объектами являются образцы волокнистого материала или изделия из него, который необходимо исследовать.

Подход компьютерного имитационного моделирования обладает рядом преимуществ, во многом компенсирующих перечисленные выше недостатки метода натуральных экспериментов. **Первым преимуществом** имитационного статистического моделирования (ИСМ) является доступность ему объектов практически любой сложности и масштабов. **Вторым преимуществом** ИСМ является высокий уровень адекватности модели той информации, которая имеется об объекте моделирования, и высокий уровень соответствия поведению реального объекта. **Третьим преимуществом** ИСМ является полная доступность всех включенных в модель параметров и показателей, возможность получения информации об этих характеристиках модели как в динамике, так и по итогам моделирования. **Четвертым преимуществом** ИСМ является ее полная управляемость, что позволяет гибко управлять процессом извлечения информации об объекте моделирования, а при необходимости, и адаптировать саму модель к меняющимся условиям и задачам моделирования.

Метод ИСМ обладает и рядом недостатков. Получение информации от имитационных моделей осуществляется путем проведения вычислительных, или, как говорят, численных, машинных, экспериментов с последующей автоматической или автоматизированной обработкой результатов. Ситуация такова: имитационная модель имитирует эволюцию моделируемой системы во времени и представляет собой виртуальную систему, аналогичную моделируемой системе. Вычислительный эксперимент с такой моделью является виртуальной имитацией натурального эксперимента с реальной системой. Поэтому при ИСМ

возникают те же задачи планирования опытов эксперимента, выбора методов обработки их результатов, проверки адекватности этих результатов. Проблема работы с ИСМ усложняется статистическим характером модели и результатов моделирования. Вместе с тем, отметим, что хотя все эти задачи близки к аналогичным задачам в натуральных экспериментах, критерии, на основе которых они решаются принципиально отличаются от критериев для натуральных экспериментов. Например, одним из важнейших критериев при планировании натуральных экспериментов является минимизация расхода ресурсов (времени, сырья, трудозатрат и др.) и числа проводимых опытов. В вычислительных экспериментах при ИСМ, наоборот, объем эксперимента не является критичным, поскольку проводится на компьютерах с высоким быстродействием и памятью, позволяющей протоколировать не только итоговые результаты опытов, но и сохранять и обрабатывать информацию о динамике системы. Другим примером могут служить планы экспериментов. В натуральных экспериментах вследствие указанного главного критерия экономии ресурсов на эксперимент предпочитают применять многофакторные эксперименты по специально подобранным «оптимальным» планам. В компьютерных вычислительных экспериментах более предпочтительными являются однофакторные эксперименты, позволяющие более детально и наглядно отобразить влияние факторов на поведение системы. Третье различие – в представлении результатов эксперимента. В натуральных экспериментах после обработки их результатов получают регрессионные многофакторные зависимости, которые отображают регрессионными формулами, таблицами и графиками поверхностей. В компьютерных экспериментах при ИСМ результаты практически всегда отображают графически в виде кривых, оценок распределений. Графическое представление всегда является более наглядным, чем формульное или табличное, поэтому ИСМ в этом также отличается от натуральных экспериментов в лучшую сторону. Детально общие вопросы классификации имитационных статистических моделей, самого подхода компьютерной имитации, методов планирования, организации, проведения компьютерных экспериментов и обработки их результатов, в частности, процедур

проверки адекватности моделей и правильности их построения детально описаны в фундаментальных работах [58-67].

Наибольший интерес представляет применение ИСМ для исследования тех свойств текстильных материалов, для изучения которых требуются продолжительные, дорогостоящие натурные эксперименты или многовариантные задачи, для которых подготовка большого числа образцов уже составляет достаточно сложную или нереализуемую задачу. В данной работе рассматривается применение методов ИСМ для исследования изменений в свойствах волокнистых материалов, возникающих в процессе их эксплуатации. При этом основными факторами, влияющими на появление этих изменений, считаем эффекты старения, износа, в частности, истирания, и разрушения. Приведем определения этих понятий, как они формулируются в настоящее время [68-70].

1.2 Износ и старение текстильных материалов

Износ текстильных материалов – это результат изнашивания, т.е. потери текстильным материалом своих свойств при эксплуатации. Износ проявляется в разрушении материала или ухудшении его свойств. Различают износ двух видов — местный и общий. **Местный износ** характеризуется ослаблением, наличием повреждений (потертостей, дыр) в отдельных местах при достаточной прочности и целостности основной части изделия. **Общий износ** распространяется по всей поверхности изделия и делает его непригодным для дальнейшего использования.

Разрушение (полный износ) – это разрыв материала в результате нарушения его структуры.

Основными факторами изнашивания текстильных материалов являются следующие:

1. механические — истирание, фрикционный износ, усталость от многоцикловых воздействий, растяжения, изгиба, сжатия и др.;
2. физико-химические — действие света, атмосферы, воды, пота, химчистки, моющей жидкости, нагрева и др.;

3. биологические — разрушение микроорганизмами и повреждение насекомыми;

4. комбинированные — светопогода, стирка, истирание с усталостью и др. [68-70].

Старение текстильных материалов - понимают как понижение или полную потерю определённых эксплуатационных качеств материала. Это явление развивается во времени, происходит неизбежно и присутствует у всех без исключения материалов. Особенно важным эффект старения является для конструкционных материалов, поскольку от него напрямую зависит срок эксплуатации изделия, выполненного из этих материалов. Причины старения многообразны. Их можно разделить на внутренние и внешние источники и факторы старения.

Ввиду очевидной важности эффекта старения его исследованию посвящено огромное число работ. Так, при запросе в поисковике Российской государственной библиотеки по комбинации слов «старение материалов» было получено свыше 130 тысяч ссылок. На запрос «старение текстильных волокнистых материалов» было получено свыше 3 тысяч ссылок на все виды литературных источников. Среди них монографии, учебники, учебные пособия и сборники задач, лабораторные практикумы, сборники материалов научно-технических конференций всех уровней, кандидатские и докторские диссертации и статьи в журналах разного уровня, стандарты на проведение испытаний текстильных материалов, в том числе, и на их старение. Все это касается только ссылок на литературные источники на русском языке.

Среди этих работ есть работы, специально рассматривающие явление старения, и работы, в которых эти вопросы затрагиваются как актуальные и важные в связи с рассмотрением близких тем [71-74].

Внутренние причины старения связаны с физико-химическими процессами в самом материале, которые происходят даже при отсутствии эксплуатации и внешних воздействий, например, когда изделие из этого материала хранится в защищённом от внешних воздействий месте при благоприятных условиях

хранения. В этом случае материал практически не стареет, т. е. его старение происходит намного дольше плановых сроков использования, на которые было рассчитано изделие. Примером таких изделий могут служить элементы воинского оборудования на армейских складах, оснащённых системами кондиционирования и защиты от воздействий внешней среды.

Как правило, даже в условиях хранения не удастся избежать внешних воздействий на материал изделия. В условиях эксплуатации эти воздействия оказываются определяющими для старения материала. При этом воздействия на материал можно разделить две категории в зависимости от их длительности. Для **первой категории** характерным является длительное и стационарное по своим свойствам воздействие, интенсивность которого не меняется или мало меняется с течением времени. Такие воздействия происходят в так называемых нормальных условиях эксплуатации, не выводящих материал изделия за рамки допустимых ограничений.

Для **второй категории** воздействий характерными являются кратковременные интенсивные воздействия, существенно изменяющие, и, как правило, ухудшающие свойства материала [75, 76].

К числу внешних воздействий на текстильные материалы относят светопогоду:

- световое излучение от инфракрасной до ультрафиолетовой части солнечного спектра. Примером исследования в этой области может быть работа [77].

- температурные воздействия, обычно в диапазоне от – 40 до +60 градусов Цельсия, в котором, например, представлены изменения механических свойств атмосферостойкого оптически прозрачного поликарбоната после ускоренного и натурального климатического **старения**. Рассмотрены режимы старения: исходное **тепловое старение** при 80 °С в течение 500 ч; **тепловое старение** при 120 °С в течение 500 ч; **тепловое старение** при 140 °С в течение 100 ч; **тепловое старение** при 150 °С в течение 50 ч. В работе [78] составлены справочные данные по изменению механических свойств параарамидных нитей в процессе термического

старения; оценены возможные температурные пределы эксплуатации **старении** параарамидных нитей; полученные результаты использованы в выборе оптимальных условий переработки.

- воздействие влаги.

Вызванное этими воздействиями старение материала называют **тепловым старением**.

Другой вид старения связан с воздействием на природные, искусственные или синтетические полимеры, из которых построено вещество текстильных материалов, химических реагентов – кислот, щелочей, солей и др. - содержащихся в воздухе и влаге, среды. Такой вид старения называют **химическим старением**. В работе [79] рассмотрены изменения свойств волокон, тканей и изделий в процессе носки; загрязнение волокон, тканей, изделий; прием и подготовка изделий к обработке в растворителях; органические растворители, применяемые для мойки в методы оценки стойкости **текстильных материалов** к изнашиванию.

Для оценки стойкости **текстильных материалов** и изделий применяют опытную носку и моделированное изнашивание. А.Т. Серков [80] высказал гипотезы, что первопричиной **старения материалов** является самопроизвольно протекающий процесс кристаллизации или упорядочения аморфных зон волокон.

Третий вид старения связан с воздействием на материал электромагнитных полей и электрических зарядов, которые меняют структуру и свойства полимеров и вызывают эффекты старения. Такой вид старения называют электрическим старением.

Независимо от источника старения во всех случаях внешнего воздействия на текстильный материал происходит деструкция, т.е. необратимое изменение свойств полимеров, образующих материал, в основном, из-за окислительных процессов взаимодействия молекул полимеров с кислородом воздуха. Перечисленные выше внешние факторы усиливают эти процессы. Они приводят к ослаблению или разрыву химических связей между молекулами или внутри молекул, что, в конечном итоге, отражается в худшую сторону на свойствах текстильного материала. Академиком С.Н. Журковым была предложена

математическая модель старения, основанная на статистическом атомно-молекулярном энергетическом подходе. Энергия внешних воздействий разрушает связи между молекулами, что и приводит к деструкции. В зависимости от особенностей химического взаимодействия молекул процесс деструкции может идти с разной скоростью [81]. Теория и полученная на ее основе обобщенная формула энергии деструкции (формула Журкова) лежат в основе многих исследований экспериментального и теоретического характера необратимых процессов старения, износа и разрушения, в том числе, и волокнистых материалов и изделий из них.

В сборнике национальных стандартов [82] приведен стандарт на текстильные материалы и применяемую терминологию: **Старение полимерных материалов**. Термины и определения Взамен: ГОСТ 17050-71 4 с. (1) ГОСТ 31.010.01-84.

В работе [83] Шустов Ю.С. и Курденкова А.В. исследовали влияния различных методов обработки волокон «Русар» на изменение механических характеристик после воздействия светопогоды. В результате было установлено, что термообработанные волокна «Русар» имеют более упорядоченную структуру и более высокую прочность, а также устойчивость к свету и погодным условиям.

Обобщенный подход к методам математического моделирования и оптимальной обработки результатов ускоренных испытаний старения текстильных тканей, предназначенных для длительного хранения на складах, был разработан в диссертационной работе Е.И. Никитиных [84].

Рассмотрим более подробно методы и результаты, представленные в этой работе. В связи с большой трудоемкостью, длительностью и отсутствием возможности воспроизведения результатов натуральных испытаний текстильных материалов для изучения процессов старения, как известно, применяют методы ускоренных испытаний. Они основаны на увеличении интенсивности воздействия соответствующего внешнего фактора, что ведет к ускоренному старению образца материала. При этом открывается возможность проводить испытания сразу

нескольких (обычно пяти) образцов для получения более достоверной информации и оценки воспроизводимости результатов.

В качестве математической модели старения используется обобщенная экспоненциальная модель, представляющая собой сумму экспоненциально убывающих функций с различной скоростью убывания

$$P(t) = \sum_{j=1}^N A(j) \cdot \exp(-B \cdot t) \quad (1.1)$$

Экспоненциальный закон старения означает, что показатель материала, например, такой легко измеряемый как разрывная нагрузка образца при удлинении, со временем вследствие старения материала убывает по экспоненте. Скорость убывания определяется параметром B или набором этих параметров для суммы экспонент, а начальное значение показателя равно сумме множителей A при экспоненциальной функции. В работе предложен алгоритм и программная реализация для оптимального выбора этих параметров, обеспечивающих наилучшее согласие между результатами ускоренных испытаний по нескольким образцам исследуемой ткани.

Отметим, что экспоненциальный закон является, по-видимому, всеобщим для процессов старения, которому отвечают не только текстильные материалы и, в частности, ткани, но вообще любые функционирующие во времени системы.

Интересен вопрос о прогностической точности экспоненциальной модели. Для простоты ограничимся в модели только одной экспонентой, т.е. $N = 1$. Задача прогноза ставится следующим образом: предсказать время T_c , до которого показатель $P(t)$ сохранит значение, превышающее пороговое P_c . Это условие можно записать в виде

$$P(T_c) = A \cdot \exp(-B \cdot T_c) = P_c \quad (1.2)$$

Решая уравнение, получим

$$T_c = -\frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{A}\right) \quad (1.3)$$

Для продолжения анализа удобно ввести так называемое характерное время

старения, или постоянную старения, $T_p = 1 / B$, а вместо значений показателя в начальный момент времени $t = 0$, т.е. $P(0) = A$ и значений в текущий момент $P(t)$ ввести из безразмерное отношение $p(t) = P(t) / A$. Значение $P_c = p_c \cdot A$. Тогда формулу для прогнозирования перепишем в виде

$$T_c = -T_p \cdot \ln(p_c) \quad (1.4)$$

Оценим, насколько относительная ошибка прогнозирования зависит от относительной ошибки оценивания параметров экспоненты A и B .

$$\begin{aligned} \varepsilon(T_c) &= \left| \frac{\delta T_c}{T_c} \right| = \left| -\delta T_p \cdot \ln(p_c) - T_p \cdot \frac{\delta p_c}{p_c} / T_c \right| = \\ &= \left| -\frac{\delta T_p}{T_p} - \frac{\delta p_c}{p_c \cdot \ln(p_c)} \right| = \frac{\delta T_p}{T_p} + \left| \frac{\delta p_c}{p_c \cdot \ln(p_c)} \right| = \varepsilon(T_p) + \frac{\varepsilon(p_c)}{|\ln(p_c)|} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь символом δS для любой величины S обозначена абсолютная вариация этой величины. Таким образом, относительная ошибка прогнозирования времени достижения предельно допустимого уровня старения T_c равна сумме относительной ошибки оценивания постоянной времени старения и относительной ошибки уровня старения p_c , отнесенной к натуральному логарифму этого уровня. Например, если относительная ошибки оценки постоянной времени составляет 10%, т.е. $\varepsilon(T_p) = 0,1$, а $\varepsilon(p_c) = 0,05$, т.е. $< 5\%$, при $p_c = P_c / A = 0,5$ получим $\varepsilon(T_c) = 0,1 + 0,05 / \ln(0,5) = 0,17$.

Такая ошибка прогнозирования далеко не всегда является приемлемой: например, она означает, что прогнозируемое время хранения ткани $T_c = 25$ лет на самом деле может быть $T_{cmin} = T_c \cdot 0,83 = 20,8$ лет или, наоборот, $T_{cmax} = T_c \cdot 1,17 = 29,3$ лет. Такие погрешности в прогнозе могут приводить к большим финансовым и материальным издержкам.

По результатам оптимальной статистической обработки имевшихся данных об ускоренном старении получена точная модель прогнозирования характеристик старения текстильных материалов:

$$Y = 19,05 \cdot e^{-(0,00055 \cdot T + 0,000066 \cdot \varphi) \cdot \tau} + 80,95 \cdot e^{-(0,000091 \cdot T + 0,00011 \cdot \varphi) \cdot \tau}, \quad (1.6)$$

где T – температура, °C; φ – относительная влажность, %; τ – длительность

протекания старения, годы.

Эксперименты проводились для трех (1,2,3) различных условий протекания процесса старения (20 °С и 65%, 20 °С и 65%, 50 °С и 90%). Результаты показаны на (рис. 1.5).

На графиках представлены прогнозируемые допустимые сроки хранения и точные значения, рассчитанные по модели (1.6) в зависимости от значений следующих параметров:

- число моментов времени проведения измерений, или выемки образцов из климатической камеры (рис. 1.5а);

- число параллельных измерений значений показателя, т.е. число элементарных проб (полоски ткани по основе и утку) (рис. 1.5б);

- разброс значений, аналог случайной погрешности измерений (рис. 1.5в);

В экспериментах реализованы следующие варианты смещения:

1. Все точные значения увеличиваются (рис. 1.5г).
2. Все точные значения уменьшаются (рис. 1.5 д),
3. Величина смещения произвольная, увеличение или уменьшение точных значений (рис. 1.5е).

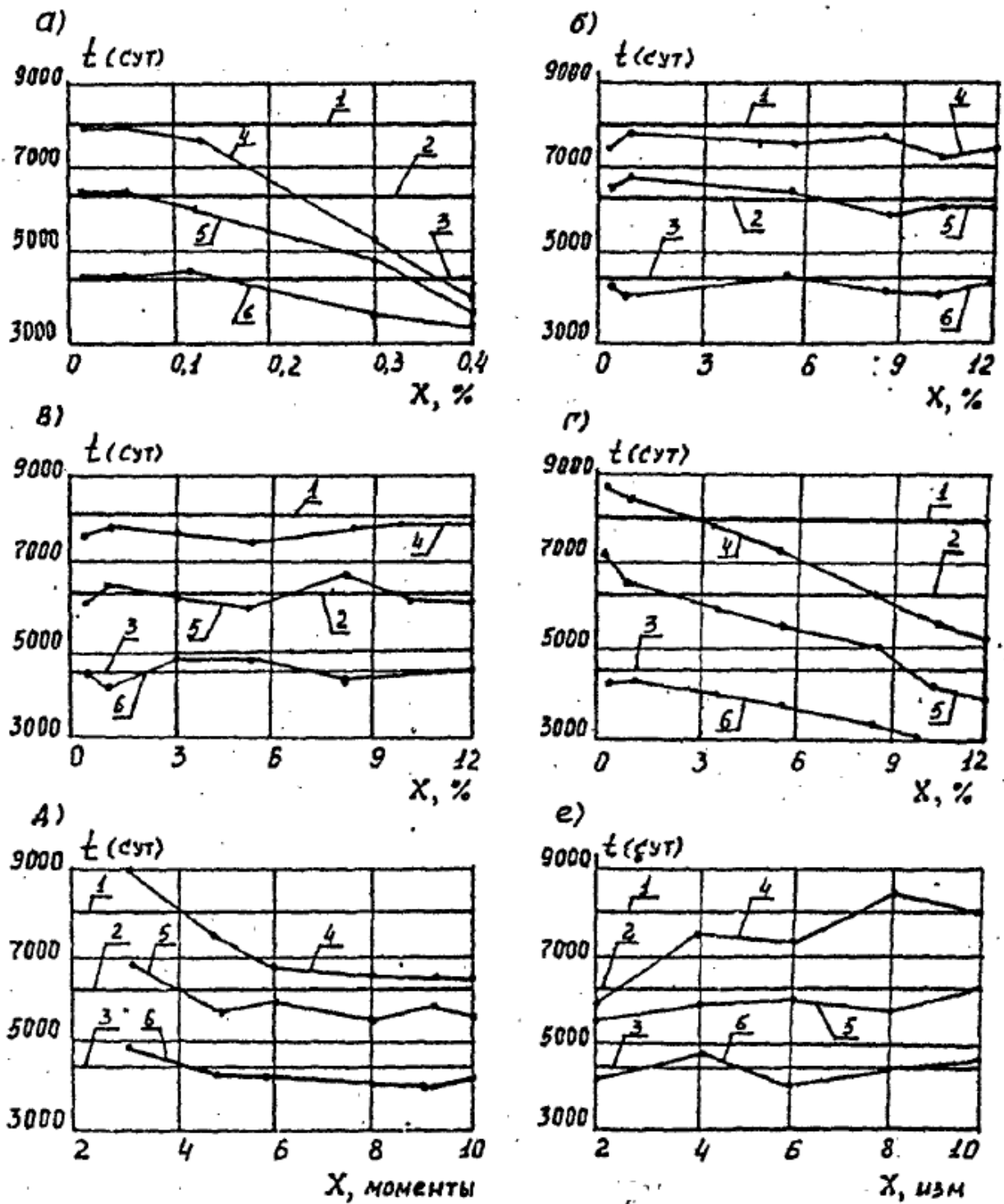


Рисунок 1.5 - Допустимые сроки хранения, рассчитанные: 1,2,3 по точной модели, 4,5,6 - прогноз для 1, 2 и 3 режимов

В таблице 1.3 представлены данные прогноза допустимых сроков хранения полиэфирной ткани.

Таблица 1.3 - прогноз по показателю разрывной нагрузки

Вид ткани	Климатический район				
	Умеренный	Отапливаемое хранилище	Очень жаркий сухой	Холодный	Теплый влажный
1. Полиэфирная:					
а) основа					
- Т экв (°С)	11,3	16,5	23,0	5,0	17,5
- t _{min} (годы)	21,2	24,7	14,2	36,2	12,2
б) уток					
- Т (°С)	10,3	16,5	23,0	3,5	17,0
- t _{min} (годы)	18,4	38,2	23,3	30,9	10,5
2. Из нитей СВМ:					
а) основа					
- Т (°С)	9,8	16,5	21,5	3,0	16,5
- t _{min} (годы)	10,1	12,8	9,5	15,1	6,7
б) уток					
- Т экв (°С)	11,0	16,5	21,5	4,5	17,0
- t _{min} (годы)	8,9	9,1	5,9	13,7	5,9

В таблице 1.4 для сравнения приведены данные по длительному хранению и результаты прогноза.

Таблица 1.4 - Оценка точности прогноза по изменению разрывной нагрузки после заданного числа циклов двойных изгибов

Вид ткани	Уровень сохранения показателя (%)	Время хранения (годы)		Ошибка прогноза
		на	прогноз	

		складе t	t_{cp}	$\delta = \frac{t - t_{cp}}{t} \cdot 100$ (%)	
1	2	3	4	5	
1. Полиэфирная - основа	51,5	13	T = 10 °C 13,6	4,6	
	58,2	10	11,2		
	72,1	5	7,0		
	- уток	37,8	13	T = 10 °C 13,9	7,0
		46,8	10	11,1	11,0
		65,2	5	6,7	34,0
2. Фенилоновая - основа	40,0	-	T = 8 °C 14,0	23,0	
	54,0	13	10,0		
	70,0	-	6,6		
	- уток	40,0	-	T = 8 °C 12,0	15,4
		47,0	13	11,0	
		70,0	-	6,3	
3. Полиамидная - основа	40,0	-	T = 8 °C 13,6	7,6	
	62,0	11	12,2		
	80,0	-	7,0		
	- уток	40,0	-	T = 8,5 °C 13,5	8,1
		54,0	11	10,1	
		80,0	-	7,0	

1.3 Истирание текстильных материалов

Истирание — это разрушение материала под действием внешнего трения о другие поверхности. Истирание сопровождается уменьшением массы, поскольку с поверхности материала отделяются частицы. Истирание происходит в большинстве случаев изнашивания, а иногда является основной причиной износа текстильного материала [68-70].

Исследования стойкости материалов к истиранию регламентированы стандартами ГОСТ 18976-73 «Ткани текстильные. Метод определения стойкости к истиранию» [85] и ГОСТ 9913-90 «Материалы текстильные. Методы определения стойкости к истиранию» [86] в зависимости от состава материала. ГОСТ 18976-73 распространяется на хлопчатобумажные, льняные, шелковые

ткани, а также ткани из химических волокон и нитей. Стойкость ткани к истиранию характеризуется числом циклов вращения головки прибора, выдерживаемых тканью до ее разрушения. ГОСТ 9913–90 распространяется на чистошерстяные и полушерстяные ткани и нетканые полотна различных способов производства из волокон всех видов.

Когда речь идет о текстильных материалах для защитной одежды, то используют ГОСТ Р 51552-99 «Материалы текстильные. Методы определения стойкости к истиранию текстильных материалов для защитной одежды», который устанавливает два метода определения стойкости к истиранию текстильных материалов:

- 1) метод для определения стойкости к истиранию до разрушения структуры текстильных материалов;
- 2) метод для определения стойкости к истиранию до заданного числа циклов истирания.

В рамках исследований по стойкости основных нитей к истирающим воздействиям в работе [87] авторы Цыбикдоржиева А.В., Юхин С.С. предложили усовершенствовать прибор ИПП, поскольку в работе было установлено, что для объективной оценки выносливости нитей основы к истиранию необходимо использовать устройства, имитирующие процесс воздействия берда и ремизной рамы на нити.

Проф. Шустов Ю.С. и др. исследовали влияние истирающих воздействий на механические свойства мебельных тканей с учетом волокнистого состава их образцов и, таким образом, выявили образцы, обладающие наилучшими показателями [88]. Исследуемые ткани были выработаны жаккардовым переплетением и отличались плотностью по основе и утку, а также линейной плотностью нитей. Авторами получены математические зависимости разрывной нагрузки, разрывного удлинения и раздирающей нагрузки от количества циклов истирания.

Истирание проводилось на приборе «WearTester», а разрывные характеристики текстильных полотен определялись на разрывной машине

Инструмент. Установлено, что с увеличением числа циклов истирания разрывная нагрузка уменьшается.

Поскольку при эксплуатации ткани подвергаются местным повреждениям, то для оценки этих повреждений определяется прочность при раздирании. Для проведения испытаний на раздирание применялись метод гвоздя и с одним продольным надрезом. Установлено, что раздирающая нагрузка при использовании метода гвоздя выше, чем при раздирании образцов с одним надрезом.

Вопросами истирания занимался также профессор Юхин С.С. с группой исследователей. В работе [89] были изучены многоцикловые истирающих воздействий на арамидные нити с использованием стандартной методики и усовершенствованной установки, имитирующей процесс ткачества. Результаты испытаний приведены в таблице 1.5. Полученные результаты могут быть использованы при оценке технологической способности нитей к переработке на ткацком станке.

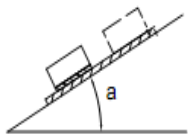
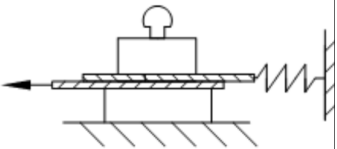
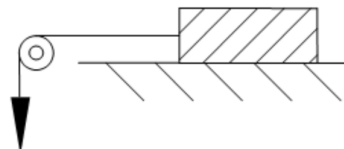
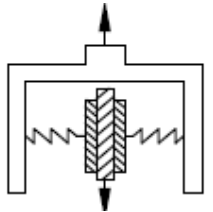
Таблица 1.5 – Результаты испытаний арамидных нитей

Наименование вида испытания	Среднее количество циклов до разрушения		
	Русар 29,4 текс	Русар 58,8 текс	Тварон 110 текс
Истирание в «петле»	247	995	866
Истирание «о галево»			
- галева с паяным глазком	2480	2887	2773
- пластинчатые галева	397	533	677
Истирание «о бердо»			
- бердо отечественное	4700	317	7020
- бердо зарубежное	8536	7525	19621

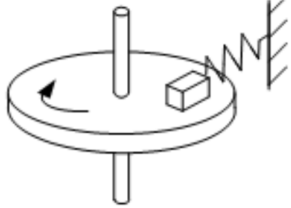
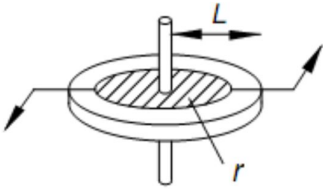
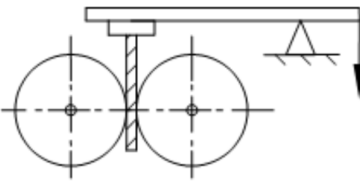
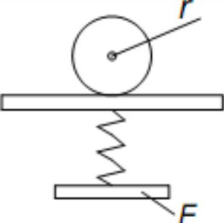
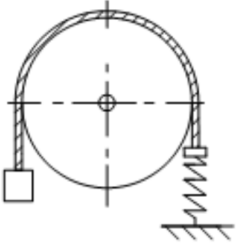
Важнейшими факторами, которые определяют свойства текстильных волокнистых материалов, являются трение и цепкость волокон. Их изучение и

измерение - это нетривиальная задача, отличающаяся от аналогичных задач для других материалов. Вороновой Л.В., Смирновой Н.А., Флегонтовым А.Н. в статье [90] дан сравнительный анализ существующих методов для определения трения и цепкости текстильных полотен (таблице 1.6).

Таблица 1.6 - Методы для определения трения и цепкости текстильных полотен

№	Группа	Схема испытаний	Измеряемая характеристика	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4	5	6
1	I		- КТС (коэффициент тангенциального сопротивления) покоя - КТС движения	простота конструкции устройства	- отсутствие постоянства давления каретки - невозможность изучения трения при разных скоростях скольжения
2	I		- сила трения покоя - сила трения движения	- возможность регистрации изменения силы - постоянное давление - постоянная скорость приложения нагрузки	- несоответствие условий эксперимента реальным деформационным условиям - невысокая точность измерений
3	I		КТС движения	- простая реализация метода - постоянное давление	несоответствие условий эксперимента реальным деформационным условиям
4	I		КТС движения	- постоянная регулируемая скорость перемещения образцов - возможность экспериментировать с тремя различными пробами	малые размеры проб

Продолжение табл. 1.6

1	2	3	4	5	6
5	II		сила тангенциального сопротивления	- постоянное давление - возможность изменения скорости перемещения образцов	- малые размеры проб - разная скорость вращения при перемещении относительно центра
6	II		КТС покоя	- точное определение перемещения плоскостей - возможность изменения скорости перемещения проб - постоянное давление	малые размеры проб
7	III		- максимальная сила трения покоя - максимальная сила трения движения - КТС покоя / движения	- постоянное давление - постоянная скорость приложения нагрузки - универсальность	- соприкосновение образцов по линии - неудобство в закреплении проб
8	III		КТС движения	близость испытаний к технологическим и эксплуатационным	- узкие пробы - переменное давление
9	IV		КТС покоя	- близость испытаний к технологическим и эксплуатационным - постоянная скорость приложения нагрузки	переменное давление по образующей шкива

Примечание. Группы приборов и методов: I – поступательное перемещение, II – вращательное перемещение, III – плоскость соприкасается с образующей цилиндрической поверхности при вращательном движении

последней (и в отдельных случаях при перемещении первой), IV – две цилиндрические поверхности соприкасаются при их относительном перемещении.

Анализ показал, что большинство методов далеки от реальных деформационных процессов, происходящих в процессе изготовления и эксплуатации швейных изделий. Поэтому необходима разработка новых методов оценки трения и цепкости текстильных полотен, которые позволят обеспечить высокую точность измерения и расширят метрологические возможности приборов.

1.4 Деформация текстильных материалов

В процессе производства и эксплуатации текстильные материалы подвергаются **деформациям**. Различают деформации сдвига, кручения, изгиба, растяжения, сжатия [68-70].

Сдвигом называется смещение, при котором материал, имеющий некоторую толщину, под действием внешних сил равномерно смещается в каком-либо своем слое, оставаясь при этом параллельным по отношению к другому слою, расположенному ниже него. Деформация сдвига в чистом виде происходит в текстильных изделиях сравнительно редко.

Волокнам и нитям приходится испытывать *деформации кручения* при формировании первичных и вторичных нитей. В то время как текстильные изделия, в особенности мерные, довольно редко испытывают значительные деформации кручения. Поэтому исследования деформации данного типа для изделий проводятся нечасто. Некоторые виды изделий (например, пожарные рукава) иногда испытывают на многократное закручивание— раскручивание. Закручивание полосок мерных изделий проводят для определения их сминаемости.

Текстильные полотна и другие изделия, состоящие из волокон или нитей, обладают малым сопротивлением к *изгибу*. Вследствие гибкости они обычно располагаются не прямолинейно, а изогнуто. В процессах прядения и при

изучении геометрических свойств волокон и нитей их приходится специально распрямлять. В то же время при выработке готовых изделий (например, одежды), текстильные полотна нередко приходится изгибать. В изогнутом состоянии находятся швейные нитки, которыми сшивают части различных изделий. Многие крученые изделия (канаты, веревки и другие) постоянно подвергаются изгибу. Но если изгиб приводит к смятию изделий, то он является нежелательным.

Текстильные материалы чаще всего подвергаются *деформации растяжения*. Она возникает, если к образцу текстильного материала приложить нагрузку меньше, чем разрывная, и проявляется эта деформация в удлинении нагружаемого образца в направлении приложения нагрузки. Как правило, удлинение образца при его растяжении сопровождается одновременным сжатием в поперечном направлении. Поэтому при исследовании растяжения текстильных материалов, в особенности, двумерных материалов, например, образцов тканых полотен, для описания деформации необходимо использовать тензоры как естественный математический инструмент описания деформации материала.

Большинство текстильных изделий легко деформируется *сжимающими силами*, уменьшая при этом свою толщину без существенных изменений размеров по ширине и длине. Это является следствием того, что во всех текстильных конструкциях значительный объем занимает воздух.

В работе [91] Лисиенковой Л.Н. и Кирсановой Е.А. были изучены деформационные свойства материалов. Для проведения испытаний построен оригинальный прибор, позволяющий получать условные составляющие деформации, варьируя количество циклов, время нагружения и отдыха. С помощью данного устройства проведено исследование материалов разных волокнистых составов и способов производства. Установлено, что свойства материалов при сжатии зависят в первую очередь от волокнистого состава, структуры материала, параметров деформирования и предыдущих воздействий.

В работе [92] Щербакова В.П. и Скулановой Н.С. рассмотрены вопросы деформирования и прочности нитей и текстильных полотен. Авторы приводят геометрические и математические модели, отражающие структуру нити и пряжи.

В работе проведен расчет упругих модулей и прочности крученой нити методами теории упругости анизотропного тела. Дан расчёт упругих постоянных, вычислены деформации трикотажных полотен; на основе геометрически нелинейной теории упругой нити проведено моделирование формы.

В статье [93] Чагиной Л.Л., Смирновой Н.А., Вершининым А.В. обоснована необходимость оценки деформационных свойств льняных трикотажных полотен с учетом величины вынужденной эластичности. Характеристики исследуемых трикотажных полотен приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Характеристики исследуемых трикотажных полотен

Номер образца	Переплетение	Поверхностная плотность, г/м ²	Растяжимость при нагрузках, меньших разрывных, %		Обратимая деформация при растяжении, %		Необратимая деформация при растяжении, %	
			по длине	по ширине	по длине	по ширине	по длине	по ширине
1	гладь	250	27	46	70	61	30	39,0
2	одинарное пресовое рисунчатое	352	43	38	54	70,0	46	30,0
3	одинарное ажурное	376	60	48	58	43,0	42	57,0
4	двойное комбинированное пресовое	446	29	47	63	42,5	37	57,5
5	комбинированное неполное пресовое	343	28	57	72	62,0	28	38,0
6	ластик 1+1	480	30	90	49	20,0	51	80,0
7	одинарный полуфанг	172	55	32	60	68,0	40	32,0
8	одинарное ажурное	228	69	41	63	59,0	37	41,0
9	одинарное ажурное	230	43	48	71	73,0	29	27,0
10	комбинированный репс	456	31	75	83	81,0	17	19,0
11	двойное комбинированное пресовое	316	48	40	76	62,0	24	38,0

Разработана градация льняных трикотажных полотен по степени

растяжимости и предложены минимальные величины конструктивных прибавок для плечевой одежды (таблице 1.8).

Исследования показали, что с увеличением модуля петли растяжимость льняных трикотажных полотен при нагрузках, меньших разрывных, возрастает (рис. 1.6а). С уменьшением модуля петли доля обратимых деформаций растяжения увеличивается до значения, выше которого значения обратной деформации стабилизируются (рис. 1.6б). Определены рациональные интервалы значений модуля петли, обеспечивающие проектирование качественного трикотажа и экономичный расход сырья (таблице 1.9).

Таблица 1.8 - Градация льняных трикотажных полотен по степени растяжимости и величины конструктивных прибавок для плечевой одежды

Группа растяжимости	Растяжимость полотна, %	Рекомендуемая величина прибавки, см
Малорастяжимые	20..40	3..4
Среднерастяжимые	40..70	1..2
Растяжимые	70..100	0
Высокорастяжимые	> 100	отрицательная

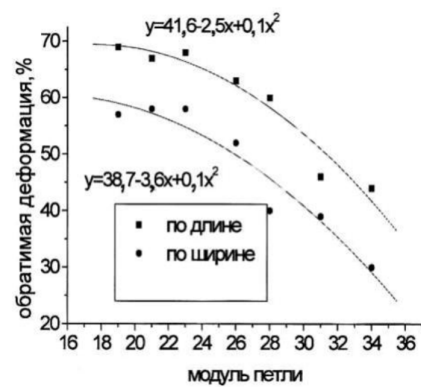
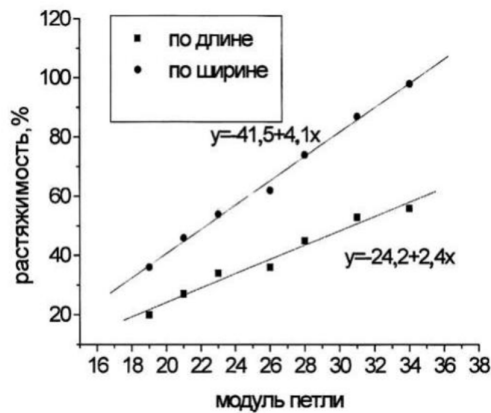


Рисунок 1.6 - Исследования модуля петли

Таблица 1.9 – Рациональные интервалы значений модуля петли

Переплетение	Рекомендуемый линейный модуль петли
гладь	19..21
ластик 1+1	20..22
комбинированный репс	23..24

В статье [94] Смирновой Н.А. и др. определена способность льняных костюмно-платьевых тканей к изменению угла между нитями основы и утка, характеризуемая усилием сдвига. Установлена зависимость усилия сдвига от коэффициента связности нитей в переплетении, позволяющая прогнозировать способность льняных тканей к формообразованию по переплетению и проектировать льняные костюмно-платьевые ткани с заданными свойствами:

$$P = 0,119C + 1,116 \quad (1.7)$$

где C – коэффициент связности нитей в переплетении.

Профессором Щербаковым В.П. в течение многих лет разрабатывается направление оценки жесткости нитей при различных видах деформаций, основанное на нелинейной аналитической механике одномерных материалов. В работе [95] предложен новый метод определения жесткости нити на изгиб. В среде MathCAD решены уравнения, полученные на основе измерения прогиба нитей по предлагаемой модели (рис. 1.7).

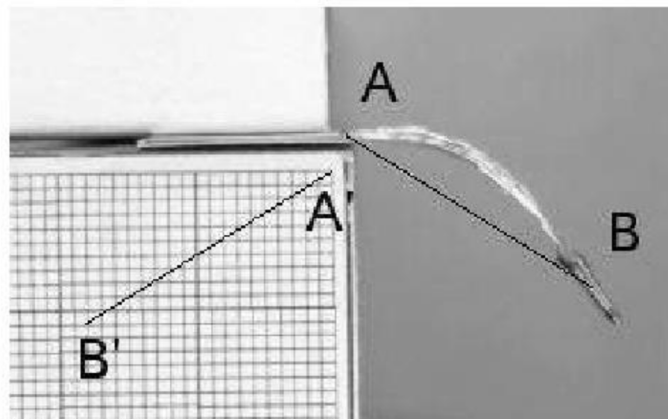


Рисунок 1.7 - Фотография изогнутой нити

Б. Некрашевич, В.Г. Тиранов, А.В. Постников экспериментальным способом получили результаты по влиянию влаги и динамической нагрузки на деформационный процесс в капроновых комплексных нитях, которые используются в кордных тканях [96]. Кордные ткани являются армирующим элементом в процессе формирования автомобильных шин. В качестве объекта исследования была выбрана комплексная нить из капрона с толщиной T124. Установлено, что при одновременном действии влаги и напряжения происходит протекание в образцах двух параллельных процессов пластификации, что приводит к возрастанию жесткости образца при больших напряжениях независимо от влагосодержания.

Если в процессе производства полимерных нитей нарушен технологический режим, то в нитях могут возникать напряжения, которые ускорят старение материала. Композиционный материал, изготовленный на основе иглопробивных нетканых полотен, представляет собой систему, состоящую из хаотически расположенных волокон и связующего, которое после полимеризации обеспечивает монолитность композита. Деформация единичного волокна неизбежно повлечет за собой деформацию нетканого полотна в целом. В работе [97] Трещалиным Ю.М. осуществлен анализ напряженно-деформированного состояния волокнистой основы композиционного материала, обусловленного полимеризацией связующего. Получены зависимости, позволяющие определить возникающие в волокнах напряжения и деформации, что позволяет более рационально использовать различные виды волокон при изготовлении композитов.

1.5 Разрывные характеристики как показатель прочности текстильных материалов

Вопросы прочности текстильных материалов исследовались многими учеными как теоретически, так и практически. Основным показателем прочности является разрывная нагрузка.

Исследования разрывных характеристик материалов производятся в соответствии с ГОСТ 3813 – 72 «Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении» [98]. Данный стандарт распространяется на текстильные ткани из волокон и нитей всех видов и устанавливаются методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

Разрывные характеристики определяют качество и надежность текстильных изделий. В статье [99] проф. Кирюхина С.М. и др. даны следующие определения понятий качества и надежности:

Качество – это совокупность свойств продукции (материала), обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Надежность - способность материала (изделия) выполнять заданные функции, сохраняя свои показатели в заданных пределах в течение требуемой наработки.

Также в работе [99] предложены методы сравнительной оценки качества и надежности тканей для спецодежды. В качестве исследуемых были выбраны следующие показатели: разрывная нагрузка, прочность при раздирании и стойкость к истиранию по плоскости.

В работе [100] Шустов Ю.С., Курденкова А.В., Бернштейн Н.С. получили математическую модель, позволяющую прогнозировать разрывную нагрузку трикотажных полотен в зависимости от количества циклов истирающих воздействий и параметров строения.

Другой подход к исследованию разрывной нагрузки предложен Ломакиной И.А., Грузинцевой Н.А., Гусевым Б.Н. в работе [101]. Подход заключается в том, что вводятся стандартные уровни для сравнения полученных в результате экспериментов значений с эталонными.

Существует ряд задач, в которых требуется исследовать экстремальные ситуации, определить разрывную нагрузку, приводящую к разрушению материала. К таким задачам относится исследование тканей для бронежилетов,

проведенное в работах [102, 103]. В данных работах проф. Шустов Ю.С. и др. изучили, как меняются разрывная нагрузка и разрывной удлинение тканей в зависимости от влажности, а также исследовали влияние структурных характеристик на разрывную нагрузку параарамидных тканей различных артикулов и переплетений, выработанных из нитей Русар.

Исходные и расчетные характеристики исследуемых тканей приведены в таблице 1.10. W - влажность воздуха; Q - разрывная нагрузка параарамидной ткани после изменения влажности воздуха; $Q_{исх}$ - разрывная нагрузка параарамидной ткани при влажности 20%; T_o , T_y - линейная плотность нити основы и утка; P_o , P_y - плотность ткани по основе и утку; M' - поверхностная плотность ткани; η_1 - безразмерный показатель, характеризующий влияние влажности воздуха на разрывную нагрузку ткани; η_2 - безразмерный показатель, характеризующий структурные характеристики тканей.

Таблица 1.10 – Характеристики исследуемых тканей

Артикул ткани	W , %	Q , Н	$Q_{исх}$, Н	$\frac{Q}{Q_{исх}}$	T_o , текс	T_y , текс	P_o , нитей /10 см	P_y , нитей /10 см
11938, полотняное переплетение	20	3160	3160	1,000	64,0	64,0	130	130
	40	2681	3160	0,848	64,0	64,0	130	130
	60	3321	3160	0,734	64,0	64,0	130	130
	65	2235	3160	0,707	64,0	64,0	130	130
	80	2032	3160	0,643	64,0	64,0	130	130
11939, саржевое переплетение	20	4859	4859	1,000	32,5	32,5	219	218
	40	4061	4859	0,836	32,5	32,5	219	218
	60	3409	4859	0,702	32,5	32,5	219	218
	65	3348	4859	0,689	32,5	32,5	219	218
	80	3252	4859	0,689	32,5	32,5	219	218
Артикул ткани	M' , г/м ³	η_1	η_2	$Q_{расч}$, Н	Отклонение, %	-	-	-
11938, полотняное переплетение	165,00	1,007	1,278	3207,1	1,49	-	-	-
	165,00	0,825	1,234	2626,6	2,03	-	-	-
	165,00	0,718	1,241	2287,0	1,47	-	-	-
	165,00	0,697	1,251	2219,0	0,67	-	-	-
	165,00	0,643	1,268	2046,0	0,69	-	-	-
11939, саржевое переплетение	148,98	1,007	1,249	4903,3	0,91	-	-	-
	148,98	0,825	1,126	4015,8	1,11	-	-	-
	148,98	0,718	1,168	3496,6	2,57	-	-	-
	148,98	0,697	1,154	3394,1	1,38	-	-	-
	148,98	0,643	1,095	3128,2	3,81	-	-	-

Авторами получена математическая модель, позволяющая прогнозировать разрывную нагрузку параарамидных тканей в зависимости от влажности воздуха, условий испытания и параметров строения образцов:

$$Q = Q_{исх} (-0,263 \ln(W) + 1,795) \left(\frac{\left(\frac{T_y \Pi_y M'}{T_0 \Pi_0 \rho l} \right)}{0,942 \left(\frac{T_y \Pi_y M'}{T_0 \Pi_0 \rho l} \right) + 0,0639} \right), \quad (1.8)$$

где ρ – плотность вещества, мг/мм³; l – зажимная длина, мм.

Проф. Шустовым Ю.С. и др. были исследованы разрывная нагрузка, разрывное удлинение, раздирающая нагрузка образцов мебельных тканей [104]. Предложена методика комплексной оценки механических свойств мебельных тканей, позволяющая наиболее полно оценить качество изделий по данной группе свойств. В работе [105] исследована зависимость разрывных характеристик параамидных нитей от светопогоды. Разрывные характеристики нитей определялись в соответствии с ГОСТ 6611.2 – 73 [106]. Установлено сильное влияние светопогоды, а именно агрессивное действие тепла и влаги (раствора перекиси водорода), которые вызывают необратимые процессы, приводящие к механическому и структурному старению исследуемых нитей и, следовательно, к снижению качества изделий из них.

Множество факторов влияет на процессы разрушения и старения. Волокна утрачивают свои свойства, например, под действием высоких температур [107]. Результаты исследований, полученных Ноздриной Н.А., Мошковой А.В., Слугиным А.И., приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 - Исследование действия высоких температур на разрывную нагрузку термостойких арамидных волокон

Арамидное волокно	Зависимость разрывной нагрузки волокон от температуры	Максимальные значения температуры, при
-------------------	---	--

		которых прочностные свойства волокон не ниже нормативных, °C
Кермель ("Рон-ПуленТекстиль", Франция)	$P = -8,08 + 0,148 T - 0,0003 T^2$	246,7
Ленцинг ("Lenzing Plastics", Австрия)	$P = -14,43 + 0,168 T - 0,0003 T^2$	280,0
Кевлар ("DuPont", США)	$P = -7,69 + 0,274 T - 0,0005 T^2$	274,0
Русар (ОАО "Каменскхимволокно", Россия)	$P = 17,37 + 0,151 T - 0,0003 T^2$	252,0
Херакрон ("KOLON Industries", Южная Корея)	$P = 33,2 + 0,069 T - 0,0001 T^2$	345,0
Тварон тип 2010 ("Тейджин", Нидерланды-Япония)	$P = 32,08 + 0,103 T - 0,0002 T^2$	257,5
Тварон тип 1072 ("Тейджин")	$P = 31,74 + 0,159 T - 0,0003 T^2$	266,5

Установлено, что высокие температуры не влияют на равномерность разрывной нагрузки исследуемых образцов.

Примером многофакторной задачи исследования текстильных материалов является задача об исследовании прочности бронежилетов, решенная Анисимовым Д.И., Кузнецовым М.Ю., Кирюхиным С.М. в работе [108]. Авторы статьи систематизировали показатели, которые могут быть использованы для оценки качества тканей для бронежилетов (таблица 1.12). Эта же методика с применением причинно-следственных схем была использована в работе [109] для анализа показателей качества парашютных тканей.

Таблица 1.12 – Показатели, влияющие на качество тканей для бронежилетов

Группа показателей	Показатели
1	2
Показатели безопасности	- устойчивость к прожиганию - гигроскопичность - электризуемость - водоупорность
Характеристики строения	- поверхностная плотность

	<ul style="list-style-type: none"> - волокнистый состав - пористость
Показатели назначения	<ul style="list-style-type: none"> - прочность к прокалыванию и прорезанию - прилипание материала к средству поражения - скорость 50% непробития
Показатели надежности	<ul style="list-style-type: none"> - стойкость к действию светопогоды - стойкость к истиранию - раздирающая нагрузка - разрывная нагрузка - осыпаемость - удлинение при разрыве - раздвигаемость нитей
Эргономические показатели	<ul style="list-style-type: none"> - жесткость - воздухопроницаемость - сминаемость - пылепроницаемость - устойчивость окраски - загрязняемость - паропроницаемость

Для исследования влияния нестационарных воздействий на текстильное волокно или нить разработана математическая модель, позволяющая с высокой степенью точности прогнозировать нагрузку при прорезании нетканых полотен в зависимости от времени инсоляции, условий испытаний и параметров строения [110]:

$$Pp = Pp_1(-0,009t + 1,000) \left(\frac{\left(\frac{v}{ml} \right)}{3,708 \left(\frac{v}{ml} \right) - 0,684} \right) \left(\frac{\left(\frac{M'T_B}{\rho_B} \right)}{50,588 \left(\frac{M'T_B}{\rho_B} \right) - 77,291} \right) \quad (1.9)$$

Здесь: Pp_1 – нагрузка при прорезании до инсоляции, Н; v – скорость растяжения, мм/мин; m – масса груза предварительного натяжения, г, $m=100$ г; l – зажимная длина, м, $l = 100$ мм; M' – поверхностная плотность нетканого полотна, г/м²; T_B – линейная плотность, текс; ρ_B – средняя плотность волокон, г/см³; $\rho_B = 0,92$ г/см³.

В настоящее время широко применяются параарамидные нити. В процессе эксплуатации они чаще всего подвергаются механическим воздействиям. Для

получения разрывных характеристик нитей нередко применяют их растяжение с завязыванием посередине образца узла и с заправкой в каждый зажим разрывной машины не одного, а двух отрезков нити в виде входящих одна в другую петель. В статье [111] получены зависимости механических свойств от скорости движения зажима разрывной машины для параарамидных нитей Русар.

В работе [112] Ишматовым А.Б. и Балабаевым П.С. были проведены статические испытания на растяжение образцов одиночных и трощеных нитей натурального шелка. Результаты испытаний представлены в таблице 1.13.

Установлено, что момент разрыва шелковых нитей лежит далеко за пределами упругой зоны. Поэтому были проведены испытания на растяжение групп, состоящих из 2, 3, 4, 6 и 8 нитей линейной плотностью 2,3 текс (таблица 1.14).

Таблица 1.13 – Результаты испытания на растяжение образцов одиночных и трощеных нитей натурального шелка

Нить	Разрывная нагрузка		Разрывное удлинение	
	среднее значение, сН	коэффициент вариации, %	среднее значение, %	коэффициент вариации, %
2,33 текс	99,27	9,60	10,44	24,87
3,23 текс	179,33	53,11	12,91	47,16

Таблица 1.14 – Результаты испытания на растяжение групп, состоящих из нескольких шелковых нитей

Число нитей в группе	Разрывная нагрузка			Равномерное удлинение		Разрывное удлинение	
	среднее значение, сН	в расчете на 1 нить, сН	среднее значение, %	среднее значение, %	коэффициент вариации, %	среднее значение, %	коэффициент вариации, %
2	234,5	117,8	8,12	10,6	23,60	12,7	13,54
3	311,3	104,3	10,25	9,8	18,32	12,9	9,33
4	375,9	94,3	6,44	9,1	20,42	13,0	13,87
6	690,6	102,5	7,37	8,8	15,34	12,9	10,45
8	843,4	105,4	6,41	9,3	15,55	13,6	7,63

Предложено моделировать механические свойства шелковых нитей, используя два независимых параметра: разрывное удлинение и толщину нити. Эти параметры моделируются независимыми случайными функциями. А разрывную нагрузку нити предлагается вычислять линейным интерполированием диаграммы растяжения:

$$P = S(a + b\varepsilon) \quad (1.10)$$

где P – разрывная нагрузка; S – толщина нити; ε – разрывное удлинение; a и b – постоянные, определяемые интерполированием.

Выводы по первой главе

В результате анализа существующих работ по исследованию процессов старения, износа и разрушения текстильных волокнистых материалов можно сделать следующие выводы:

1. Проблема изучения причин старения текстильных материалов, их износа, истирания и разрушения являются одной из наиболее актуальных задач текстильного материаловедения, поскольку именно эти явления в первую очередь и обуславливают выход из строя и сокращение сроков эксплуатации изделий из текстиля. Поэтому актуальной является комплексная проблема изучения свойств и поведения волокнистых материалов под действием всевозможных внешних факторов и внутренних воздействий, приводящих к постепенной деструкции, разрушению, старению, износу материала.

2. В отличие от изучения ряда наиболее популярных физико-механических характеристик волокнистых материалов, исследование перечисленных процессов, происходящих с изделиями из волокон и самими волокнами, является труднейшей задачей, поскольку все эти процессы необратимы, носят сугубо вероятностный, статистический характер. Из-за большого числа источников и причин, влияющих на возникновение этих процессов и их развитие, и их продолжительности (от нескольких дней до нескольких десятков лет) методы

натурного экспериментирования оказываются весьма трудоемкими, дорогостоящими и малоинформативными.

3. Проведение натуральных экспериментов с образцами реальных изделий дает достаточную информацию для разработки и эксплуатации изделий в отдельных частных случаях, что является их преимуществом перед другими методами. В то же время натурные эксперименты являются дорогостоящими, поскольку они требуют затрат на аппаратуру, достаточное количество образцов испытываемых изделий и затрат времени. Они не дают полную картину о свойствах и поведении текстильных материалов, а позволяют установить частные закономерности и эмпирические зависимости для конкретных образцов. Распространение полученной информации и выводов из нее на классы образцов остается проблематичным и требует дополнительных исследований. Поэтому метод натурного экспериментирования можно оценить как недостаточный, и актуальной остается задача разработки новых методов и подходов к исследованию этой проблемы.

4. Альтернативным вариантом решения обозначенной проблемы является метод компьютерного моделирования, который при современном уровне развития вычислительной техники и средств программирования позволяет создать сложные компьютерные модели, в комплексе имитирующие поведение различных текстильных материалов под действием нагрузок при проектировании и эксплуатации. Открывается возможность преодолеть трудности и недостатки, связанные с натурным экспериментом.

5. Среди всех существующих методов компьютерного моделирования как частного случая математического моделирования, наиболее перспективным является метод компьютерной статистической имитации. Это объясняется тем, что все текстильные материалы состоят из волокон или нитей, которые по своей природе обладают большим разбросом свойств, а так же и структурой многих текстильных материалов, которая приводит к статистическому разбросу характеристик. Именно метод статистической имитации максимально приспособлен к изучению такого рода сложных систем. Существующий опыт

применения этих методов к решению аналогичных проблем в области исследования текстильных волокнистых материалов позволяет считать их перспективными. На основе этих методов могут быть разработаны новые модели, адаптированные к решению поставленных задач.

6. Анализ существующих работ показал, что метод компьютерной статистической имитации, широко применяемый для моделирования различных организационных систем, технических систем и ряда процессов переработки текстильных и волокнистых материалов, практически не применялся для исследования процессов истирания, износа и разрушения текстильных материалов. Анализ литературных источников показал, что развитие этих методов исследования текстильных волокнистых материалов по своей природе принципиально отличается от решения аналогичных задач для других материалов, например, полимеров, металлов и подобных им материалов, которые можно рассматривать как сплошные деформируемые среды.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСТИРАНИЯ И ТРЕНИЯ МАТЕРИАЛА

2.1 Динамическая модель истирания материала

В процессе пользования и с течением времени изделия из текстильных материалов теряют свои эксплуатационные качества. Если такие воздействия, как окружающая среда и светопогода сказываются на свойствах материала в целом, то механические воздействия носят, как правило, локальный характер по месту и времени действия [3, 6, 7, 68, 70, 113-116]. Однако, таких воздействий обычно бывает достаточно, чтобы изделие было признано непригодным для дальнейшей эксплуатации. На одном из первых мест в списке таких воздействий стоит истирание участков тканых полотен при трении друг о друга или о поверхность другого изделия.

Понимание важной роли процесса истирания привело к созданию приборов и методик для исследования стойкости текстильных изделий к истиранию. Приборы в ускоренном режиме осуществляют циклический процесс истирания образца текстильного полотна (ткани, трикотажа, нетканого, композитного материала) эталонным материалом (обычно это участок специальной суконной ткани) [85]. В процессе испытания отслеживается потеря массы испытуемого образца в зависимости от числа циклов. Циклы продолжаются до сквозного протирания образца, т.е. появления в нем дыры. Число циклов измеряется тысячами и десятками тысяч. Каждый опыт может продолжаться несколько дней. При этом получаемые данные носят эмпирический характер, т.к. их весьма не просто связать со свойствами волокон и структурой исследуемых полотен. Даже для построения адекватных эмпирических, например, регрессионных моделей требуется провести эксперимент с большим числом опытов, предполагающий варьирование различных факторов, например, видов пряжи или переплетения ткани.

Альтернативным методом исследования истираемости текстильных полотен является метод математического моделирования процесса истирания. Некоторые

результаты, полученные на построенных авторами моделях, изложены в [13-18]. В отличие от других видов износа характерным признаком истирания является потеря элементами стираемого участка полотна части волокнистой массы. При этом, как правило, происходит изменение структуры стираемого участка ткани, которое, в свою очередь, отражается на интенсивности дальнейшего истирания [3].

Таким образом, истирание ткани представляет собой динамически развивающийся процесс с изменяющимися в ходе этого процесса параметрами локального участка ткани. Важнейшим фактором, оказывающим влияние на динамику истирания, является вероятностная природа важнейших геометрических и физико-механических характеристик ткани. Структура ткани, связанная с раппортом переплетения основных и уточных нитей, является периодической. Однако в масштабах одного или малого числа раппортов характеристики нитей: диаметр, плотность волокон, скрученность, ворсистость, показатели трения и сцепления - подвержены заметным случайным вариациям. Вследствие переплетения нити в ткани деформированы. Случайные вариации наблюдаются и в этих деформациях: в степени изогнутости, смятия, смещении положения, пористости структуры ткани и других показателях.

По перечисленным причинам процесс истирания ткани с точки зрения моделирования систем следует отнести к классу нестационарных динамических стохастических процессов с переменными параметрами.

Простейшая математическая модель, описывающая процесс истирания локального участка ткани, может быть представлена дифференциальным уравнением

$$\frac{dm(t)}{dt} = -A(m(t), t)m(t) \quad (2.1)$$

Здесь $m(t)$ – масса стираемого участка в момент времени t , $A(\dots)$ – функционал, определяющий скорость уменьшения плотности массы в единицу времени. В линейном приближении этот функционал равен

$$A(m(t), t) = a_0 + a_m m(t) + a_t t \quad (2.2)$$

Здесь a_0, a_m, a_t – некоторые коэффициенты, зависящие от перечисленных выше характеристик нитей и образованного ими участка ткани. Уравнение (2.1) с функционалом (2.2) является уравнением Бернулли, которое преобразуется в линейное уравнение

$$\frac{du(t)}{dt} - (a_0 + a_m t)u(t) = a_t, \quad u(t) = m^{-1}(t) \quad (2.3)$$

Задача Коши для этого уравнения при начальном условии $m(t = 0) = m_0$ может быть решена аналитически. Решение имеет вид

$$u(t) = \exp\left(-\left(a_0 t + a_t t^2\right)\left(m_0^{-1} + a_m \int_0^t \exp\left(-a_0 \tau - a_t \tau^2\right) d\tau\right)\right) \quad (2.4)$$

На рис. 2.1 представлена динамика уменьшения массы $m(t)$ согласно формуле (2.4) при двух вариантах исходных данных, отличающихся знаком коэффициента a_m :

- 1) $m_0 = 1 \text{ г}; a_0 = 0,1 \text{ с}^{-1}; a_m = 0,1 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-1}; a_t = 0,1 \text{ с}^{-2};$
- 2) $m_0 = 1 \text{ г}; a_0 = 0,1 \text{ с}^{-1}; a_m = -0,1 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-1}; a_t = 0,1 \text{ с}^{-2}.$

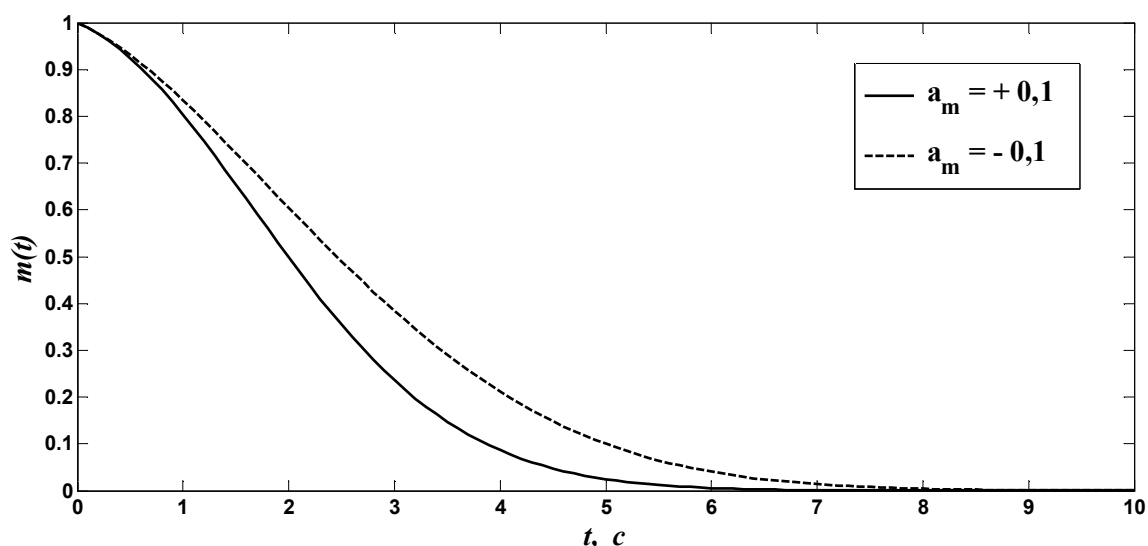


Рисунок 2.1 - Динамика потери массы образцом волокнистого полотна при истирании (усл. ед.)

Расчет проводился с помощью процедуры Matlab.

Из графиков следует, что независимо от знака коэффициента пропорциональности при текущей величине массы потеря массы во времени описывается S – образной кривой. Это означает, что сначала потери массы в единицу времени относительно невелики, затем скорость потери массы нарастает, а на завершающем этапе скорость снижается, поскольку общее количество оставшейся массы в истираемом материале остается небольшим.

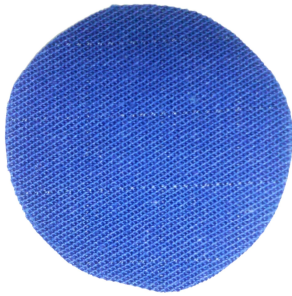


В модели (2.1), (2.2) не учитываются статистический характер истирания ткани и ее специфическая периодическая структура. Несомненным преимуществом модели является существование конечного выражения (1.4), которое в явном виде описывает изменение массы истираемого участка. Подбирая оптимальные значения параметров модели (коэффициенты a_0, a_m, a_i) по данным натуральных экспериментов, можно получить адекватную модель для прогнозирования степени истираемости конкретной ткани за определенный интервал времени истирания.

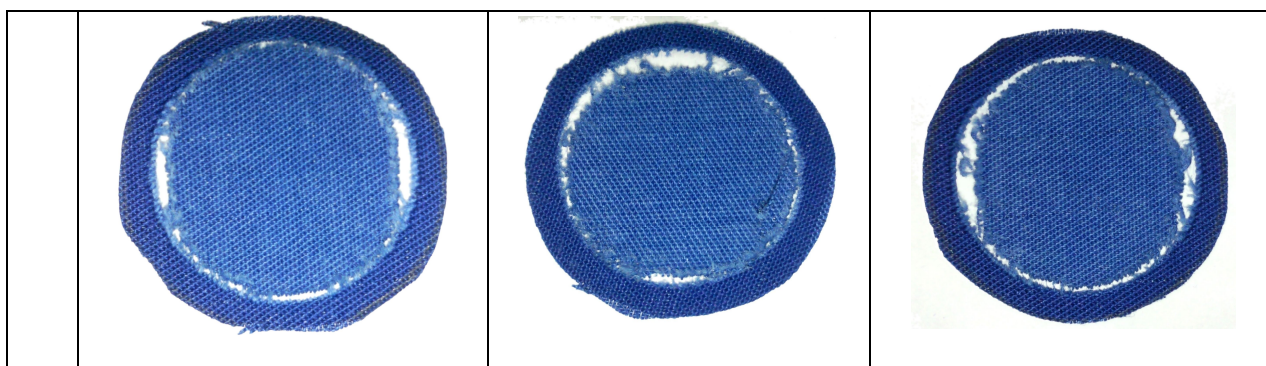
Для получения экспериментальных данных разработаны методики и созданы соответствующие приборы, осуществляющие процесс истирания образцов испытываемых тканей. Однако некоторые типы специальной защитной

одежды для газовщиков, нефтяников и работников других отраслей изготавливают из тканей, к которым стандартные методики не пригодны. Так, износ тканей с токопроводящими нитями нельзя проверять по стандартной методике, поскольку на приборах ДИТ-М и ИТ-3М, используемых по такой методике, фиксация момента окончания испытаний происходит по электрическому замыканию контакта при появлении сквозного отверстия в образце. В токопроводящих тканях такие замыкания могут происходить на любом этапе испытаний и не отражают истинной картины истирания. Кроме того, в указанных приборах в качестве абразива используются суконные ткани, которые могут сильно отличаться по свойствам в разных сериях, что ведет к разбросу в оценках, далеко выходящему за пределы статистической погрешности.

Поэтому для оценки истираемости тканей специального назначения, содержащих токопроводящие нити, в настоящее время используется методика, предложенная Martindale и реализованная в приборе UGT-7012-M8. В качестве примера в таблице 2.1 представлены результаты испытаний на этом приборе ткани арт. «Universal FR» 240. Здесь n – число циклов истирания, p – процент потери массы образцом.

Таблица 2.1 - Результаты истирания ткани арт. «Universal FR» 240

		Число циклов и процент потери массы		
		0 0%	$1,0 \cdot 10^4$ 8,11%	$1,5 \cdot 10^4$ 12,73%
Вид образца				
	Ви	$2,0 \cdot 10^4$ 14,65%	$2,5 \cdot 10^4$ 20,22%	$3,0 \cdot 10^4$ 22,98%



Из приведенных фотографий образца ткани видно, что наибольшему разрушению подвергаются участки, подвергшиеся наибольшему воздействию со стороны эталонной абразивной ткани. Следует отметить, что при аналогичных испытаниях на приборах ДИТ-М и ИТ-3М истирание образца сопровождается эффектами раздиранья ослабленных участков, что искажает процесс разрушения образца в результате его истирания.

В таблице 2.2 приведены данные натуральных экспериментов для нескольких артикулов тканей, в которых отражены зависимости потери массы образцами в зависимости от числа циклов истирания.

Таблица 2.2 - Результаты испытаний по истиранию тканей на приборе UGT-7012-M8

Артикул	Состав	PP, г/м ²	<i>n</i>	<i>p</i>
Арт. "СТ-21А"	Основа, уток: х/б-100%; токопровод. нить	275±14	10000	2,64
			15000	3,21
			20000	4,37
			25000	5,19
			30000	6,35
арт. "TRITON-Т"	Основа, уток: см. пряжа х/б – 80% ПЭ – 20% включая токопровод. нить	250±12,5	10000	2,04
			15000	2,53
			20000	3,08
			25000	4,24
			30000	4,81
"Премьер FR-350" арт. 10202а-М	Основа, уток: х/б-100%; включая токопровод. нить	340±17	10000	2,72
			15000	5,45
			20000	5,91
			25000	8,91
			30000	10,49

Арт. "Universal FR" 240	Основа, уток: х/б-100%; включая токопровод. нить	240±12	10000	8,11
			15000	12,73
			20000	14,65
			25000	20,22
			30000	22,98
Арт. СТ-20А	Основа, уток - см. пряжа: х/б – 60%, ПЭ – 40%; включая токопровод. нить	215±10	10000	3,12
			15000	3,81
			20000	4,66
			25000	6,88
			30000	9,33

Из таблицы видно, что, несмотря на примерно одинаковый характер нарастания потери массы образцов, с увеличением числа циклов, наблюдаются значительные отличия между ними, зависящие от артикула ткани.

2.2 Статистические закономерности взаимосвязи между сухим и вязким трением в волокнистом материале

Любой волокнистый материал и изделия из него образованы огромным количеством волокон или нитей [117]. Материал существует благодаря контактам между волокнами и силам взаимодействия по площадям контактов [118]. Контакт между участками волокон обусловлен формированием материала из упругих, извитых, скрученных, спутанных волокон. Если в волокнистой массе нет внесенных в нее связующих сред, соединяющих волокна за счет межмолекулярных химических связей, то силы взаимодействия между волокнами являются силами т.н. «сухого» трения [119, 120]. Эти силы, отнесенные к единице площади контакта, принято описывать обобщенным законом Амонтона – Кулона

$$P = -(q + m \cdot N) \cdot \text{sign}(du / dt) \quad (2.5)$$

Здесь q – удельная (на единицу площади) сила сцепления, m – коэффициент трения, N – удельная сила нормального давления между плоскостями контакта. Функция sign учитывает знак скорости смещения u и задает направление действия силы против взаимного смещения площадей контакта.

Взаимодействие волокон в материале также подчиняется (2.5), однако в этом случае оно происходит в бесчисленном множестве областей контакта.

Размеры (протяженность и площади) отдельных локальных областей малы. Они соразмерны с боковой поверхностью волокна. Плоскости контактов, и соответственно, силы нормального давления и трения направлены произвольным образом и лишь в среднем имеют ненулевую проекцию в направлении, противоположном внешней силе удлинения образца.

Составляющие выражения (2.5) для каждой локальной области случайны. Поэтому интегральную силу противодействия материала деформации можно оценить усреднением по этим многим локальным областям. Вектор перемещения u в каждой точке волокнистого материала может быть направлен под разными углами к этой оси в пределах конуса $u \geq 0$. Предполагая, что эти углы распределены равномерно в пределах от $-\pi/2$ до $+\pi/2$, легко найти, что усредненная величина силы составляет долю $2/\pi$ от ее абсолютного значения, вычисляемого по формуле (2.5). Эта сила направлена против удлинения и препятствует развитию деформации и структурным изменениям материала.

До тех пор, пока локальные внешние напряжения σ , возникающие в материале вследствие деформации, не превосходят максимальные удельные силы трения покоя (2.5), материал деформируется как сплошная среда. При этом не происходит смещения элементов волокон относительно друг друга и не нарушается структура материала, сохраняется «сплошность» среды. Если локальные напряжения превышают максимальные удельные силы трения покоя, эти силы уже не могут удерживать волокна в областях контакта. Волокна начинают скользить друг по другу, и смещение элементов волокнистого материала в направлении его удлинения начинает нарастать.

Внешне это выглядит так, как будто материал достиг порога текучести, однако, в отличие от текучести «настоящих» сплошных сред, здесь нарастание смещения вызвано частичным разъединением волокон, нарушением и исчезновением некоторых областей контактов, изменениями структуры материала. В локальной области материала этот переход происходит при переключении абсолютной деформации в соответствии с логическим условием

$$\Delta = \begin{cases} \varepsilon, & \text{при } \sigma \leq \frac{2}{\pi(q + mN)} \\ \varepsilon + u, & \text{при } \sigma > \frac{2}{\pi(q + mN)} \end{cases} \quad (2.6)$$

В этой формуле Δ – относительное смещение слоев волокнистого материала в некоторой его локальной области под действием приложенного к нему растягивающего удлинения вследствие развившегося в этой области механического напряжения σ . Величина ε – относительное удлинение материала вследствие деформации волокон без их взаимного смещения. Слагаемое u – относительное смещение волокон в локальной области в результате удлинения при превышении действующего в области напряжения максимальной силы трения.

Представляет интерес найти зависимость между удлинением образца, приложенной к нему удлиняющей силой и механическим напряжением сопротивления этому удлинению в положительном направлении оси X . Предположим, что величины q , m , N , входящие в формулы (2.5) и (2.6), являются положительными значениями нормально распределенных случайных величин. Нормальный закон вполне правдоподобен в силу действия центральной предельной теоремы. Кроме того, описанные ниже результаты моделирования проверялись и на других законах распределения. Были приняты следующие средние значения для: $mSr = 0,27$; $qSr = 0,001$; $Nsr = 10$; $epsSr = 0,01$; $uSr = 0,1$. В описываемом эксперименте коэффициент вариации всех случайных величин был одинаковым и варьировался от 0% до 20%. Достоверность результатов статистического моделирования при каждом значении коэффициента вариации проверялась с применением обычных принятых для этих целей статистических критериев [120, 121] и обеспечивалась большим объемом выборки (повторных прогонов модели) $N_{povt} = 1000$. Этот объем выборки оказался достаточным для надежной оценки распределений и числовых показателей.

На рис. 2.2 представлены полученные зависимости относительного смещения подвижного края образца при относительном механическом растягивающем напряжении σ , приложенном к волокнистому материалу при

различных значениях коэффициента вариации CV случайных величин q , m , N , u , ε .

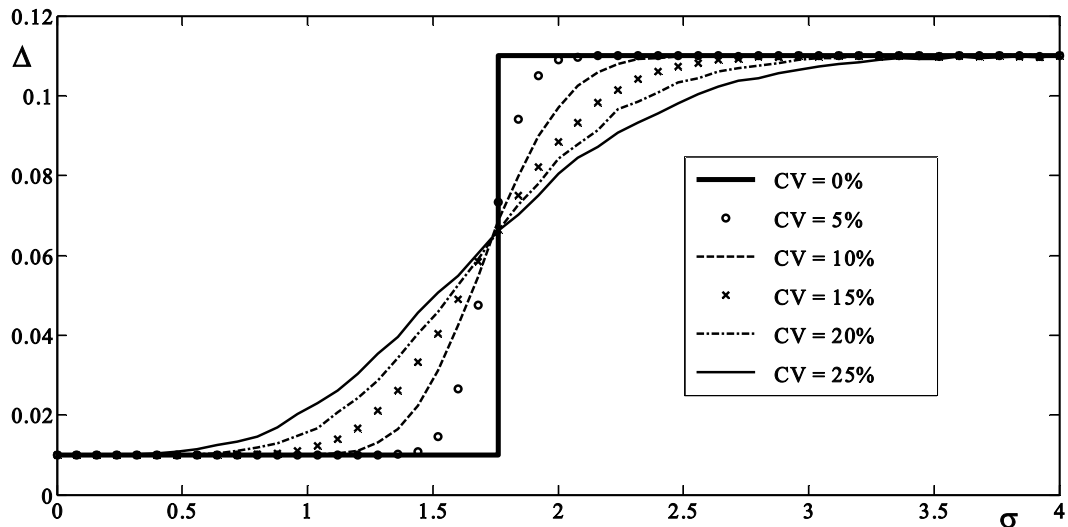


Рисунок 2.2 - Зависимость относительного удлинения образца волокнистого материала с ростом приложенной нагрузки при разных коэффициентах вариации параметров

Из рисунка видно, как по мере нарастания случайных вариаций параметров взаимодействия элементов волокон (или нитей) в волокнистом материале, зависимость Амонтона – Кулона, описывающая «сухое» трение, преобразуется в линейную зависимость, характерную для вязкого трения. Можно считать, что этот эффект является общим для волокнистых материалов и действителен для большинства изделий из волокон, в которых связь между волокнами обеспечивается лишь механическими силами трения и сцепления [13].

2.3 Моделирование испытаний образцов тканей на истирание

В настоящее время существует большой ассортимент текстильных полотен специального назначения. Особое место среди них занимают ткани для рабочей одежды работников нефтегазовой и других отраслей, обладающие анти-электростатическими свойствами со встроенными токопроводящими волокнами

и/или нитями. Эти ткани должны обладать комплексом защитных, гигиенических, технологических и эксплуатационных свойств, обеспечивающих безопасность труда, защиту от воздействия вредных производственных факторов. При этом одежда из этих тканей должна быть гигиеничной, удобной, нетоксичной, износостойкой, а так же удовлетворять эстетическим требованиям и корпоративному стилю.

Одним из наиболее важных эксплуатационных показателей для спецодежды является износостойкость. изнашивание одежды под воздействием сложного комплекса механических, физико-химических и биологических факторов, протекающее во времени, вызывает изменения в микро- и макроструктуре тканей. Эти изменения ухудшают свойства тканей и приводят к их разрушению, что совершенно недопустимо для спецодежды, эксплуатируемой на предприятиях с повышенным уровнем вредных производственных факторов. Основной причиной изнашивания тканей для спецодежды является воздействие механических факторов износа, в первую очередь, трения, которое влечет за собой разрушение ткани от истирания. Прогнозирование истираемости тканей возможно лишь при наличии математических и компьютерных моделей, связывающих параметры строения и сырья ткани и показатели истираемости.

Эти же модели открывают путь к автоматизации задач прогнозирования, оптимизации структуры, обработки данных. Однако построение такого рода моделей невозможно без анализа существующих методов исследования и накопления информации о свойствах уже существующих тканей. Поэтому актуальной является задача сравнения и оценки существующих методик испытаний тканей на истираемость.

В настоящее время существует несколько государственных стандартов на методы определения стойкости к истиранию текстильных материалов. Для рассматриваемой группы тканей на практике используется метод истирания по ГОСТ 18976 [122] на приборе ДИТ или ИТ-3М.

Чтобы проводить истирание тканей специального назначения с токопроводящей нитью по ГОСТ 18976, необходимо либо извлекать из структуры

ткани токопроводящую нить, либо не использовать контактный датчик из нихромового провода, предназначенный в приборе для автоматического останова испытаний. Извлечение токопроводящей нити из ткани является трудоемкой и длительной процедурой с использованием дополнительных приспособлений – специальной иголки, лупы, микроскопа и проч. Кроме того, извлечение токопроводящей нити приводит к нарушению первоначальной структуры ткани и, как следствие, к недостоверным результатам испытания.

При проведении испытания без контактной нихромовой проволоки не происходит автоматического останова прибора при контакте нихромовой проволоки с грибком прибора, т.е. происходит ручной останов прибора в момент, определяемый испытателем.

С целью анализа и сравнения результатов истирания в зависимости от различных условий и стадий завершения испытания, было проведено экспериментальное истирание нескольких тканей специального назначения [25].

Сначала испытания проводились на образцах с предварительно извлеченными токопроводящими нитями, с использованием контактной нихромовой проволоки, до автоматического останова прибора. Затем удаляли контактный датчик и продолжали испытания до разрушения одной системы нитей.

Далее испытания проводили на образцах тех же тканей с токопроводящей нитью, не используя контактный датчик, до имитации состояния автоматического останова, до разрушения одной системы нитей и до образования сквозного отверстия. Результаты испытаний представлены в виде гистограмм на рис. 2.3 и рис. 2.4.

Из данных рис. 2.3 и рис. 2.4 видно, что результаты, полученные при истирании тканей без токопроводящей нити, намного ниже нормы. Число циклов истирания образцов на приборе без нихромовой проволоки может варьироваться в широких пределах и зависит от субъективной оценки завершения испытаний.

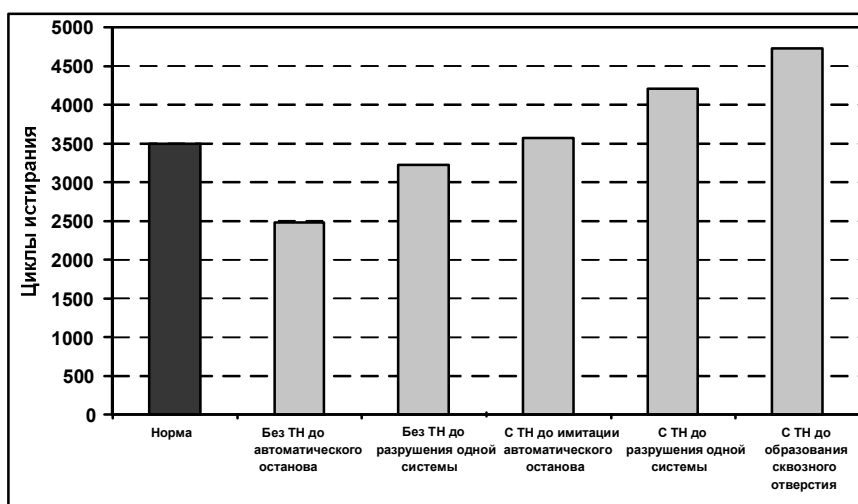


Рисунок 2.3 - Ткань «Rigchief Universal» арт. 103383

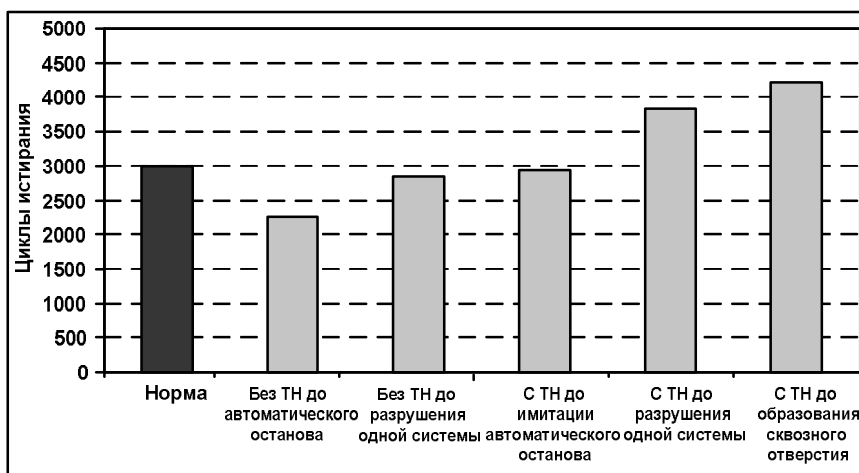


Рисунок 2.4 - Ткань «Премьер FR-350» арт. 10202a-M

Для практического подтверждения полученных данных в четырех аккредитованных лабораториях проведены межлабораторные сравнительные испытания по показателю "стойкость к истиранию" антиэлектростатических тканей для специальной одежды по ГОСТ 18976. Характеристики антиэлектростатических тканей представлены в таблице 2.3. Полученные результаты испытаний представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.3 - Характеристики антиэлектростатических тканей

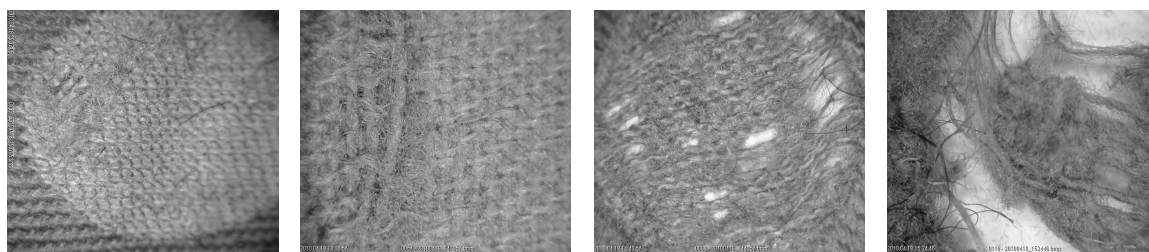
Наименование ткани	Состав ткани, %	Поверхностная плотность ткани, г/м ²
«Лидер-Комфорт 250»,	Основа, уток:	255±10

арт. 18422 а/х-М	Х/Б-80, ПЭ-20; токопроводящая нить	
«TRITON-T»	Основа, уток: Х/Б-80, ПЭ-20 токопроводящая нить	250±12,5
«ГРЕТА-М», арт. 8С60-КВК	Основа: ПЭ-49 токопроводящая нить Уток: Х/Б-51	212-15
«ДИОРИТ-М», арт. 03С8-КВК	Основа: ПЭ-37, токопроводящая нить Уток: Х/Б-63	235-16

Из таблицы 2.3 следует, что результаты испытания одних и тех же тканей, полученные от разных испытательных лабораторий, значительно отличаются друг от друга, что объясняется существенным влиянием субъективного фактора момента окончания испытания. Из рис. 2.5 видно, что образцы из лаборатории А истерты до дыры, соизмеримой с диаметром контактного датчика.

Таблица 2.4 - Результаты испытаний

Наименование ткани	Испытательные лаборатории				Норма
	A	B	C	D	
«Лидер-Комфорт 250», арт. 18422 а/х-М	4318	4520	8016	5253	3500
«TRITON-T»	4707	4734	5029	5557	4000
«ГРЕТА-М», арт. 8С60-КВК	5638	5793	6312	5237	4500
«ДИОРИТ-М», арт. 03С8-КВК	8994	9017	9554	6191	5000



а) лаб. А

б) лаб. D

в) лаб. В

г) лаб. С

Рисунок 2.5 – Образцы ткани из разных лабораторий

Образцы, полученные из лаборатории D, истерты до частичного разрушения нитей одной системы. Образцы из лаборатории В истерты до полного разрушения одной системы нитей. Образцы, полученные из лаборатории С, истерты до сквозного отверстия диаметром, приблизительно равным 1 см.

Сравнение данных межлабораторных сравнительных испытаний приводит к выводу, что методика по ГОСТ 18976 [122] не может применяться для группы тканей с токопроводящими нитями, поскольку отсутствует единый критерий завершения истирания тканей специального назначения с токопроводящей нитью.

В связи с этим была предложена и опробована методика определения стойкости к истиранию по плоскости тканей для спецодежды, содержащих токопроводящие волокна и/или нити, основанная на оценке потери массы образца ткани при истирании до заданного числа циклов. Данная методика, не имеющая отмеченных выше недостатков, оказалась эффективной при практическом

применении и может быть успешно использована для получения данных о динамике истирания тканей.

Эта методика позволяет целенаправленно спланировать и провести серии экспериментов, которые дают информацию достаточного объема и точности для построения математических и компьютерных моделей, описывающих закономерности и зависимости между особенностями строения и структуры электропроводящих тканых полотен для спецодежды и их истираемостью. Такие модели необходимы как в автоматизированных измерительных комплексах по испытанию свойств специальных тканей, так и с целью прогнозирования свойств тканей новых структур.

Таким образом, отсутствие единого стандартного критерия окончания испытания по показателю "стойкость к истиранию по плоскости" тканей для спецодежды, содержащих токопроводящие волокна и/или нити, приводит к результатам с большим значением размаха варьирования определяемого показателя качества для одних и тех же тканей, испытанных в различных лабораториях.

Предложенная методика проведения испытаний тканей с токопроводящими волокнами и/или нитями позволяет получить достаточно информации для построения адекватных математических и компьютерных моделей динамики истирания тканей специального назначения.

2.4 Исследование динамики истирания и сравнение методик приборов ИТ-3М и Martindale

В настоящее время известны две методики, позволяющие определять показатель «стойкость к истиранию» тканей специального назначения, содержащих токопроводящую нить – ГОСТ 18976 [122] и ГОСТ Р 51552 [123]. В России для определения стойкости к истиранию антиэлектростатических тканей специального назначения широко используется методика ГОСТ 18976 [122]. Сущность методики заключается в определении количества циклов истирания, выдерживаемых тканью до разрушения. Однако, данная методика не

распространяется на ткани с применением металлических и металлизированных нитей. Для того чтобы проводить истирание тканей специального назначения с токопроводящей нитью по ГОСТ 18976, необходимо либо извлекать из структуры ткани токопроводящую нить, либо не использовать контактный датчик из нихромового провода, предназначенный в приборах ДИТ-М и ИТ-3М для автоматического останова испытаний. В первом случае результаты испытаний будут недостоверными, т.к. нарушается первоначальная структура ткани. Во втором случае – отсутствует единый стандартный критерий окончания испытаний, что приводит к результатам с большим значением размаха варьирования определяемого показателя качества для одних и тех же тканей, испытанных в различных лабораториях.

В результате анализа существующих проблем была разработана и опробована новая методика определения стойкости к истиранию тканей для спецодежды, содержащих токопроводящие нити [18]. Методика разработана путем дополнения и внесения изменений в ранее существующие методики. Она не имеет вышеперечисленных недостатков, оказалась эффективной при практическом применении и может быть использована для получения данных о динамике истирания тканей.

Сущность методики заключается в оценке потери массы образца ткани при истирании до заданного числа циклов. Испытания по определению стойкости к истиранию исследуемой группы тканей по предложенной методике проводились на приборе ИТ-3М и приборе для определения устойчивости к истиранию тканей по методу Мартиндаля (UGT-7012-M8), с целью выявления наличия или отсутствия корреляционной зависимости между полученными данными. Зависимость между величиной коэффициента корреляции и числом испытаний, необходимых для получения его достоверности, известна.

Исследования проводились на нескольких типовых образцах антиэлектростатических тканей для специальной одежды. В качестве примера представлены результаты испытания двух образцов тканей, краткая характеристика которых представлена в таблице 2.5.

Исследования проводились путем постадийного истирания тканей на приборах ИТ-3М и Мартиндаля. В качестве критерия степени истирания принята потеря массы образцов, которая определяется отношением разности показателей до и после испытания к первоначальному значению показателя. Она полностью отвечает требованиям, предъявляемым к параметрам оптимизации, т.е. является количественной, однозначной и статистически эффективной.

Таблица 2.5 – Характеристика образцов ткани

Наименование ткани	Сырьевой состав ткани, %	Поверхностная плотность ткани, г/м ²
Rigchief Universal, арт. 103383	Основа, уток: Х/Б-100; Токопроводящая нить – ПЭ + Ме-сод.	320 ± 16
«Лидер-Комфорт 250», арт. 18422 а/х-М	Основа, уток: см. пр. Х/Б-80, ПЭ-20; токопроводящая нить – ПЭ к.н.+ Ме-сод.	255±10

Для получения зависимости изменения потери массы ткани в результате истирания на приборе ИТ-3М производили измерение потери массы образцов после 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 циклов для всех исследуемых тканей. В качестве абразива использовалось серошинельное сукно арт. 6405. Смена абразива производилась после каждой заправки. Полученные результаты представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты истирания на приборе ИТ-3М

Количество циклов истирания	Потеря массы, %	
	Rigchief Universal, арт. 103383	«Лидер-Комфорт 250», арт. 18422 а/х-М
2000	2,58	1,45
2500	3,11	1,84
3000	5,05	2,63
3500	9,92	3,52
4000	14,38	4,87

На основании этих данных построены регрессионные зависимости

изменения потери массы $m(t)$ тканей от количества тысяч циклов t истирания на приборе ИТ-3М. Эти зависимости имеют вид

$$\text{арт. 103383: } m_1(t) = 0,555t^3 - 2,067t^2 + 3,057t; \quad R^2 = 0,990$$

$$\text{арт. 18422: } m_2(t) = 0,278t^2 + 0,070t; \quad R^2 = 0,988$$

Графики зависимостей представлены на рис. 2.6. Значения R^2 равны квадратам коэффициентов детерминации, характеризующим степень достоверности полученных регрессий.

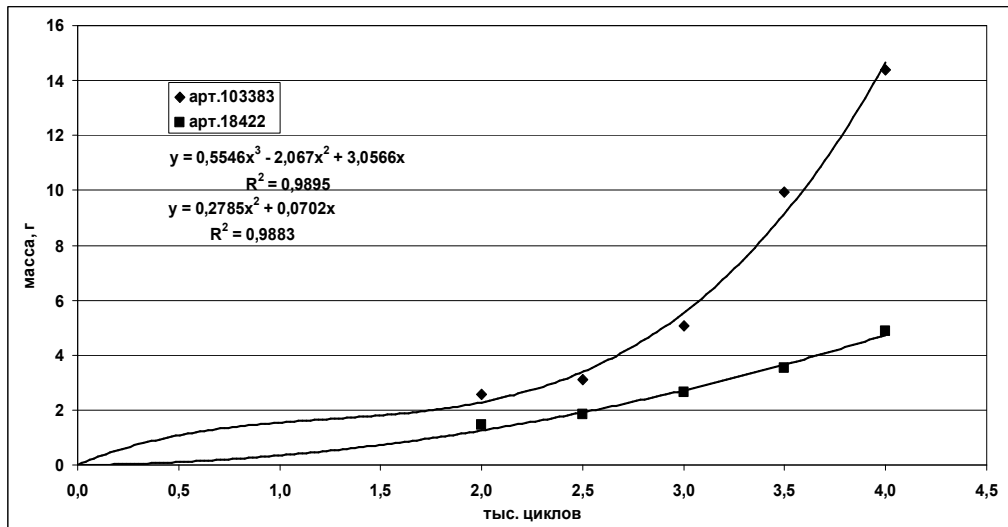


Рисунок 2.6 – Экспериментальные данные и линии регрессионных зависимостей потери массы при истирании на приборе ИТ-3М

Для получения зависимости изменения потери массы ткани от количества циклов истирания на приборе Martindale образцы истирались до 15000, 20000, 25000, 30000, 35000 циклов. Потерю массы образцов определяли после каждой стадии истирания. В качестве абразива на приборе Martindale использовалась шерстяная абразивная ткань. Смену абразива осуществляли после 50000 циклов истирания. Результаты испытаний представлены в таблице 2.7. На основании полученных данных построены регрессионные зависимости изменения потери массы тканей $m_{1,2}(t)$ от количества тысяч циклов t истирания на приборе Martindale. Эти зависимости имеют вид

$$\text{арт. 103383: } m_1(t) = -0,0063t^2 + 0,568t; \quad R^2 = 0,981$$

$$\text{арт. 18422: } m_2(t) = 0,007t^2 + 0,142t; \quad R^2 = 0,992$$

Таблица 2.7 – Результаты испытания на приборе Martindale

Количество циклов истирания	Потеря массы, %	
	Rigchief Universal, арт. 103383	«Лидер-Комфорт 250», арт. 18422 а/х-М
15000	7,36	3,8
20000	8,88	5,11
25000	10,02	7,59
30000	11,03	10,64
35000	12,37	12,81

Графики зависимостей представлены на рис. 2.7. Отметим, что близкие по величине потери массы у тканей обоих артикулов достигаются на приборе Martindale при числе циклов на порядок большем, чем на приборе ИТ-3М. Следовательно, прибор Martindale осуществляет процесс истирания более «деликатно», позволяя исследовать его динамику более детально, чем на приборе ИТ-3М [16].

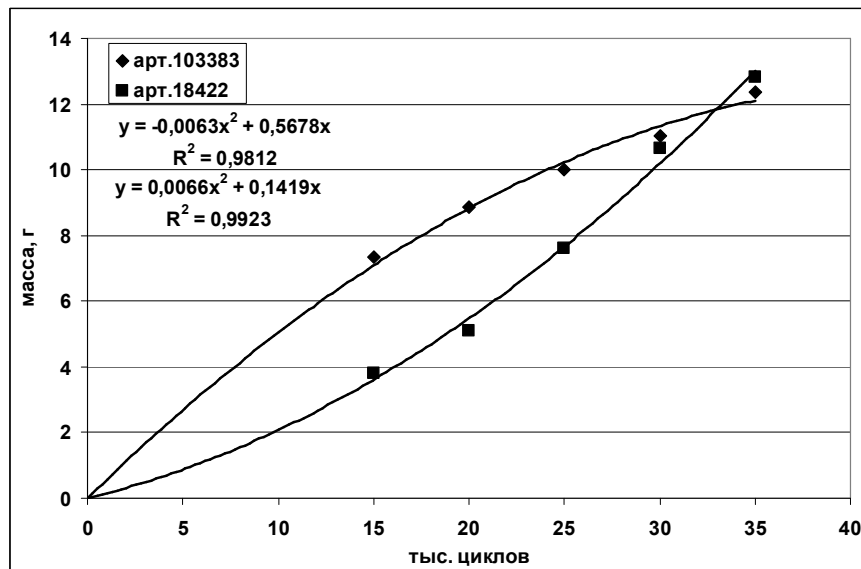
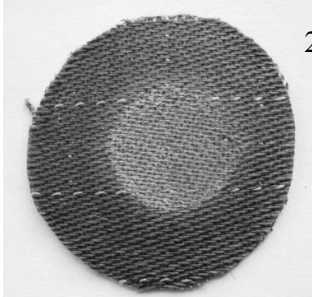
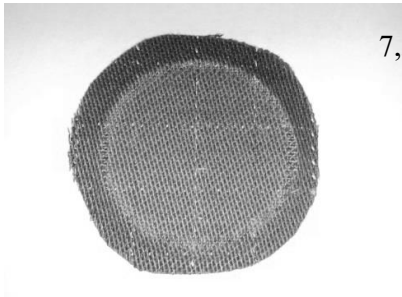

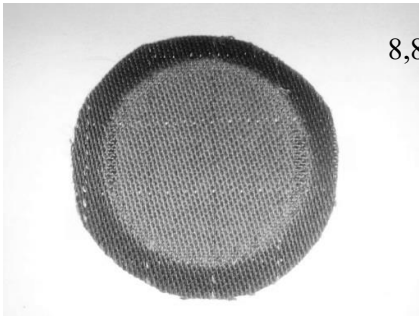

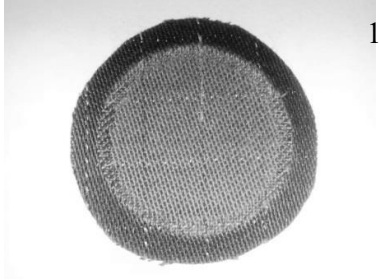

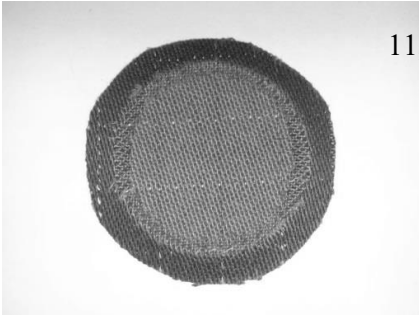


Рисунок 2.7 – Экспериментальные данные и линии регрессионных зависимостей потери массы при истирании на приборе Martindale

Для наглядности на рис. 1.8 приведены фотографии образцов ткани арт. 103383, снятых с приборов ИТ-3М и Martindale при приблизительно одинаковых потерях массы после указанного на рисунке числа циклов истирания (числитель – прибор ИТ-3М, знаменатель – прибор Martindale).

Циклы	ИТ-3М	Martindale
2000/ 15000	 2,58%	 7,36%
2500/ 20000	 3,11%	 8,88%
3000/ 25000	 5,05 %	 10,02%
3500/ 30000	 9,92 %	 11,03%
	14,38 %	12,37%

4000/
35000

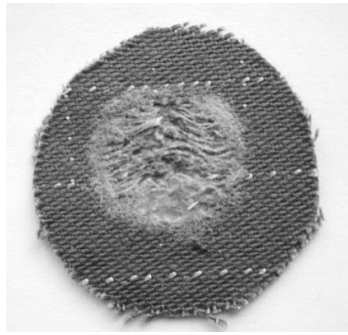
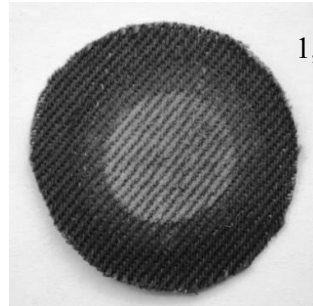


Рисунок 2.8 – Образцы ткани арт. 103383 с приборов ИТ-3М и Martindale

На рис. 2.9 показаны аналогичные результаты для ткани арт. 16422.

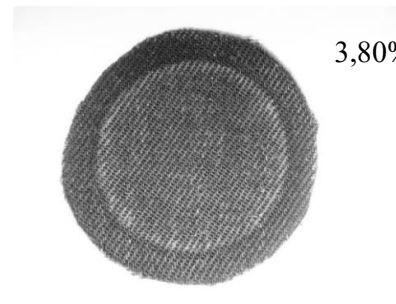
Циклы
2000/
15000

ИТ-3М



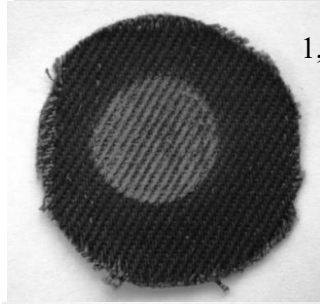
1,45%

Martindale

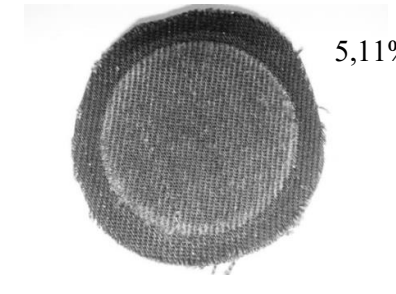


3,80%

2500/
20000

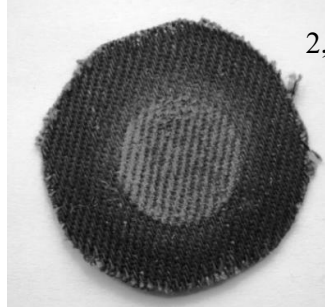


1,84%

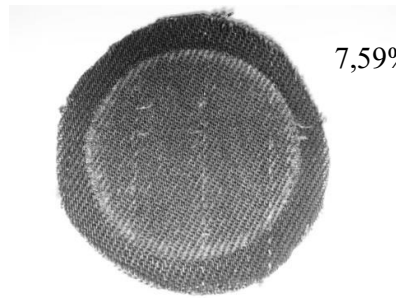


5,11%

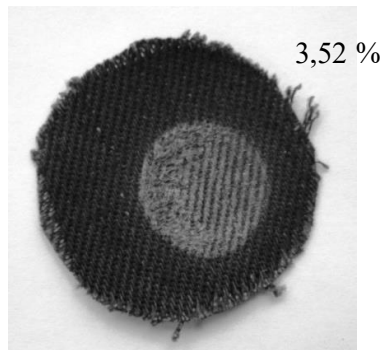
3000/
25000



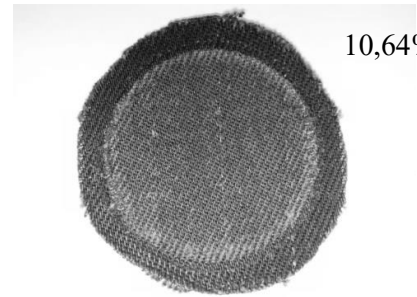
2,63 %



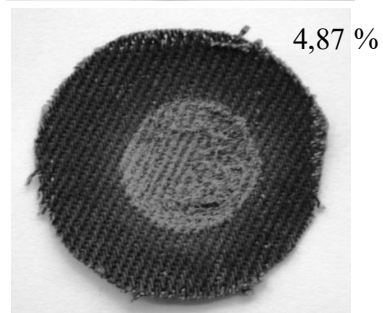
7,59%

3500/
30000

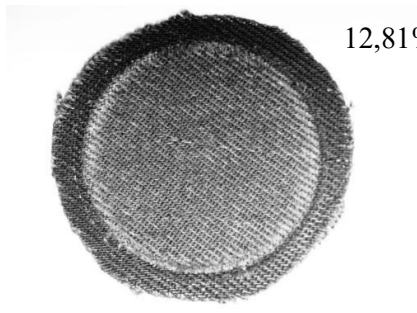
3,52 %



10,64%

4000/
35000

4,87 %



12,81%

Рисунок 2.9 – Образцы ткани арт. 16422с приборов ИТ-3М и Martindale

Фотографии подтверждают сделанные выводы о существенном различии в динамике процесса истирания на сравниваемых приборах. Если на приборе ИТ-3М после определенного числа циклов начинается интенсивное и все возрастающее разрушение нитей ткани на локальном участке области истирания, то на приборе Martindale истирание происходит по всей рабочей поверхности образца более равномерно в течение гораздо большего числа циклов, и картина разрушения нитей отличается от аналогичного явления на приборе ИТ-3М.

2.5 Компьютерная модель истирания ткани

Истирание материала является одним из видов его разрушения. Оно заключается в отделении от поверхности материала малых фрагментов под действием касательных сил.

Механизм истирания твердого материала выглядит примерно следующим образом. Поверхность материала всегда имеет микронеровности. Их профиль, как правило, случаен, а высота от среднего уровня колеблется от долей миллиметра до тысячных или десятитысячных долей миллиметра. Истирающее воздействие осуществляется поверхностью другого материала (истирающей поверхностью),

которая прижимается к истираемой поверхности силами нормального давления. При этом происходит не только касание истираемой и истирающей поверхностей в отдельных точках, но и деформация сжатия или смятия отдельных участков обеих поверхностей.

При относительном перемещении поверхностей вдоль плоскости на участках их соприкосновения действуют касательные нагрузки. Их действие приводит к смещению участков материала - деформациям сдвига и/или среза. Когда смещение превосходит предельную величину деформации, происходит отделение участка поверхности или ее фрагмента. Отделенная часть поверхности либо соединяется с поверхностью материала на соседних участках, либо полностью отрывается от материала.

Первый случай - соединение - характерен для материалов с идеальной молекулярной и надмолекулярной структурой твердого материала с поверхностью, близкой к идеально отполированной, т.е. с минимальными неровностями. Этот случай и означает полирование поверхности материала как результат взаимодействия его поверхности с поверхностью другого материала. Второй случай - отрыв - представляет собой процесс истирания. Важно, что все эти процессы взаимодействия поверхностей двух материалов происходят лишь в поверхностной зоне материала и не распространяются на его глубину.

Истирание всегда взаимно, т.е. ему подвергаются обе взаимодействующие поверхности. Поэтому при исследовании истирания важно, чтобы истирающая поверхность была «эталонной», одинаковой для всех сравниваемых материалов и истиралась значительно медленнее, чем исследуемый материал.

Иную картину представляет процесс истирания волокнистого материала. При соприкосновении поверхностей двух волокнистых материалов - истирающего и истираемого - происходит касание и зацепление между волокнами этих поверхностей. При относительном перемещении поверхностей вдоль касательной плоскости фрагменты наиболее слабых волокон могут отрываться. Другие волокна частично извлекаются из материала и меняют свою форму, расположение в материале и взаимодействие с остальной массой волокнистого материала.

Если волокно благодаря своей длине заходит глубоко в объем материала, то для его извлечения требуются значительные и длительные воздействия. То же происходит, если волокно находится на поверхности истираемого материала, но сильно связано во многих точках своей длины с другими волокнами.

На первом этапе процесса истирания уменьшается объемная или поверхностная плотность волокнистого материала. Это приводит к значительному сокращению количества контактов между волокнами в единице объема и тем самым увеличивает вероятность извлечения отдельных волокон из поверхности.

Второй процесс при истирании - отрыв фрагмента волокна от остальной его части. Он возможен, если сила, приложенная в некоторый момент времени к конкретному волокну, оказалась больше его предела прочности. Как извлеченные волокна, так и оторванные фрагменты волокон в дальнейшем не участвуют в сопротивлении материала истиранию. Они вместе образуют ту убыль массы, которая и проявляется как процесс истирания.

Очевидно, что все эти процессы сугубо стохастические. В них участвует большое число разных факторов геометрической, механической и физической природы. Поэтому для моделирования истирания возможны два подхода. При первом подходе стохастический характер процесса игнорируется. Рассматривается динамика усредненных показателей. Весь описанный выше механизм процесса прячется в нескольких коэффициентах, отражающих интегральные свойства материала по отношению к истирающим воздействиям. В этом случае невозможно обнаружить роль отдельных факторов иначе, как натурными экспериментами, результаты которых обычно отображают эмпирическими регрессионными зависимостями.

При втором подходе приходится разрабатывать набор моделей, описывающих разные стороны механизма истирания, связывать их между собой для получения общей модели. Этот путь теоретически и алгоритмически сложен и не гарантирует успеха в конце пути.

Оценим среднее число волокон на 1 кв. мм поверхности волокнистого материала. В качестве исходного значения примем, что плотность материала

равна 1 г/мм^3 , а линейная плотность волокна равна $1/6 \text{ 000 г/м} = 1/6 \text{ 000 000 г/мм}$. Тогда в 1 мм^3 материала находится 6 000 000 мм длины волокон. Считая, что их средняя длина в 1 мм^3 равна 1 мм , получаем, что среднее число отрезков волокон в 1 мм^3 равно 6 000 000 . Если объемная плотность материала волокна равна $1,5 \text{ г/мм}^3$, то волокна заполняют часть 1 мм^3 объема, равную $1/1,5 = 0,66$, т.е. примерно $2/3$ объема материала. При истирании воздействию подвергается только тонкий поверхностный слой волокнистого материала. При толщине этого слоя $0,01 \text{ мм}$ получаем, что на площади в 1 мм^2 будет находиться примерно 60 000 отрезков волокон длиной около 1 мм .

Для моделирования процесса истирания ткани была разработана компьютерная имитационная статистическая модель. Она дала возможность учесть специфику структуры образцов истираемых тканых полотен, статистический разброс характеристик различных локальных участков образца, изменение свойств волокнистой массы в процессе истирания, в частности, плотности, коэффициентов трения и упругости по отдельным истираемым участкам, а также эффекты пластической необратимой деформации участков.

В модели приняты следующие допущения и следующие физическое представление о процессе истирания. Образец размещен в плоскости $(X;Y)$. Истирание означает постепенную убыль массы по оси Z . Считаем, что в разных точках $(x;y)$ убыль происходит независимо друг от друга. Поэтому отдельные участки нумеруются порядковыми номерами $j = 1, \dots, M$.

Первоначальное распределение плотности волокнистого материала по толщине в точке $(x;y)$ при начальной толщине участка в этой точке $H_0(x;y)$ описывает функция $r_0(h)$. Если толщина участка больше толщины H_s , устанавливаемой внешней нагрузкой, которая прижимает к поверхности истираемого образца истирающую поверхность, то есть $H_0(x;y) > H_s$, то происходит перед началом истирания сжатие этого участка до толщины H_s . При этом плотность материала возрастает и описывается функцией $r_s(h) = r_0(h) H_0(x;y) / H_s, 0 < h < H_s$.

Разделим общую площадь образца S на M участков площадью $dS = S / M$.

Перед началом истирания образец нагружается силой F . Ее действие приводит к сжатию части участков. Обозначим через $E(j)$ модуль упругой деформации сжатия для участка j , а через J - подмножество участков образца, подвергшихся первоначальному сжатию. Толщина сжатого материала и число сжатых участков должны удовлетворять условию равновесия

$$\sum_{j \in J} E(j) \left(\frac{H_0(j) - H_s}{H_0(j)} \Big|_{H_0(j) > H_s} \right) dS = F \quad (2.7)$$

При известном начальном профиле участков $H_0(x; y) = H_0(j)$, $j = 1, \dots, M$ и модулях упругости $E(j)$ уравнение (2.7) может быть решено методом итераций. Особенность его решения в том, что подмножество J , для которого должно выполняться (2.7), зависит от значения H_s и изменяется при его итеративном поиске.

Обозначим: $m(t)$, г - масса участка материала; $H(t)$, мм - толщина материала; $dS = dXdY$ - площадь рассматриваемого участка. Здесь t - порядковый номер цикла истирания: $t = 0, 1, \dots, T_{mod}$; $dm(j, t)$, г - убыль материала на цикле t .

Считаем, что убыль массы материала тем больше, чем меньше плотность (или масса - при постоянной площади dS участка) со случайными вариациями α . Тогда убыль материала на участке j в цикле t можно описать уравнением

$$dm(j, t) = A \frac{m(j, 0)}{m(j, t-1)} (1 + \alpha) \quad (2.8)$$

Здесь коэффициент A равен средней убыли массы при постоянной по толщине плотности участка j истираемого материала. В результате цикла t масса участка уменьшится на $dm(j, t)$: $m(j, t) = m(j-1, t) - dm(j, t)$. Такое уменьшение массы должно привести к уменьшению толщины участка j на величину $dH(j, t) = dm(j, t) / r_s(H(j, t), t)$. Толщина участка должна быть равна $H_v(j, t) = H(j, t-1) - dH(j, t)$.

Однако новый «виртуальный» профиль поверхности $H_v(j, t)$ после цикла t истирания может вновь измениться вследствие постоянно действующей нагрузки F точно так же, как он изменился перед началом всего процесса. Поэтому в соответствии с уравнением (2.7) осуществляется коррекция профиля участков и тем самым – переход от «виртуального» профиля – к реальному профилю $H_v(j, t)$

→ $H(j,t)$.

Как отмечено выше, процесс истирания является вероятностным. Его ход зависит от многих факторов и случайных вариаций. Поэтому величина истирания разных участков образца различна. С нарастанием числа циклов область истирания локализуется на локальных подмножествах участков. Чтобы учесть в модели этот эффект «положительной обратной связи», следует корректировать величину коэффициента A в формуле (2.8). Предлагается следующая корректировочная формула, учитывающая в относительных величинах суммарную величину удаленной массы

$$A(t) = A^p, \quad \text{где } p = \frac{m(j,t)}{m(j,0)} \quad (2.9)$$

Следовательно, перед началом истирания, когда число выполненных циклов t равно нулю, параметр p равен единице, и коэффициент равен своему начальному значению A . Когда же суммарная удаленная масса равна исходной массе данного участка, то остаточная масса и параметр p равны нулю, а коэффициент A равен единице.

Ниже приведен алгоритм моделирования динамики истирания (Алгоритм 1) [17]:

1. Ввод параметров моделируемого образца.
2. Задание условий моделирования варианта истираемого образца материала.
3. Задание начальных условий и начального состояния модели образца.
4. Генерация значений случайных функций и полей для начального состояния образца.
5. Моделирование начального сжатия образца под действием нагрузки со стороны истирающей поверхности. Расчет изменения формы поверхности и плотности истираемого образца под действием нагрузки.
6. Имитация удаления части массы с истираемой поверхности. Расчет изменения толщины образца на каждом участке и нового «виртуального» профиля толщины.
7. Пересчет вновь сформированного «виртуального» профиля с учетом сжимающего давления на истираемую поверхность по алгоритму,

использованному в п.5.

8. Проверка отсутствия нулевой массы или нулевой толщины по всем участкам образца. Если условие выполнено, то возврат к п .6 для имитации нового цикла истирания. Если условие нарушено (что означает истирание одного из участков до «дыры»), то прекращение имитации и вывод накопленной в процессе моделирования информации для статистической обработки результатов моделирования рассматриваемого варианта образца.

Моделирующий алгоритм с такими возможностями позволил объединить разные аспекты и факторы процесса истирания и построить достаточно полный и гибкий инструмент в виде компьютерной программы для исследования и прогнозирования характеристик истирания.

В модели предполагался следующий механизм истирания образца текстильного полотна. Образец прямоугольной формы размещается в расправленном и натянутом виде на твердой плоской поверхности. Его внешняя поверхность неравномерна по толщине (высоте) и плотности материала из-за неравномерности распределения волокнистой массы в материале и его структурных особенностей, например, переплетения нитей основы и утка в ткани. Поэтому неравномерность содержит как детерминированную периодическую, так и случайную составляющую, причем по обоим показателям: толщине h и объемной плотности ρ . На рис. 2.10 приведен пример геометрической модели толщины образца.

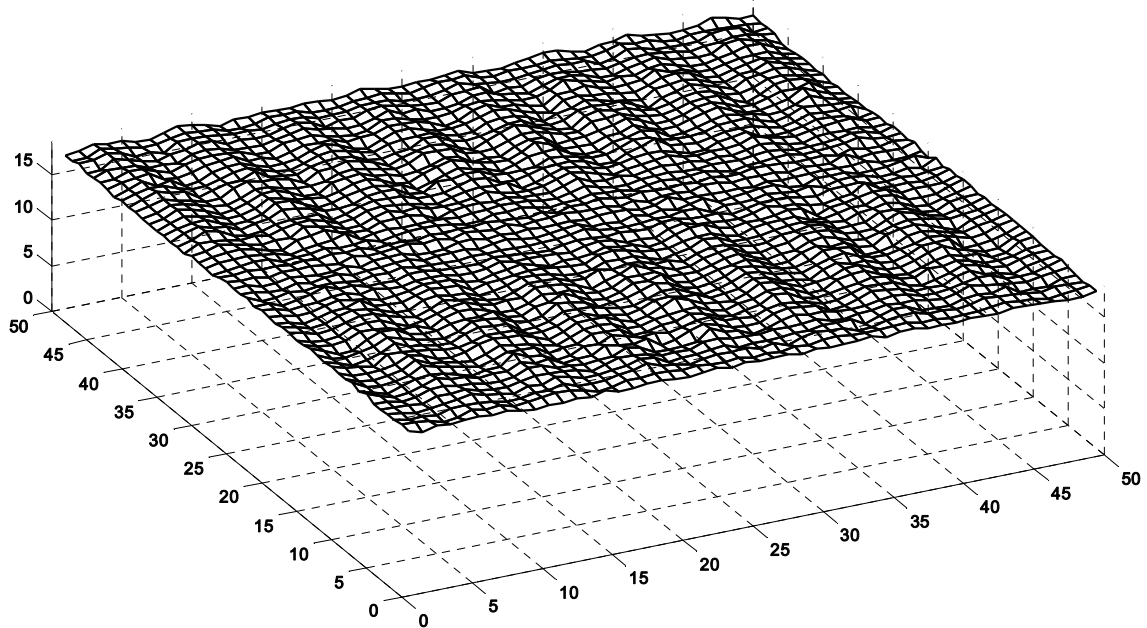


Рисунок 2.10 - Модель толщины образца ткани

Отдельные участки образца подвергаются истиранию независимо друг от друга. Это позволило перейти от двумерной модели к одномерной геометрической модели образца. Значения h и ρ моделировались по следующим формулам

$$\begin{aligned} h_s(i) &= Distr_h(m_h, s_h, n) + Per_h(2\pi i / T_h), \\ \rho_s(i) &= Distr_\rho(m_\rho, s_\rho, n) + Per_\rho(2\pi i / T_\rho), \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2.10)$$

Здесь индекс i нумерует участки прямоугольного образца; $Distr_h$ и $Distr_\rho$ – законы распределения случайных составляющих (например, нормальный закон распределения); m_h , m_ρ , s_h и s_ρ – соответственно средние значения и среднеквадратические отклонения; Per являются периодическими функциями индекса i с периодами T_h и T_ρ ; n – общее число участков, на которые разделен образец.

Перед началом истирания к свободной поверхности образца с постоянной величиной силы давления P прижимается плоская истирающая поверхность. Под давлением толщина материала в местах наибольших значений величина h уменьшается до тех пор, пока упругая сила реакции материала на сжатие не компенсирует силу внешнего давления P . Одновременно увеличивается

плотность материала на участках сжатия. В результате неравномерность по толщине и плотности изменяются и перед началом истирания уже отличаются от исходных значений. Для имитации этого этапа был разработан следующий итерационный алгоритм:

$$h_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} (h_i); \quad h_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} (h_i); \quad dh = h_{\max} - h_{\min}; \quad h_0 = h_{\min} + 0,5dh; \quad f = 0$$

Пока $|P - f| > \varepsilon_p$, выполнять:

1. $f = 0$. Для $i = 1, \dots, n$: если $h_i > h_0$, то $f = f + k(h_i - h_0)$;
2. Если $f > P$, то $dh = 0,5dh$; $h_0 = h_0 + dh$; иначе $dh = 0,5dh$; $h_0 = h_0 - dh$

Данный алгоритм позволяет найти максимальное значение h_0 , до которого уменьшится толщина образца. Это значение алгоритм находит из условия, что сжатие образца происходит на тех его участках и до тех пор, пока возникающее на этих участках суммарная сила реакции упругого сжатия f не достигнет значения внешней силы P , действующей на образец.

На следующем этапе моделирования производится коррекция значений толщины и плотности материала для учета рассчитанной величины сжатия по следующему алгоритму:

$$\text{Для } i = 1, \dots, n: \quad \text{если } h(i) > h_0, \text{ то: } \{ \rho(i) = \rho_s(i) h_s(i) / h_0; \quad h(i) = h_0 \}$$

Имитация циклического истирания поверхности материала заключается в моделировании толщины слоя $dh(i)$, отделяемого от i -го участка образца, и соответствующем изменении толщины, плотности и степени сжатия этого участка. Величина $dh(i)$ зависит от сил сцепления и трения между волокнами материала и стирающей поверхностью. Она является случайной величиной, причем закон ее распределения неизвестны.

Параметры этого распределения зависят от плотности и коэффициентов трения и сцепления между волокнами и между материалом и стирающей поверхностью на данном участке. Эти зависимости играют роль положительной обратной связи в процессе истирания. В результате по мере развития процесса область наибольшего истирания концентрируется на некотором наиболее слабом участке. Примем степенной закон распределения величины $dh(i)$

$$f_{dh}(x) = \frac{a}{h(i)} \left(1 - \frac{x}{h(i)}\right)^a, \quad 0 \leq x \leq h(i); \quad a > 1 \quad (2.11)$$

Его параметр a является функцией от относительного изменения плотности материала: $a = a(\rho_n(i) / \rho_s(i))$, где $\rho_n(i)$ – плотность материала i -го участка после отделения массы $dm(i)$. Такое распределение является частным случаем бета-распределения и соответствует асимметрично распределенной случайной величине, значения которого ограничены диапазоном $[0; h(i)]$.

Графики распределения $f_{dh}(x)$ для различных значений параметра a приведены на рис. 2.11.

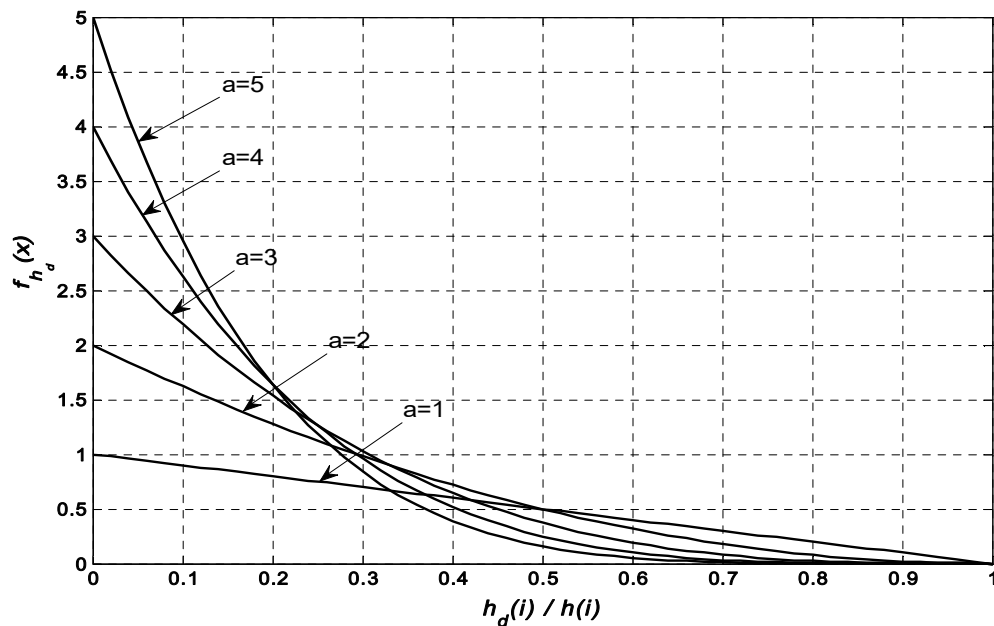


Рисунок 2.11 – Распределения f толщины hd стираемого слоя,

Из графиков видно, что при достаточно больших значениях параметра a распределение сосредоточено в окрестности моды $dh = 0$, т.е. толщина отделяемого слоя будет минимальной. Истиранию подвергаются только те участки, которые непосредственно касаются истирающей поверхности. Пересчет значений плотности после отделения очевиден. В результате получаем алгоритм:

Для $i = 1, \dots, n$: если $h(i) = h_0$, то выполнить:

1. Генерация случайного значения $dh(i)$ согласно распределению $f_{dh}(x)$

2. $h(i) = h(i) - dh(i)$; $\rho(i) = \rho(i) h(i) / h_0$ коррекция толщины и плотности
3. $dm(i) = \rho(i) dh(i) dx dy$; $m(i) = m(i) - dm(i)$ коррекция массы участка
4. $Sm(t) = Sm(t) + dm(i)$ накопление истираемой массы; t – номер цикла истирания.

В качестве примера работы алгоритма рассмотрим имитацию процесса истирания для материала, толщина и плотность которого состоят из случайной и периодической составляющей. На рис. 2.12 изображены начальный профиль образца по плотности массы и профили постепенно истираемых слоев материала после каждых 5000 циклов (нижние кривые соответствуют каждому сотому циклу).

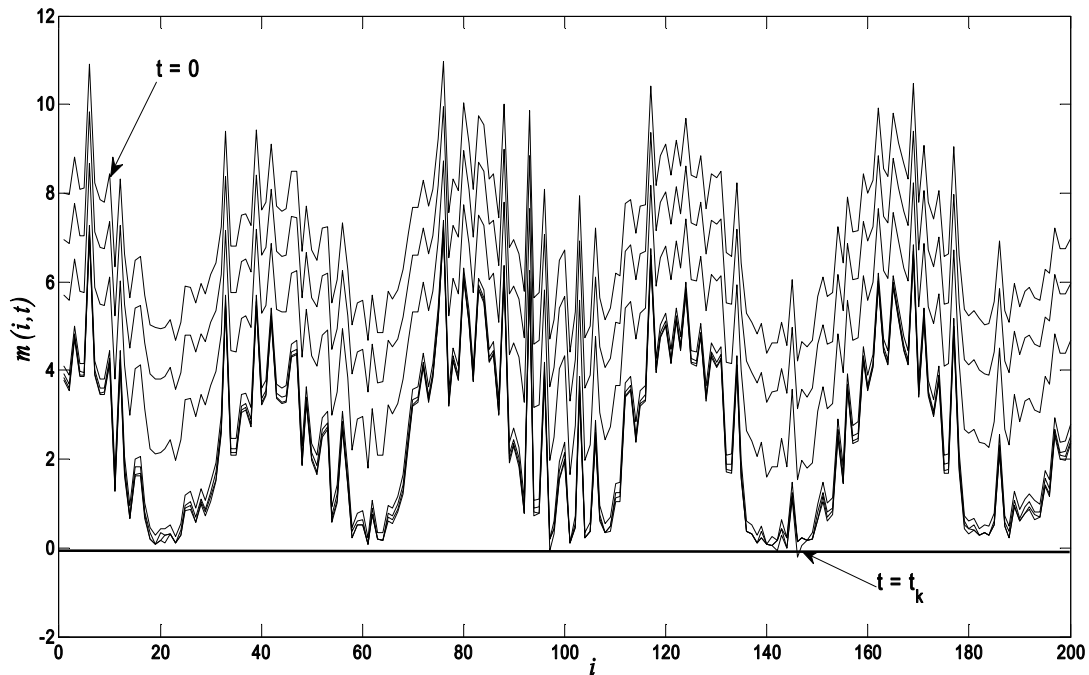


Рисунок 2.12 - Изменение массы $m(i, t)$ элементов i образца ткани за циклы t истирания

Аналогичные распределения для толщины элементов показаны на рис. 2.13. Из-за наложения кривые показывают толщину элементов лишь на завершающей стадии истирания. Наблюдается постепенная концентрация разрушения на элементах, имеющих наименьшую массу. В рассматриваемой системе действует

своего рода положительная обратная связь: чем больше истирается элемент на предыдущих циклах, тем в большей будет величина его истирания на следующем цикле. Вместе с тем, на начальной стадии истирания наблюдается эффект выравнивания неравномерности элементов по толщине как под действием нагрузки, так и вследствие потери массы.

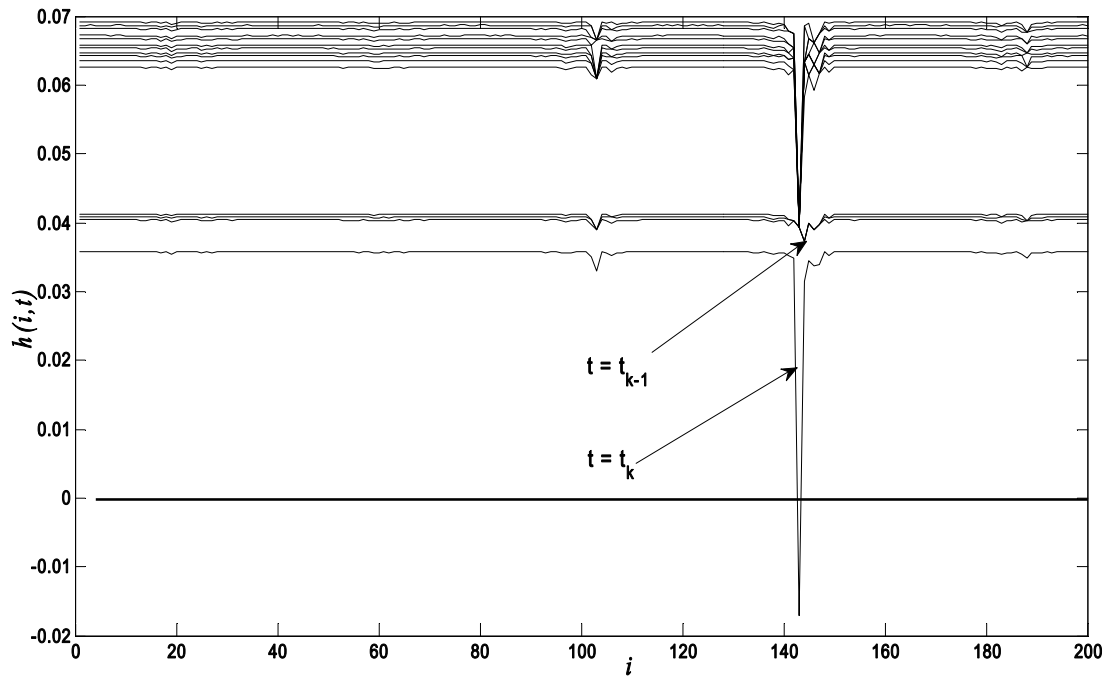


Рисунок 2.13 - Изменение толщины элементов образца ткани за циклы истирания

На рис. 2.14 показано изменение профиля толщины образца в процессе истирания при начальном профиле, содержащем только периодическую (гармоническую) составляющую без случайных компонентов. На нижних линиях профиля видно, как с увеличением числа циклов истирания оно локализуется на нескольких участках, пока не происходит полного истончения материала на одном из них. Во избежание слияния на графиках получаемых профилей для их более ясного отображения на рис. 2.13 и 2.14 профили приведены с пропуском ряда циклов.

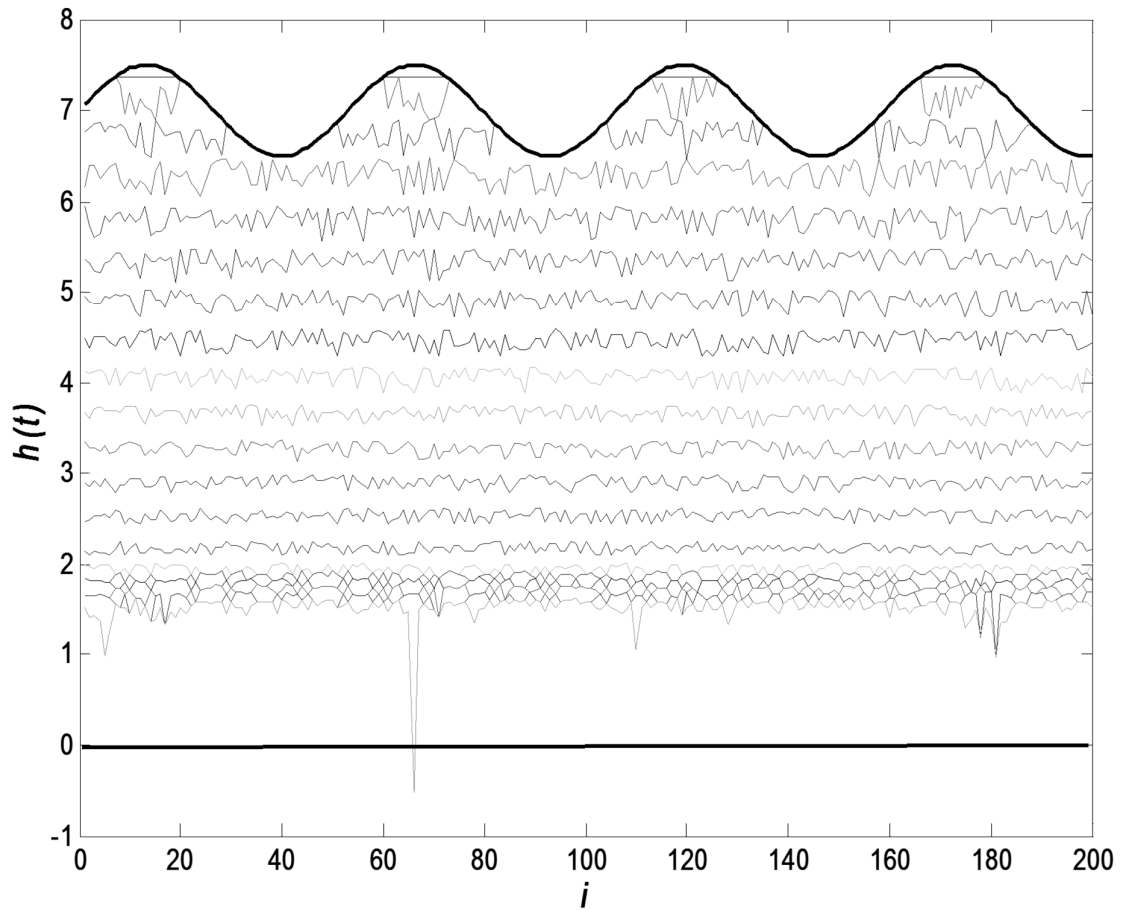


Рисунок 2.14 - Динамика истирания (периодический начальный профиль по толщине)

На рис. 2.15а приведена динамика нарастания суммарной истираемой массы материала в зависимости от числа циклов, из которой видно постепенное нарастание истираемой массы с ростом числа циклов (числа по оси абсцисс означают сотни циклов). На рис. 2.15б показано нарастание среднеквадратического отклонения (СКО) вариации толщины материала между отдельными локальными участками с увеличением числа циклов истирания. Кривая наглядно показывает нарастание «хаоса» в процессе истирания образца.

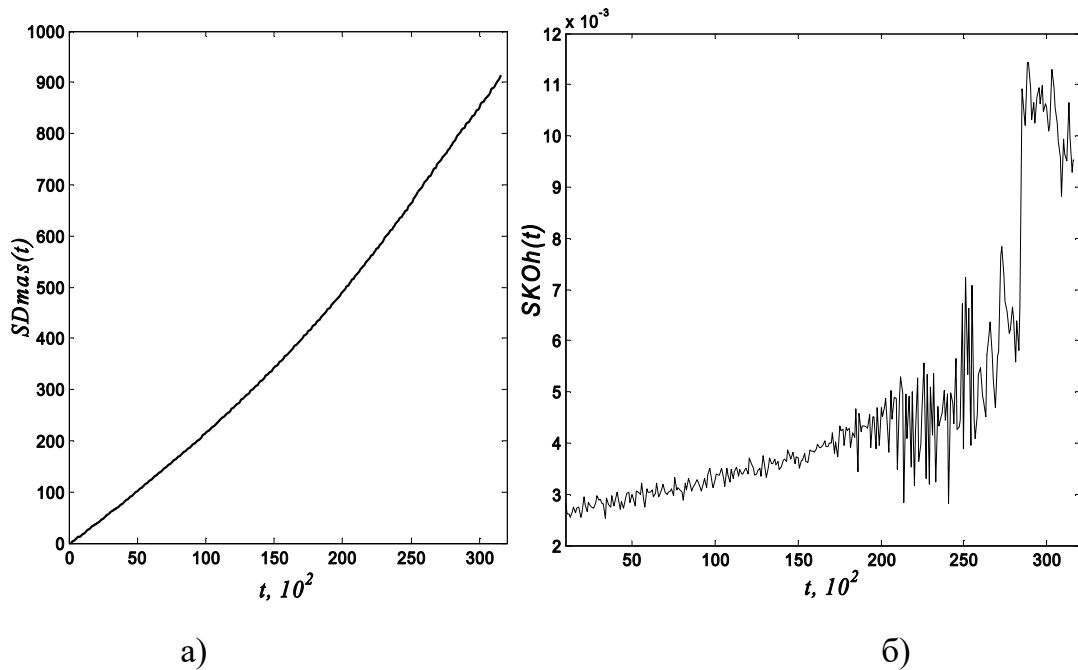


Рисунок 2.15 - Истираемая масса ($SDmas$) (а) и среднеквадратическое отклонение($SKOh$) толщины образца (б)

Предложенные математическая и компьютерная модели статистической имитации процесса истирания образца полотна описывают динамику этого процесса. Приведенные результаты натуральных экспериментов по исследованию истирания по методу Martindale для тканей специального назначения различных артикулов на качественном уровне близки к результатам компьютерного моделирования. Приведенный пример работы моделирующего алгоритма позволяет детально отслеживать динамику истирания образца ткани с учетом таких факторов, как периодичность плотности и толщины локальных участков образца, наличие случайных вариаций в свойствах волокнистой массы образца, изменения плотности, упругости, характеристик трения и пластичности в зависимости от числа циклов истирания.

Выводы по второй главе

1. Рассмотрены результаты натуральных экспериментов по испытанию на истирание образцов ткани специального назначения, содержащей

токопроводящие нити: арт. "СТ-21А", арт. "TRITON-T", "Премьер FR-350" арт. 10202а-М, арт. "Universal FR" 240, арт. СТ-20А. В этих испытаниях исследовались потери массы образцами в зависимости от числа циклов истирания. Испытания проводились по стандартной методике на установке Martindale. Главным показателем сопротивления материала к истиранию является число циклов до полного истирания.

2. Анализ результатов натуральных экспериментов позволил представить физику процесса истирания и на основании этих представлений построить модель компьютерной имитации этого процесса в виде алгоритма и его программной реализации в среде Matlab.

3. Разработанный алгоритм моделирования процесса истирания и его программная реализация были отлажены, проведена их проверка по известной методике верификации компьютерных имитационных моделей. Проверка показала, что данная модель адекватна и соответствует как имеющимся представлениям, так и данным натуральных экспериментов.

4. С помощью разработанной модели получены впервые диаграммы динамики распространения и развития истирания слоев волокнистого материала, потери массы образцами тканей в процессе истирания.

5. Разработанная модель учитывает следующие факторы: периодичность плотности и толщины локальных участков образца, наличие случайных вариаций в свойствах волокнистой массы образца, изменения плотности, упругости, характеристик трения и пластичности в зависимости от числа циклов истирания.

6. С помощью созданной модели можно спрогнозировать изменение степени истираемости ткани за определенный интервал времени истирания. Были получены зависимости степени истирания от числа циклов истирания: изменения массы и толщины элементов образца ткани, динамики истирания (изменение профиля толщины образца), динамики нарастания суммарной истираемой массы материала и среднеквадратического отклонения вариации толщины материала между отдельными локальными участками.

7. Предложена простая математическая модель динамики истирания материала. Исследован характер зависимости потери массы истираемым материалом от времени, вид которой совпадает с результатами натуральных экспериментов.

8. Методом статистического моделирования установлено, что для волокнистых материалов, содержащих большое число механически взаимосвязанных волокон, вследствие статистического разброса значений параметров и вероятностного усреднения закон сухого трения между элементами волокон интегрально проявляет себя как вязкое трение. Полученный результат имеет значение для моделирования структуры и свойств волокнистого материала, поскольку служит обоснованием возможности линеаризации зависимостей и моделей.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

3.1 Компьютерное моделирование динамики износа и старения материалов в условиях нормальной эксплуатации

Рассмотрим процесс возникновения и развития нарушений в структуре и свойствах материала при его «естественном» износе и старении. Далее будем говорить об этих нарушениях как о «дефектах» в материале. Механизм процесса представляется следующим образом. В первоначально бездефектном образце материала по тем или иным причинам возникают центры развития дефектов. При нормальных условиях эксплуатации причины дефектов весьма разнообразны и разнесены во времени. Отследить их практически невозможно. Поэтому возникновение дефектов можно рассматривать как случайный вероятностный процесс [124].

В однородном материале центры дефектов первоначально имеют минимальные (точечные) размеры и распределены равномерно по объему материала. Моменты возникновения дефектов образуют случайный ординарный поток событий, который можно описать моментами времени $\{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots\}$ или интервалами времени $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \dots\}$ между событиями. Возможна и «гибель» некоторых дефектов, означающая их исчезновение.

Описанный процесс весьма схож с известным процессом «гибели – рождения». Простейшая Марковская модель такого процесса допускает аналитическое решение для вероятностей $p_n(t)$ числа n дефектов к определенному моменту времени t . Модель является Марковской, если интервалы τ_n - независимые и экспоненциально распределенные случайные величины с одинаковыми параметрами распределения. Вероятности $p_n(t)$ в этом случае являются решениями системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова. Исследование аналитических методов решения этой системы и применения модели Марковских процессов «гибели - рождения» для процессов старения изложены, например, в [19, 125, 126].

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda_{01}p_0(t) + \lambda_{10}p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{01}p_0(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{12})p_1(t) + \lambda_{21}p_2(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_n(t)}{dt} &= \lambda_{n-1,n}p_{n-1}(t) - (\lambda_{n,n-1} + \lambda_{n,n+1})p_n(t) + \lambda_{n+1,n}p_{n+1}(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для процессов без «гибели» (т.н. процессов «чистого размножения») уравнения А.Н. Колмогорова для вероятностей состояний (3.1) приобретают вид [20, 127]

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda_0 p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 p_1(t) + \lambda_0 p_0(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_n(t)}{dt} &= -\lambda_n p_n(t) + \lambda_{n-1} p_{n-1}(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

При начальных условиях $p_0(0) = 1$; $p_k(0) = 0$, $k = 1, 2, \dots$ решение системы (3.2) в изображениях по Лапласу приводится к свертке

$$P_0(s) = \frac{1}{s + \lambda_0}; \quad P_n(s) = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{(s + \lambda_0)(s + \lambda_1) \dots (s + \lambda_n)}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

При равных интенсивностях возникновения дефектов $\lambda_0 = \dots = \lambda_n \dots$ вероятности числа дефектов к моменту t распределены по закону Пуассона

$$p_n(t) = \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 t) \quad (3.4)$$

со средним и дисперсией, равными $\lambda_0 t$.

Возможности аналитических методов являются весьма ограниченными. Поэтому более целесообразно перейти к разработке компьютерной имитационной модели, позволяющей в рамках одного алгоритма имитации исследовать более широкий класс динамических процессов накопления дефектов при износе и старении материала.

Рассмотрим динамическую модель «появления – исчезновения» точечных дефектов. Интервалы времени между появлениями новых дефектов и исчезновением уже существующих дефектов являются независимыми случайными величинами. Схематически динамика появления и исчезновения дефектов в материале изображена на рис. 3.1. На рисунке τ_1, τ_2, \dots - интервалы времени от очередного события (появления нового дефекта или исчезновения существующего) до момента появления следующего дефекта; $\theta_1, \theta_2, \dots$ - интервалы времени от очередного события до исчезновения одного из существующих дефектов; $n(t)$ – число дефектов в материале на момент времени t .

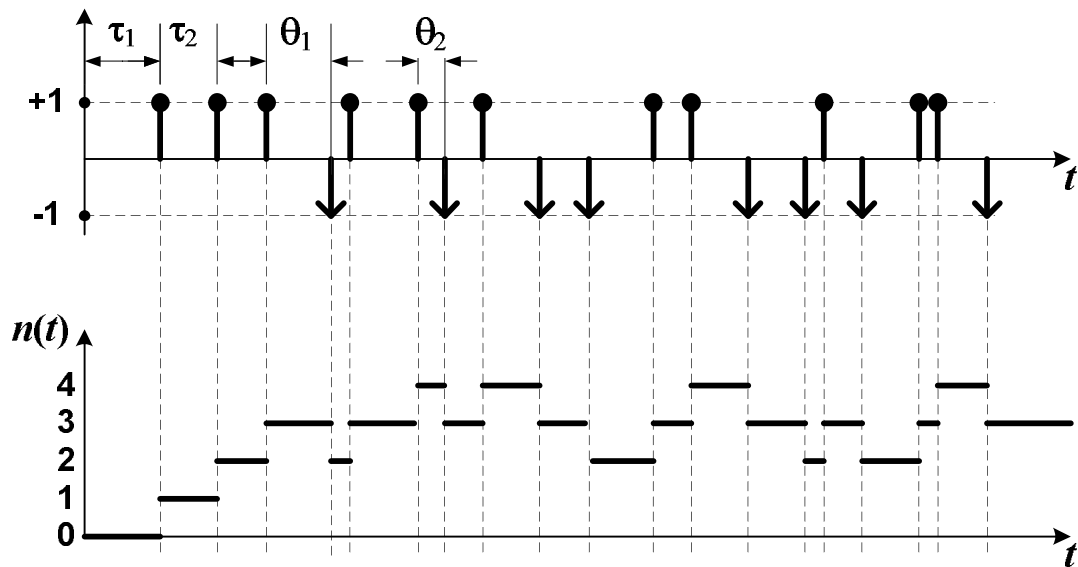


Рисунок 3.1 - Динамика появления и исчезновения дефектов в материале

Описанная схема возникновения и исчезновения дефектов известна в теории вероятностей как «задача о дискретном одномерном блуждании», «задача о разорении игрока», «задача о первом достижении границы». При определенных упрощающих предположениях эти задачи имеют аналитическое решение [3, 17]. Отличие рассматриваемой задачи о накоплении дефектов от перечисленных классических задач теории вероятности в том, что в ней не допускаются физически бессмысленные отрицательные значения числа дефектов, что

блокируется соответствующим условием в процедуре, реализующей алгоритм моделирования.

Предположим, что число одновременно присутствующих в материале дефектов не должно превышать предельное значение N . Обозначим $TauSr$ и $TetaSr$ – средние значения случайных величин τ и θ .

На рис. 3.2 представлены четыре реализации накопления числа дефектов $n(t)$, полученные с помощью приведенной модели при одних и тех же стартовых условиях: $TauSr = 5$ ед., $TetaSr = 10$ ед., $N = 20$ дефектов, интервалы распределены по экспоненциальному закону. Видно, что время накопления одного и того числа дефектов может сильно различаться в разных реализациях [125, 126]. Поэтому для использования результатов моделирования следует получить достаточно надежные оценки распределения этого времени и изучить зависимость этого распределения от особенностей моделирования.

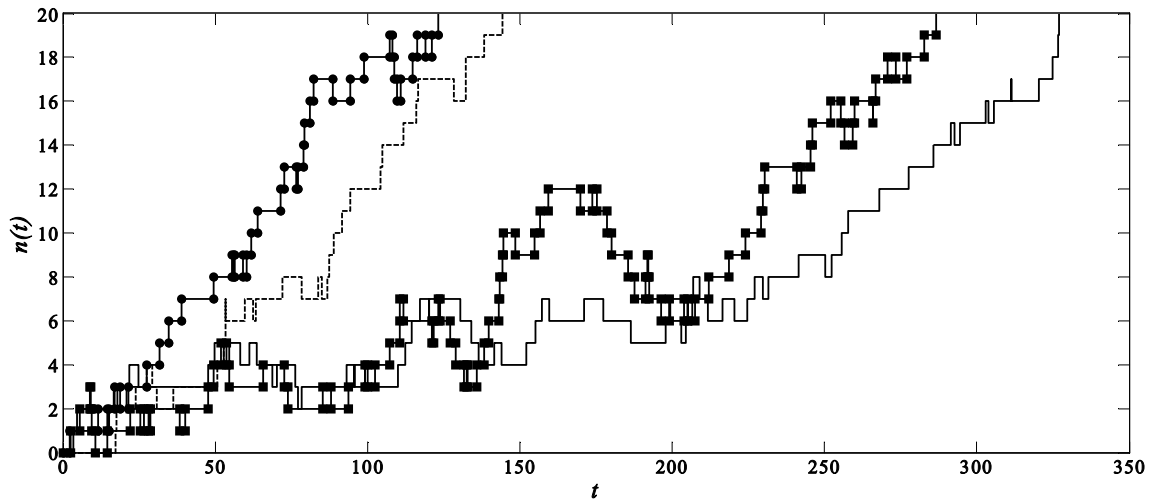


Рисунок 3.2 - Пример четырех реализаций накопления числа дефектов $n(t)$

Предварительную числовую оценку можно получить исходя из следующих соображений. Допустим, что к моменту T число дефектов в материале достигло N . Число дефектов, появившихся за это время, обозначим nr , а исчезнувших nt . Тогда $N = nr - nt$, а среднее время на появление этих дефектов можно

представить выражением $T = np \cdot \text{TauSr} + nm \cdot \text{TetaSr}$. Решение этих двух уравнений относительно np и nm при $T > N \cdot \text{TauSr}$

$$nm = \frac{T - N \cdot \text{TauSr}}{\text{TauSr} + \text{TetaSr}}; \quad np = \frac{T + N \cdot \text{TetaSr}}{\text{TauSr} + \text{TetaSr}} \quad (3.5)$$

Например, если $\text{TauSr} = 5$ ед., $\text{TetaSr} = 10$ ед., то чтобы к моменту времени $T = 2500$ ед. в материале присутствовало $N = 50$ дефектов, за это время должно было появиться $np = 200$ и $nm = 150$ из них должно исчезнуть.

Для оценки распределения времени накопления N дефектов было выполнено $N_{\text{повт}} = 10000$ повторных независимых прогоном модели. Накопленные значения T позволили получить оценки распределения этих значений. Гистограмма значений T приведена на рис. 3.2. С применением инструментария dfittool пакета Matlab было установлено, что по критерию максимального правдоподобия гистограмма наилучшим образом соответствует т.н. инверсному Гауссову распределению (распределению Вальда) с функцией плотности вероятности

$$f(T) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi T^3}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{2\mu^2 T}(T - \mu)^2\right\} = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi T^3}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{2\mu}\left(\frac{T}{\mu} - 2 + \frac{\mu}{T}\right)^2\right\}, \quad T > 0 \quad (3.6)$$

Здесь μ - математическое ожидание T , μ^3 / λ - дисперсия T , μ / λ - квадрат коэффициента вариации T .

Это распределение возникает при моделировании последовательности случайных шагов, например, в моделях броуновского движения или задачах последовательного контроля Вальда. Например, рассмотрим последовательность независимых шагов за фиксированные интервалы времени dt со случайными независимыми скоростями v_j . Тогда смещение $S(N)$ точки за N шагов будет равно сумме

$$S(N) = dt \sum_{j=1}^N v_j \quad (3.7)$$

Очевидно, что распределение смещения $S(N)$ можно найти через характеристические функции распределения v_j . В силу центральной предельной теоремы при большом числе шагов смещение $S(N)$ распределено по нормальному закону. Изменим схему и будем считать, что смещения точки на каждом шаге

одинаковы ds , а затраты времени на шаг равны $dt_j = ds / v_j$. Тогда суммарные затраты времени на N шагов равны

$$T(N) = ds \sum_{j=1}^N \frac{1}{v_j} \quad (3.8)$$

В этом случае распределение $T(N)$ зависит от распределения величин, обратных скоростям на каждом шаге. Заметим, что величины скоростей v_j должны содержать детерминированную составляющую V_j . Она должна быть одного знака и достаточно большой, чтобы значения dt_j были не только всегда одного знака, но и не содержали больших значений (при v_j , близких к нулю). Если случайные составляющие скоростей распределены по нормальному закону, то распределение $T(N)$ является инверсным Гауссовым распределением.

Вполне естественно, что именно это распределение оказалось наилучшей аппроксимацией полученных модельных данных. Кривая функции плотности вероятности (*InvNormDistr*) показана на рис. 3.3.

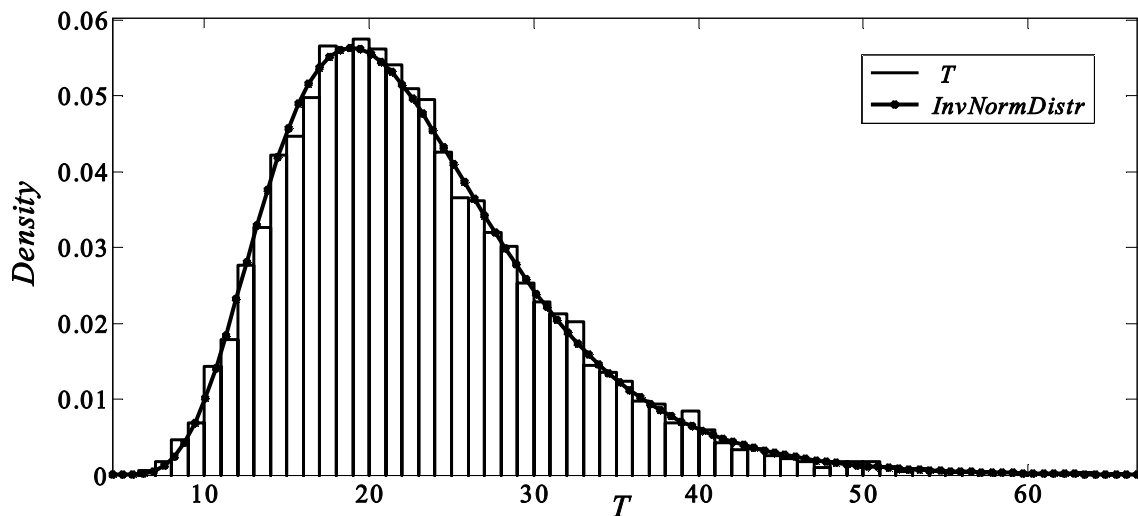


Рисунок 3.3 - Гистограмма (T) и кривая функции плотности вероятности (*InvNormDistr*)

Оценки параметров распределения: $\lambda = 179,36$ со среднеквадратической ошибкой 2,54; $\mu = 22,88$ со среднеквадратической ошибкой 0,08. Оценки среднего и дисперсии: $T_{sr} = 22,88$; $S^2T = 66,81$. Большой разброс значений T показывает,

что при прогнозировании сроков старения материала ориентироваться только на числовые характеристики, например, среднее значение, было бы ошибкой.

3.2 Имитационные модели процессов износа и старения волоконистых материалов при нормальных условиях эксплуатации

Рассмотрим процесс возникновения и развития дефектов в структуре материалов при его износе и старении. В первоначально бездефектном образце материала по тем или иным причинам возникают центры развития дефектов. Появление нарушений можно рассматривать, как случайный вероятностный процесс [125, 126].

Для изучения процессов износа и старения материалов была построена компьютерная модель в Matlab [128].

Обозначим через Tau интервал до появления дефекта, а через $Teta$ интервал до исчезновения дефекта. Рассмотрим, как меняется распределение времени T до появления N дефектов в материале в зависимости от вида распределения интервалов времени Tau и $Teta$. Пусть Tau и $Teta$ распределены по равномерному закону с диапазоном варьирования значений для Tau $[0; 2TauSr]$ и для $Teta$ $[0; 2TetaSr]$ при $N = 20$.

Компьютерный эксперимент показал, что и в этом случае наилучшей аппроксимацией гистограммы для $T(N)$ по критерию максимального правдоподобия является инверсное Гауссово распределение.

На рис. 3.4 приведена гистограмма значений T , полученных по 10000 прогонам модели, и ее аппроксимация инверсным Гауссовым распределением (*InvNormDistr*).

Рассмотрим, как меняется распределение T в зависимости от предельного значения N . Для этого повторим моделирование при $N = 200$. Отметим значительное возрастание (на порядок) затрат компьютерного времени на моделирование. Результирующая гистограмма значений T приведена на рис. 3.5. Там же показано ее сглаживание кривой инверсного Гауссова распределения. Видно, что и при увеличенном на порядок наибольшем числе дефектов N форма распределения, как и его наилучшая аппроксимация инверсным Гауссовым

распределением, остаются неизменными, хотя распределение становится весьма близким к нормальному – вступает в силу центральная предельная теорема. Однако оценки параметров меняются на несколько порядков: $\lambda = 136441$ со среднеквадратической ошибкой 1929,6; $\mu = 1996,23$ со среднеквадратической ошибкой 2,41. Оценки среднего и дисперсии: $Tsr = 1996,23$; $S^2T = 58302,2$.

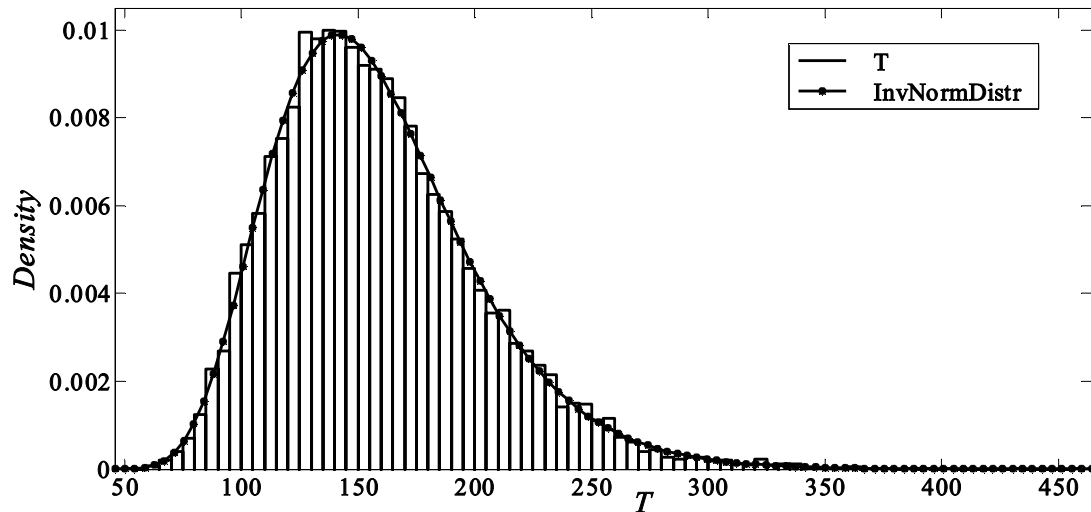


Рисунок 3.4 - Гистограмма значений T

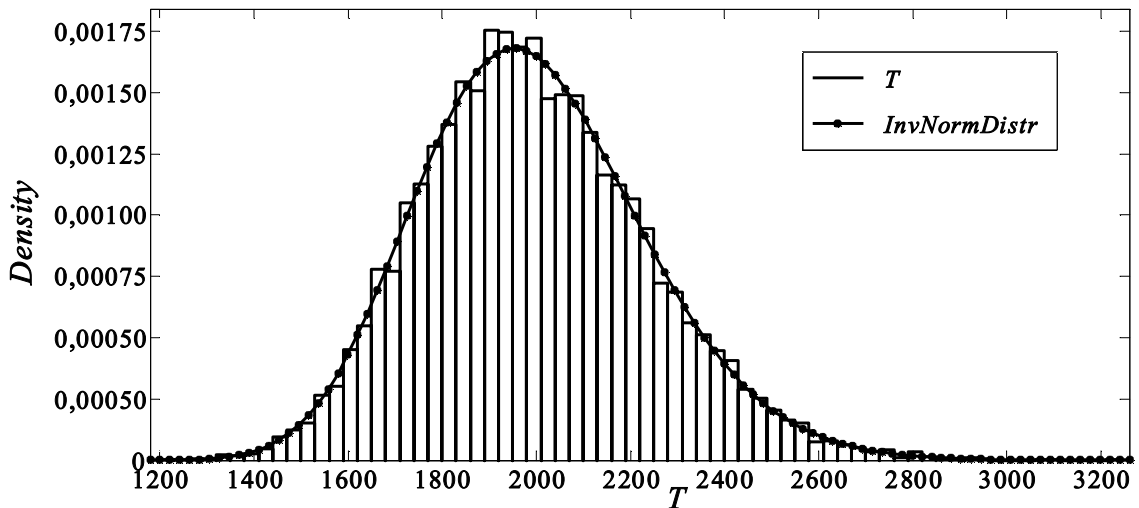


Рисунок 3.5 - Гистограмма значений T

Модель позволяет исследовать влияние нарушений стационарности образования дефектов. Например, зачастую интенсивность возникновения дефектов в единицу времени зависит от числа уже имеющихся дефектов [20, 21].

Эта, своего рода «положительная обратная связь» ускоряет процесс появления дефектов и делает этот процесс нестационарным во времени. Один из простейших способов учесть этот эффект, характерный для многих полимерных материалов, - сделать скорость появления новых дефектов зависящей от их числа: $TauSr(t) = TauSr_0 / n(t)$. Внесем соответствующие изменения в процедуру моделирования и выполним прогоны модели при прочих условиях, соответствующих начальному варианту. Соответствующая гистограмма распределения времени накопления первых $N = 20$ дефектов, полученная по 10000 прогонам модели, приведена на рис. 3.6. Для сравнения на том же рисунке показана гистограмма для случая стационарного процесса, когда средние интервалы между моментами появления новых дефектов $TauSr$ – постоянная величина.

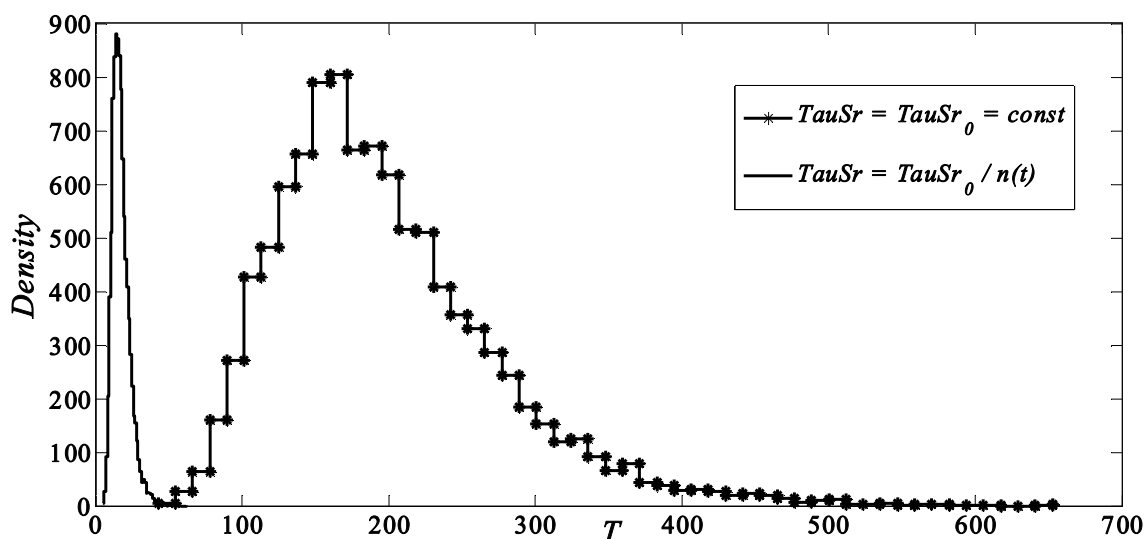


Рисунок 3.6 - Гистограмма распределения времени накопления первых N дефектов

Из рисунка видно, что нестационарность процесса сильнейшим образом сказывается на нарастании числа дефектов, что, в свою очередь, отражается на степени износа и старении материала.

Другой вариант моделирования процессов износа, старения и разрушения полимерного материала в нормальных условиях эксплуатации и хранения исключает возможность самопроизвольного исчезновения дефектов.

Возникающие в отдельных точках материала дефекты не только не исчезают, но постепенно разрастаются, захватывая все большие области. Скорости нарастания этих областей, вообще говоря, различны и случайны для разных дефектов, причем могут быть разными и в разные стороны от точки зарождения дефекта. Кроме того, средняя скорость нарастания областей также может меняться в зависимости от разных причин: размеров области, интервала времени, прошедшего с момента возникновения дефекта, близости других дефектов.

Все эти варианты легко включаются в основной алгоритм моделирования, обобщенная структура которого приведена ниже (список алгоритмов приведен в Приложении 1). Появление каждого нового дефекта интерпретируется как одиночное случайное событие. Интервалы времени между событиями – случайные величины, модельные распределения которых и их параметры выбираются исходя из физических соображений. Аналогично в пределах размеров образца моделируемого материала генерируются координаты точек возникновения дефектов. Алгоритм 2 состоит из следующих этапов:

1. Задание стартовых значений и объявление массивов.
2. Задание начального значения модельного времени $t = 0$.
3. Пока $t \leq T_{mod}$, выполнять шаги 3.1 – 3.8:
 - 3.1. Генерация интервала $\tau(k)$ до k -го события в соответствии с выбранным законом распределения и значениями параметров этого распределения.
 - 3.2. Определение момента появления k -го события $T(k) = T(k-1) + \tau(k)$.
Перенос модельного времени $t = T(k)$.
 - 3.3. Генерация координаты k -го центра дефекта в соответствии с выбранным законом распределения центров в объеме материала.
 - 3.4. Задание стартовых значений размерам и границам области для k -го центра дефектов.
 - 3.5. Моделирование новых границ областей для центров $j = 1, \dots, k-1$ на момент времени $T(k)$.

3.6. Проверка выхода новых границ за пределы моделируемого образца. При необходимости ограничение областей этими пределами.

3.7. Проверка пересечений областей отдельных центров $j = 1, \dots, k - 1$. Объединение пересекающихся областей в одну общую область.

3.8. Изменение скорости нарастания областей дефектов в зависимости от времени с момента образования дефекта, размеров области, числа центров в пределах одной области, свойств материала в области дефекта.

4. Завершение моделирования.

На рис. 3.7а приведен пример работы программы, реализующей описанный алгоритм. Реализация выполнена в Matlab. Модель имитировала динамику возникновения и развития дефектов в одномерном образце материала (например, полимерной нити) длиной $L = 1000$ ед. в течение времени $T_{mod} = 600$ ед. Интервалы времени между появлениями дефектов – независимые случайные величины с экспоненциальным распределением значений и средним интервалом $TauSr = 5$ ед.: $\tau \sim Ex(TauSr)$. Размер одномерной области d вокруг начального центра дефекта нарастает со случайными скоростями по обе стороны от центра Xc

$$\begin{aligned} d &= Xp - Xm, \quad Xp = Xc + d_p, \quad Xm = Xc - d_m, \\ d_p &\sim Ex(d_{pSr}), \quad d_m \sim Ex(d_{mSr}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Величина скоростей случайна и также принята распределенной по экспоненциальному закону. На рис. 3.7б показан фрагмент, иллюстрирующий развитие областей, порожденных дефектами, при увеличенных скоростях роста областей. Области постепенно «захватывают» образец по всей длине. Однако, на приведенном фрагменте области каждого дефекта еще не разрослись до размеров, приводящих к их пересечению и, как следствие, к слиянию областей. Разумно предположить, что скорость нарастания размеров области дефектов увеличивается не только с увеличением этих размеров, но и с увеличением числа центров дефектов, породивших эту область. Таким образом, в некоторых из областей, возникших первоначально случайным образом и более или менее равномерно рассеянных по объему материала, начинается лавинообразно ускоренное развитие дефектов, что и приводит к «гибели» образец материала.

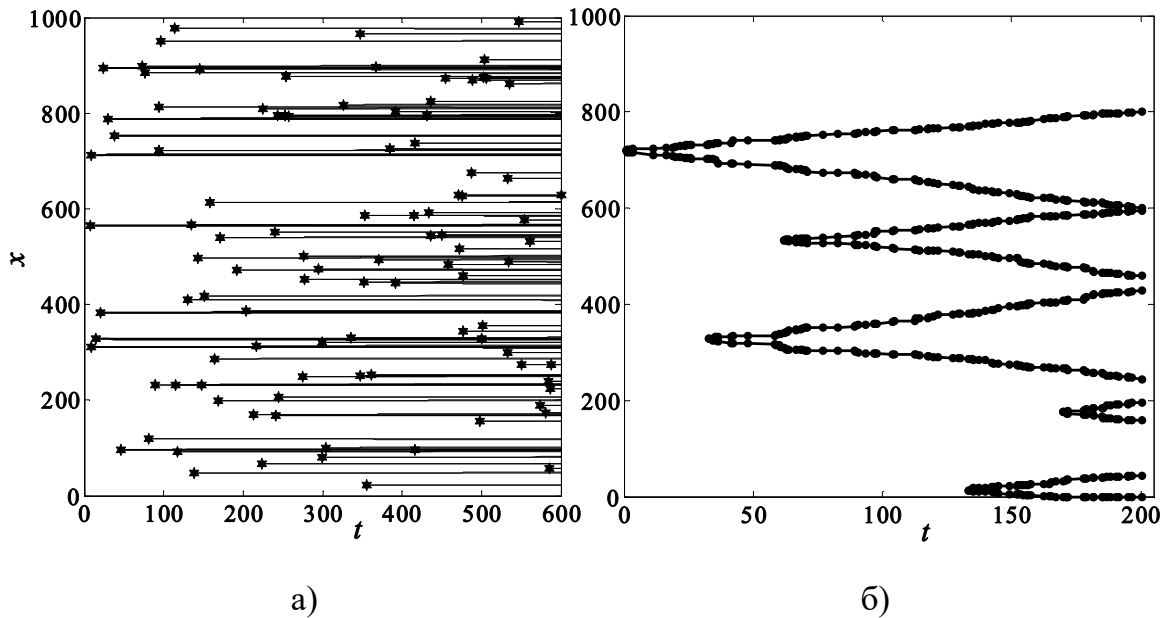


Рисунок 3.7 - Динамика появления и развития дефектов в одномерном образце по длине x во времени t

Для оценки динамики процесса необходим критерий, по которому можно сравнивать различные варианты моделей. В качестве такого критерия примем время моделирования T_p до первого пересечения областей разных дефектов или до появления нового дефекта в пределах области материала, захваченной уже существующим дефектом. Очевидно, что эти события не обязательно являются катастрофичными для материала, но, во всяком случае, они являются признаком перехода материала в новую стадию износа и старения. Будем также фиксировать число дефектов N_p , возникающих к моменту времени T_p .

Первой задачей, которую решим с помощью предложенной модели, будет определение чувствительности результатов моделирования (выбранных критериев T_p и N_p) к форме закона распределения интервалов времени между появлениями дефектов. Решение этой задачи имеет важное практическое значение, поскольку определяет необходимость идентификации этого распределения на основе реальных экспериментальных данных.

В 1-м варианте модели в качестве этого закона принято экспоненциальное распределение случайных интервалов τ со средним $TauSr$. Во 2-м варианте интервалы времени моделируются равномерно распределенными значениями в диапазоне от нуля до $2 TauSr$. В 3-м варианте интервалы времени между моментами появления дефектов постоянны и равными $\tau = TauSr$. Таким образом, при одном и том же среднем значении τ формы распределения в вариантах сильно отличаются.

Для каждого из вариантов было выполнено $N = 10000$ прогонов модели. По ним были построены гистограммы оценок распределений и кумулятивные распределения, а также выполнен подбор наиболее близких распределений из числа известных типовых распределений. Соответствующие оценки функций плотности вероятностей p^* и интегральных функций распределения Sp^* для Tr приведены на рис. 3.8а и 3.8б, а для Np – на рис. 3.9а и 3.9б.

Из обширного списка «типовых» распределений во всех трех вариантах модели для Tr наиболее подходящим оказалось распределение Вейбулла. Сглаживающая кривая этого распределения показана для 1-го варианта модели на рис. 3.10. Проверка гипотезы о соответствии распределению Вейбулла значений Tr для 1-го и 2-го вариантов модели не опровергла эту гипотезу с вероятностями ошибки соответственно 0.064 и 0.451, тогда как эту же гипотезу для 3-го варианта модели следует отвергнуть с практически нулевой вероятностью ошибки.

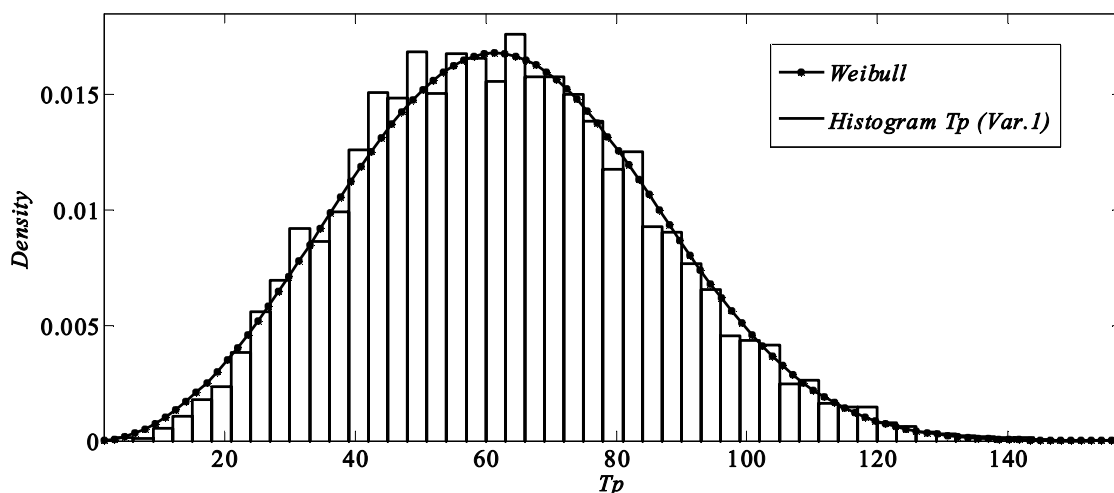


Рисунок 3.10 - Сглаживающая кривая распределения Вейбулла показана для 1-го варианта модели

Аналогичная картина наблюдается для Np . Значения этой дискретной случайной величины имеют распределение, представленное на рис. 3.11 точечными диаграммами для 1-го, 2-го и 3-го вариантов модели. Эти диаграммы хорошо аппроксимируются отрицательным биномиальным распределением. На рисунке приведены соответствующие дискретные распределения NegBin для трех вариантов модели, изображенные для большей наглядности непрерывными кривыми.

Таким образом, закон распределения интервалов τ существенно влияет как на параметры распределения, так и на сам закон распределения критериев распространения дефектов в образце материала.

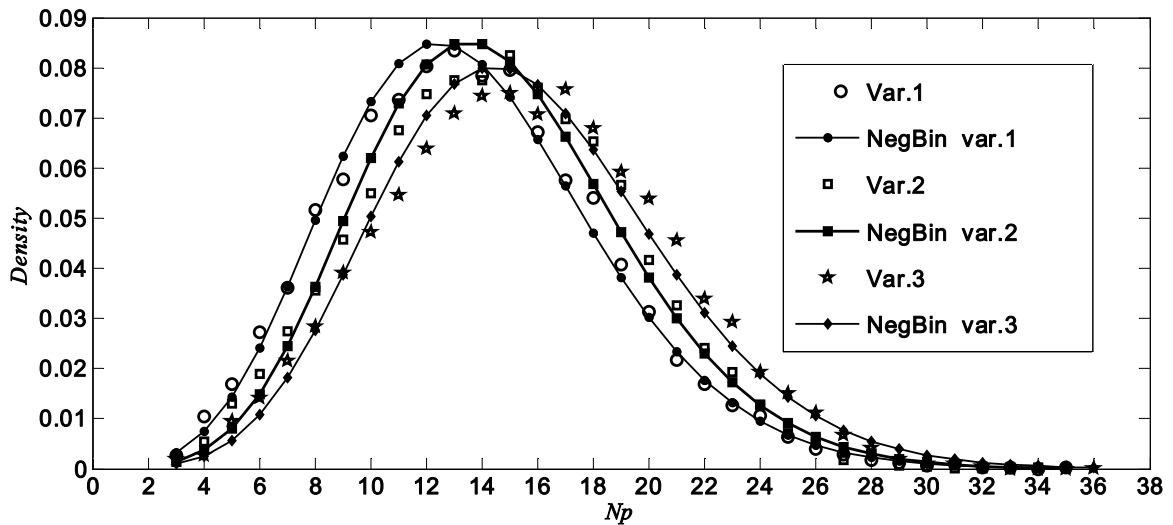


Рисунок 3.11 - Распределения NegBin для трех вариантов модели

Исследуем теперь, как время T_p зависит от интенсивности появления дефектов, т.е. от среднего значения $TauSr$. Выберем для случайной величины t экспоненциальный закон распределения как наиболее соответствующий представлениям о появлении дефектов в нормальных стабильных условиях эксплуатации материала. Величину $TauSr$ будем варьировать в пределах от 1% T_{mod} до 20% T_{mod} при постоянной средней скорости нарастания области дефекта V_{sr} в обе стороны от центра. При таком предположении средние размеры области будут пропорциональны времени t разрастания дефекта $d_{psr} = d_{msr} = d_{sr} = V_{sr} t$. Саму величину размера области будем по-прежнему считать случайной, и моделировать в соответствии с формулами (2.9).

В качестве контролируемых величин в этом эксперименте с моделью выберем числовые характеристики распределения времени T_p : его среднее значение T_pSr , медиану T_pMe , среднеквадратическое отклонение ST_p и интердецильный $T_pD(0.1-0.9)$ и интерквартильный $T_pD(0.25-0.75)$ размахи (рис. 3.12б).

Оценивались также 10%, 25%, 75% и 90% границы выборочных значений T_p . На рис. 3.12а они обозначены $T_pD 0.10$, $T_pD 0.25$, $T_pD 0.75$ и $T_pD 0.90$. Выборочные распределения T_p и перечисленные числовые характеристики оценивались по 10000 прогонов модели для каждого значения $TauSr$.

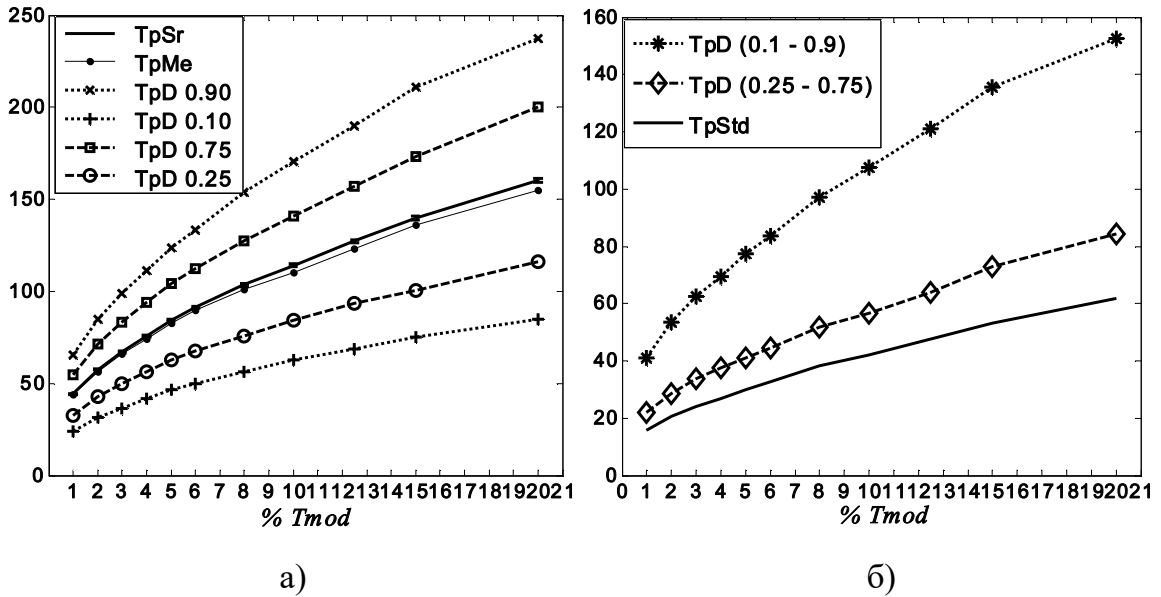


Рисунок 3.12 - Выборочные распределения Tr и его числовые характеристики

Кривые на рис. 3.12 показывают, что с увеличением средней продолжительности интервалов между появлениями дефектов продолжительность развития областей дефектов также нарастает, хотя скорость этого нарастания постепенно снижается. Кривые хорошо аппроксимируются параболической зависимостью $\sim a + b (TrSr)^{1/2}$, коэффициенты которой a и b можно оценить, например, методом наименьших квадратов.

Рассмотрим теперь возможности построенной модели для имитации нестационарных процессов появления и развития дефектов. Для этого смоделируем процесс, в котором на отрезке от одной трети до середины моделируемого времени T_{mod} , т.е. от $T_b = T_{mod} / 3$ до $T_e = T_{mod} / 2$, интенсивность появления дефектов возрастает в десять раз. Это отражается в модели тем, что на указанном отрезке времени моделирования средний интервал между появлениями дефектов сокращается с 10 ед. до 1 ед. После окончания отрезка времени $[T_b; T_e]$ интенсивность появления дефектов восстанавливается до исходной величины. Подобная модель локального нарушения стационарности в процессе старения материала является довольно типичной (увеличение нагрузок, интенсификация воздействия «вредных» внешних факторов и т.п. на конечном интервале времени).

Описанное нестационарное воздействие на материал легко учитывается незначительными модификациями моделирующей программы и может быть включено в исходную модель процесса. На рис. 3.13 приведены распределения числа выборочных значений T_p и N_p для стационарного и нестационарного варианта старения материала, полученные по 10000 прогонам модели.

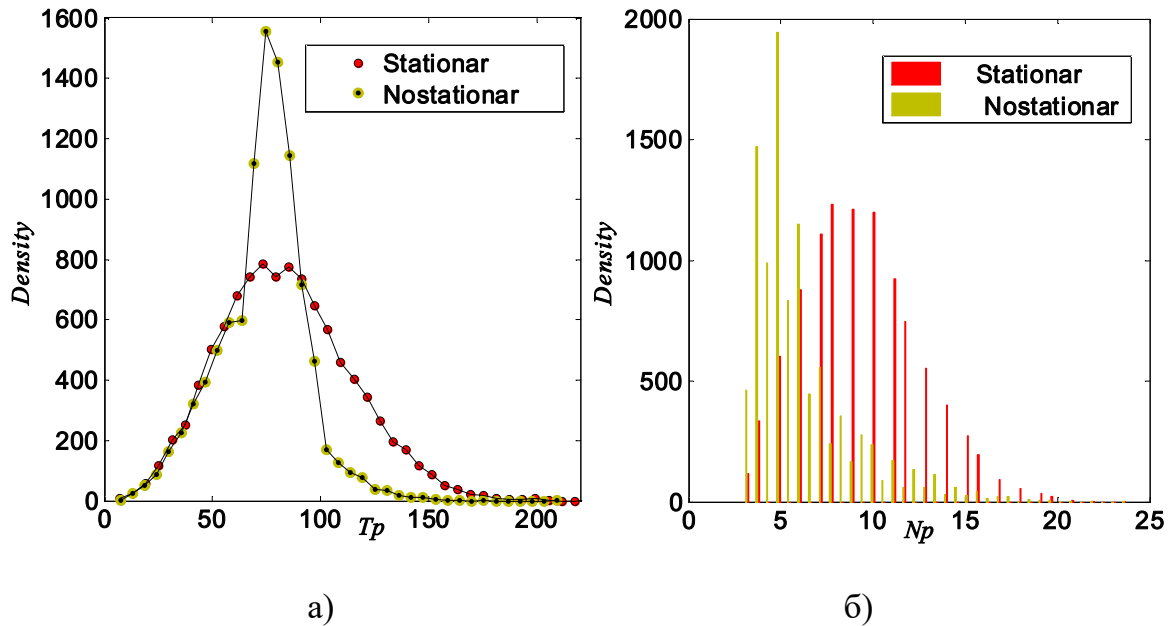


Рисунок 3.13 - Распределения числа выборочных значений T_p и N_p

На рисунке видно, что нестационарный режим старения материала заметно отражается не только на параметрах, но и форме распределения T_p и N_p . Рассматриваемая модель способна обнаруживать эти различия, а значит, может быть использована как удобный инструмент для исследования процессов старения материалов.

Рассмотренная модель использует предположение, что пределом в развитии процессов износа и старения является пересечение соседних областей дефектов. По этому событию определялось время старения, и распределение этого времени как случайной величины было объектом рассмотрения. Между тем, пересечение областей дефектов является довольно искусственным критерием окончания моделирования и далеко не всегда означает необходимость прекращения

эксплуатации материала или изделия из него. В качестве альтернативного критерия может быть выбран размер областей, захваченных дефектами. Для исследования динамики распространения дефектных областей по длине одномерного материала в процедуру модели были включены фрагменты кода, позволяющие оценивать число дефектов, влияющих на отдельный элемент длины. Временные диаграммы возникновения и распространения дефектов по длине образца, аналогичные рис. 3.7, приведены на рис. 3.14.

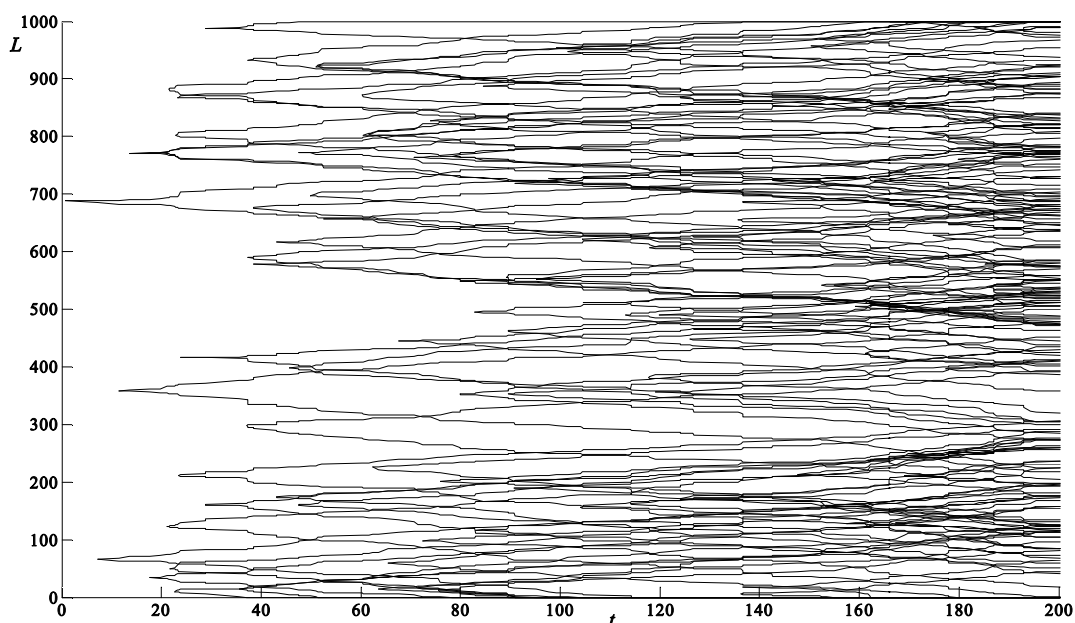


Рисунок 3.14 - Возникновение и распространение областей дефектов с течением времени t по длине образца L

Диаграммы разрастания областей дефектов по длине образца во времени приведены на рис. 3.15. По оси абсцисс отложена координата вдоль длины образца. По оси ординат показано число дефектов, у которых области распространения заходят на соответствующую координату образца. Распределения построены с шагом 10 по числу возникших на образце дефектов в пределах времени моделирования 200 ед.

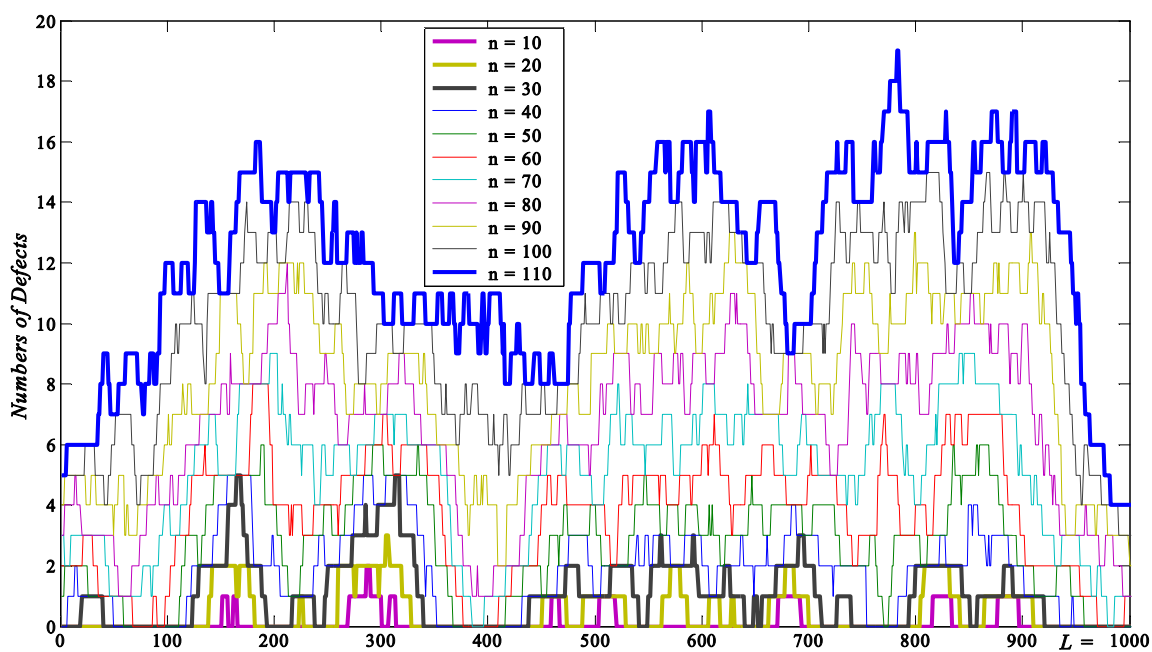


Рисунок 3.15 - Динамика распределения числа областей дефектов по длине образца

Как видно из рисунков, модель позволяет детально исследовать динамику старения образца и развития в нем дефектов и областей, на которые распространяется их влияние. При этом существенную роль играют случайная природа возникновения этих дефектов и случайная скорость их распространения в образце. В данном случае моделировалось старение образца в стационарных условиях, поскольку ни параметры распределений, ни сами распределения случайных величин, ни параметры динамики процесса не менялись в течение моделируемого отрезка времени.

3.3 Имитационная модель износа и старения одномерного материала в нестационарных условиях внешних воздействий

Процесс износа и старения материала можно представить потоком возникающих в материале дефектов [129]. Их накопление и расширение области влияния ведет к изменению и потере эксплуатационных свойств материала. Авторами разработана компьютерная модель, имитирующая динамику

возникновения и развития дефектов в одномерном материале, например, полимерных волокнах, которые могут рассматриваться как основные причины потери материалом эксплуатационных свойств, его износа и старения. Эта динамика представляет собой вероятностный процесс, подобный ветвящимся процессам гибели – рождения [130, 131]. Для исследования такого рода процесс целесообразно воспользоваться методами статистического моделирования. Примеры таких моделей приведены в [19-21, 132].

Возможности модели могут быть значительно расширены в различных направлениях без существенных изменений в базовом алгоритме, но с добавлением к нему фрагментов, детализирующих процесс появления и развития дефектов. Ниже приведены результаты работы модели, в которой предусмотрены возможности нарушения стационарности в возникновении дефектов. Нарушения могут быть вызваны относительно краткосрочным более интенсивным воздействием на материал, которое значительно интенсифицирует появление новых дефектов в материале и ускоряет расширение области действия на материал уже существующих дефектов.

В качестве критерия для контроля динамики распространения областей влияния каждого дефекта по длине материала используем распределение $D(x,t)$ числа дефектов, влияющих на малый интервал dx в окрестности координаты x по длине материала L . Для обнаружения нарушений стационарности возникновения и развития дефектов примем также упрощающее предположение, что возникшие дефекты равноценны по степени их влияния на материал. Поэтому можно ограничиться лишь числом, дефектов, захватывающих своим влиянием некоторую область длины материала.

Алгоритм моделирования (Алгоритм 3) включает следующую последовательность шагов:

1. Задание параметров моделируемого варианта образца: длина образца L , средний интервал времени между появлениями дефектов в стационарном $TsSr$ и нестационарном $TcSr$ режимах эксплуатации образца, и др.

2. Задание условий моделирования: моделируемый интервал времени T_{mod} , моменты начала T_{s1} и окончания T_{s2} нестационарного режима, и др.
3. Задание стартовых значений переменным: текущее время моделирования t , число дефектов, границы областей каждого дефекта.
4. Начало основного цикла. Пока t меньше T_{mod} :
 - 4.1. Анализ попадания в область стационарного или нестационарного воздействия на образец. В зависимости от результата и времени t задание текущих значений для параметров распределений интервалов времени между появлениями дефектов и скоростей разрастания области влияния каждого дефекта
 - 4.2. Генерация интервала до нового дефекта, его координаты на образце.
 - 4.3. Нарастивание счетчика числа дефектов на единицу. Перемещение модельного времени в момент появления нового дефекта.
 - 4.4. Генерация значений для скоростей нарастания расширения границ областей по каждому существующему дефекту. Расчет новых границ для всех дефектов и сохранение информации в накопителях.
5. Замыкание основного цикла.
6. Обработка и вывод результатов одного прогона модельного варианта образца.

Программная реализация модели выполнена в виде процедуры системы Matlab. В модели используются условные единицы длины и времени, что обобщает результаты моделирования и позволяет делать выводы, которые будут адекватны многим видам материалов. Примем длину материала равной $L = 1000$ ед., которую дискретизируем с шагом $dx = 1$ ед. Средний интервал времени между моментами появления дефектов в стационарных условиях эксплуатации материала примем равным $T_s S_r = 10$ ед. Сами интервалы считаем случайными величинами, которые будем моделировать частным случаем гамма-распределения - распределением Эрланга первого порядка. Моделирование динамики накопления дефектов выполнялось на интервале $0 < T < T_{mod} = 200$ ед., т.е. в стационарных условиях по длине образца должно возникать в среднем 20 дефектов. Для моделирования нарушений стационарности будем считать, что на

интервале $T_{s1} = 90 < T < T_{s2} = 100$ ед. происходит интенсивное воздействие на образец со средним интервалом между моментами появления дефектов $TcSr = 2$ ед. т.е. на этом интервале времени процесс возникновения дефектов интенсифицируется в пять раз.

На рис. 3.16 и рис. 3.17 маркерами отмечены моменты и координаты возникших в образце материала дефектов, а линиями показаны границы областей, на которые распространяется действие этих дефектов. Левый график рисунка соответствует стационарным условиям возникновения дефектов, правый график нестационарным условиям. Их сравнение показывает интенсификацию процессов износа и старения образца после кратковременного интенсивного воздействия на него.

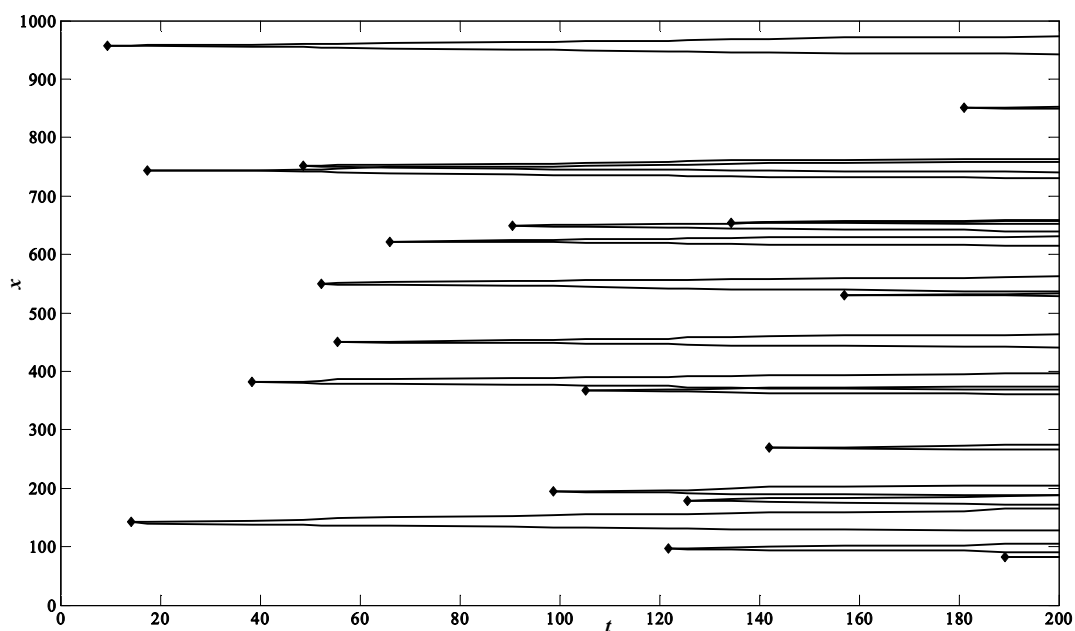


Рисунок 3.16 - Износ и старение материала при стационарных условиях возникновения дефектов

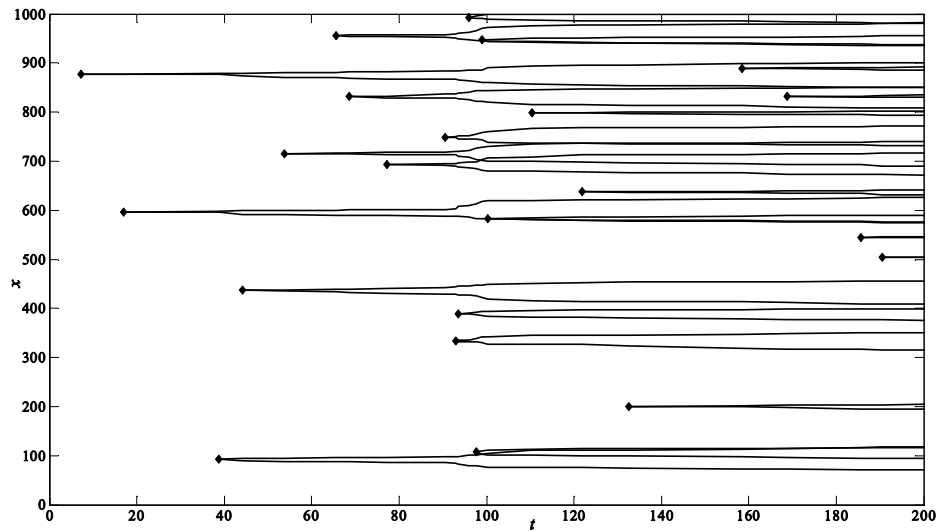


Рисунок 3.17- Износ и старение материала при нестационарных условиях возникновения дефектов

Рис. 3.18 и рис. 3.19 показывают распределение числа дефектов, воздействующих на различные участки по длине образца. Поскольку интервалы времени между моментами возникновения дефектов – случайные величины, то более удобно строить распределения $D(x,t)$ в зависимости от числа n уже возникших в образце дефектов.

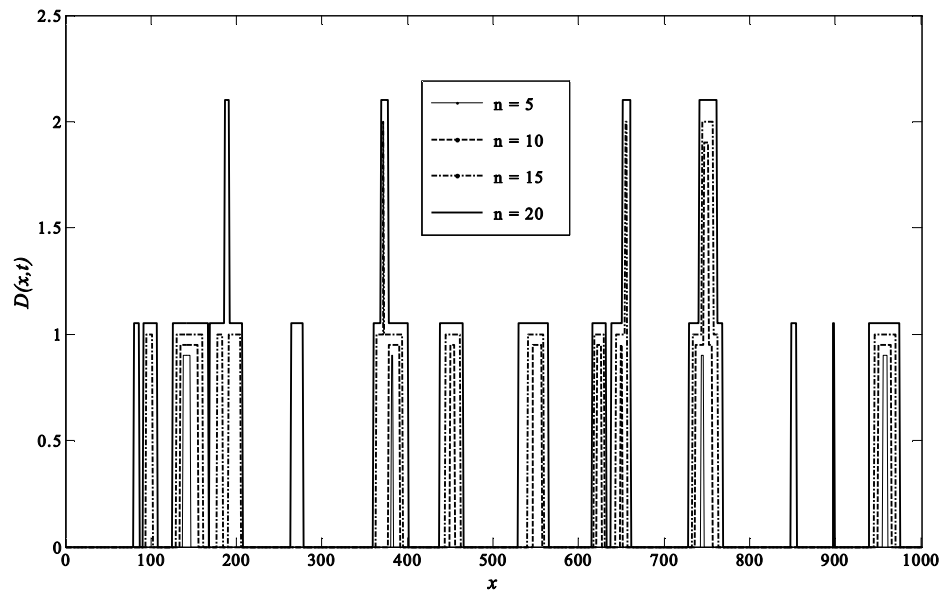


Рисунок 3.18 - Распределение числа дефектов, воздействующих на различные участки по длине образца

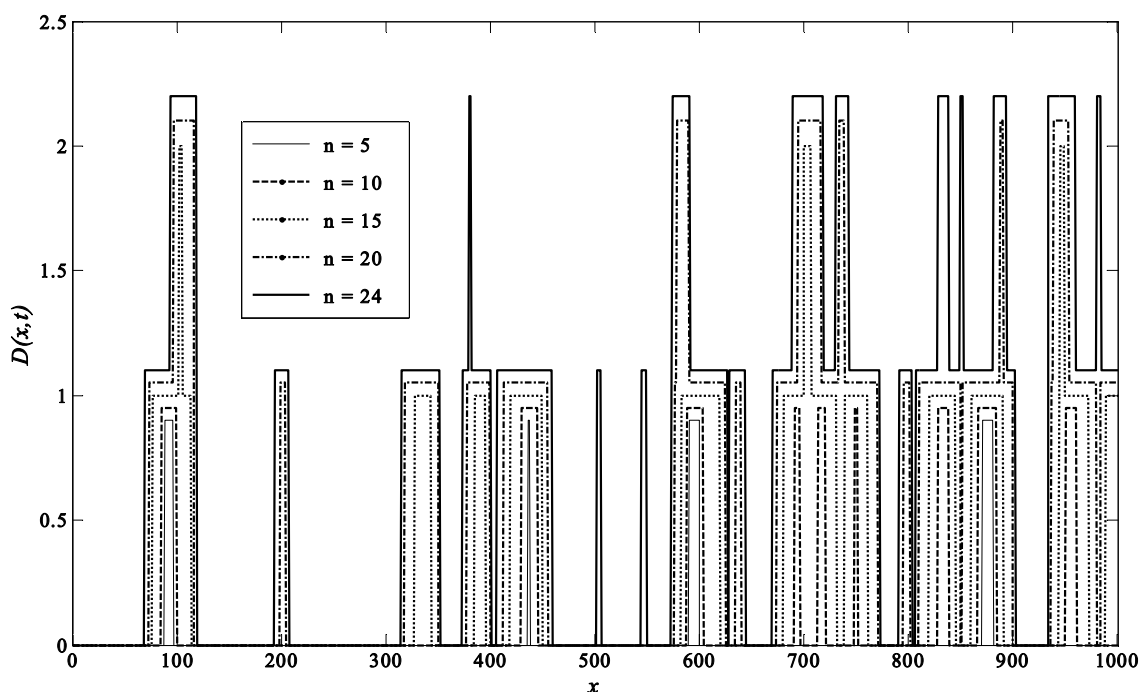


Рисунок 3.19 - Распределение числа дефектов, воздействующих на различные участки по длине образца

Видно, что за моделируемый интервал времени 200 ед. общее число дефектов, возникших в образце, равно 20 при стационарных условиях эксплуатации и 24 при наличии локального по времени интенсивного воздействия на материал. При этом свое влияние одновременно на одну и ту же область образца распространяют не более двух дефектов и в стационарном, и в нестационарном вариантах воздействия. Однако во втором случае общая область длины областей воздействия заметно превосходит эту длину для стационарного случая.

3.4 Модель динамики старения и износа одномерного полимерного материала

Изменение свойств, износ и старение полимерных материалов является одной из главных причин потери ими своих эксплуатационных и эстетических качеств [133, 134]. Как следствие, возникает необходимость утилизации изделий из этих материалов и замены их новыми [135-137].

Причины износа и старения можно условно разделить на две категории. К первой отнесем воздействия от многих источников, разнесенные во времени, пространстве и по интенсивности. Они, как правило, не поддаются контролю, а их воздействие можно считать вероятностным процессом, который вызывает многочисленные, на первых порах незначительные, изменения в структуре полимерных материалов, которые затем развиваются, захватывая все большие части изделия, и в конечном итоге приводят изделие в непригодное для дальнейшей эксплуатации состояние. Примерами источников таких воздействий являются общий радиационный фон, температурно-влажностные воздействия, механические вибрации. Вторая категория – это обычно кратковременное, но интенсивное воздействие тех же факторов в процессе эксплуатации. Эти воздействия не отличаются от первой категории, но имеют гораздо большую интенсивность и локализованы в пространстве и времени. Процесс износа и старения под действием первой категории причин будем считать стационарным вероятностным процессом [138]. Вторая категория причин приводит к нарушениям этой стационарности, то есть к нестационарному режиму воздействий. Очевидно, что моделирование динамики износа и старения полимерного материала представляет теоретический и прикладной интерес [139-141].

Для исследования износа и старения можно использовать разные методы и использовать различные подходы [14, 30, 142]. Ниже описывается компьютерная статистическая модель имитации этого процесса, и приводятся некоторые результаты, полученные с ее помощью. Рассмотрение ограничено изделиями из полимерных материалов, которые можно отнести к одномерным: монопнити, элементарные нити, филаменты, длинные цепочки молекул полимера и т.п. Все эти «изделия» можно описать лишь одной геометрической переменной x – координатой от одного из концов образца, а поперечными размерами можно пренебречь по сравнению с их протяженностью. Средние интервалы времени между моментами возникновения «дефектов», т.е. зародышей развития изменений в структуре и свойствах полимерного материала, в стационарном

процессе обозначим MT_s , а в нестационарном режиме MT_c . Сами интервалы T_{au} являются случайными величинами. Закон распределения их неизвестен, но, исходя из общих вероятностных схем, для такого класса процессов с высокой степенью точности его можно считать экспоненциальным. Начальные координаты x_C дефектов в стационарных условиях эксплуатации или хранения изделия из однородного полимерного материала распределены равномерно по всей длине L изделия.

Дефекты могут отличаться друг от друга по степени влияния на материал, что можно учесть, задав для каждого вновь образовавшегося дефекта его интенсивность d . Дефекты, первоначально образовавшиеся в разных точках изделия и в разные моменты времени t , могут расширять свою область действия. Границы области у каждого дефекта перемещаются в направлении концов изделия, вообще говоря, с разными скоростями, которые зависят как от интенсивности дефекта, так и от случайных вариаций свойств полимера в локальной области в окрестности x_C . Обозначим V_m эту скорость в сторону одного конца изделия и V_p – в сторону другого конца. Величины d , V_m и V_p будем считать случайными и равномерно распределенными в пределах от нуля до некоторого максимума d_{Max} , V_{mMax} и V_{pMax} , которые отличаются для стационарных и нестационарных условий. Первые отмечены ниже буквой s , вторые буквой c . Сделанных предположений достаточно, чтобы построить алгоритм моделирования динамики развития дефектов в одномерном образце полимерного материала, приводящих к его износу и старению. Алгоритм 4 включает следующие шаги:

1. Задание параметров моделируемого варианта образца: L , MT_s , MT_c , d_{Maxs} , d_{Maxc} , V_{mMaxs} , V_{mMaxc} , V_{pMaxs} и V_{pMaxc} , моделируемого интервала времени T_m , моментов начала T_{c1} и окончания T_{c2} нестационарного процесса износа и старения.
2. Задание стартовых значений $t = 0$, числа дефектов $n = 0$.
3. Начало основного цикла. Пока t меньше T_m , выполнять:

- 3.1. Если $t < T_{c1}$ или $t > T_{c2}$ (стационарная область), то $MT = MT_s$; $dMax = dMax_s$; $VmMax = VmMax_s$ и $VpMax = VpMax_s$, иначе (нестационарная область) $MT = MT_c$; $dMax = dMax_c$; $VmMax = VmMax_c$ и $VpMax = VpMax_c$.
- 3.2. Генерация случайных величин: интервала времени до нового дефекта Tau , его координаты x_C на образце и интенсивности d .
- 3.3. Добавление в счетчик числа дефектов единицы $n = n + 1$. Перемещение модельного времени в момент появления нового дефекта $t = t + Tau$.
- 3.4. Для каждого дефекта генерация значений Vm и Vp . Расчет новых границ для всех дефектов.
4. Замыкание основного цикла, обработка и вывод результатов одного прогона модели.

Как и в любой математической модели, в описанном алгоритме моделирования должны соблюдаться законы теорий размерностей и подобия. Они, в частности, позволяют оперировать в моделях относительными единицами, допуская возможность переноса результатов на другие масштабы с учетом критериев подобия. Эта особенность моделирования дает возможность использовать в рассматриваемой модели условные единицы для длины образца и переменных с размерностью времени, а также интенсивности дефектов, делая результаты моделирования более общими, не связанными с конкретным материалом. В приведенных ниже результатах моделирования были приняты следующие значения величин в условных единицах: $L = 1000$, $Tm = 500$, $MT_s = 10$, $MT_c = 2$, $dMax_s = 1$, $dMax_c = 5$, $dXmMax_s = 1$, $dXmMax_c = 5$, $dXpMax_s = 1$ и $dXpMax_c = 5$, $T_{c1} = 300$ и окончания $T_{c2} = 310$. Легко видеть, что все параметры модели, относящиеся к нестационарному режиму воздействия на материал, увеличены в пять раз, а интервал нарушения стационарного процесса - один за моделируемое время. В качестве контролируемого показателя процесса выбрано распределение $f(x, n)$, показывающее суммарную интенсивность дефектов, распространившихся в область материала в окрестности координаты x к моменту, когда общее число дефектов в образце достигло значения n .

На рис. 3.20 представлено распространение областей влияния дефектов от точек зарождения, отмеченных маркерами, до конца времени моделирования. Видно резкое нарастание числа дефектов и размеров их областей влияния после локального интенсивного воздействия на материал в окрестности интервала времени (300 ед. – 310 ед.).

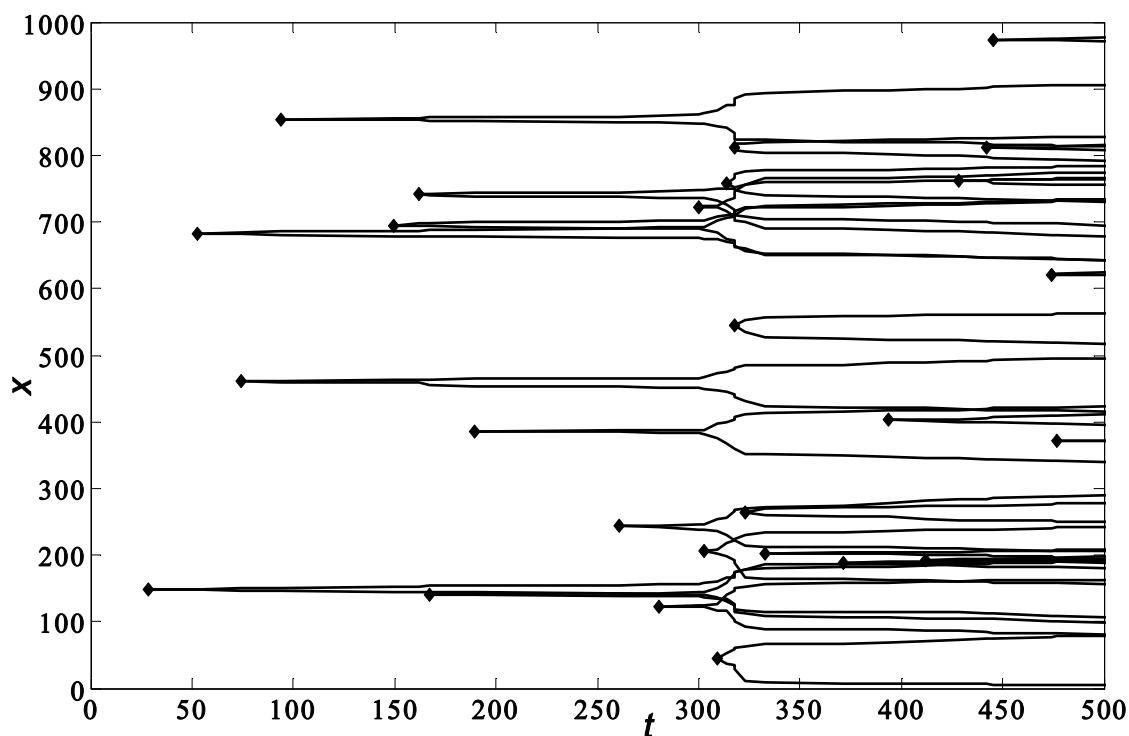


Рисунок 3.20 - Динамика разрастания дефектов в образце

В модели предполагается аддитивное воздействие дефектов разной интенсивности на участок образца. Получаемые суммарные распределения воздействий на участки длины образца при разном числе дефектов в образце показаны на рис. 3.21. С ростом числа дефектов области не только расширяются и объединяются, но и по-разному подвергаются воздействию дефектов. Следует отметить, что приведенные на рис. 3.20 и 3.21 графики получены по результатам одного прогона модели. Повторные прогоны, отличающиеся только стартовыми числами в генераторах случайных величин, дают зачастую сильно отличающиеся реализации, причем интегральные числовые характеристики не имеют тенденции

сходиться к предельным значениям. Отсюда следует, что результаты моделирования и выводы по ним носят вероятностный характер.

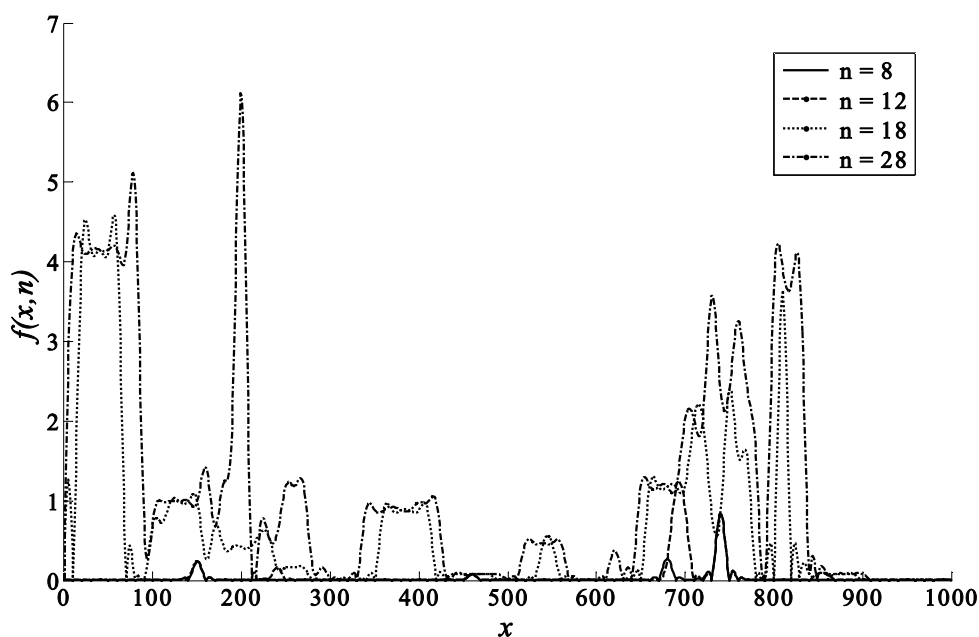


Рисунок 3.21 - Динамика интенсивности влияния дефектов по длине образца

При оценке состояния материала и степени его износа обычно рассматривается пересечение некоторого критического уровня числом дефектов, обнаруженных на единице длины изделия и средней протяженности областей поражения дефектом. Очевидно, что подобные критерии легко реализуются в качестве меры состояния моделируемого образца в рамках компьютерной модели старения и износа материала.

3.5 Исследование робастности старения полимерных нитей и волокон методами компьютерной имитации

Исследования природы износа, старения, деструкции и разрушения полимерных нитей и волокон показали, что механизм этих явлений принципиально отличен от аналогичных процессов в кристаллических и аморфных телах [143]. В основе этого механизма лежит разрушение

межмолекулярных связей под действием внешних факторов, таких, например, как радиация, что проявляется в возникновении дефектов, количество которых постепенно увеличивается, а область действия нарастает [71, 144]. Накопление и распространение влияния дефектов на все большую часть нити ведет к изменению ее свойств и потере функциональности. Представляется перспективным использовать компьютерное моделирование как инструмент для теоретического анализа этих процессов [145].

Модель старения полимерной нити или волокна построена на следующих представлениях о механизме этого процесса. Возникающий в нити дефект захватывает некоторую область вокруг центра возникновения. Интенсивности дефектов и размеры области их влияния на свойства нити различны, причем интенсивность влияния тем меньше, чем дальше участок нити от центра дефекта. Обозначим $n(t)$ число дефектов, возникших в нити к моменту времени t ; $D(i)$ – интенсивность, $c(i)$ – координата и $tc(i)$ – момент возникновения i -го дефекта; $f(x, i, t)$ – распределение интенсивности i -го дефекта по длине L нити, $0 \leq x \leq L$. Вид этой функции зависит от механизма распространения дефекта по нити. Далее предполагаем, что эти функции одинаковы для всех дефектов, и отличаются только параметрами для разных дефектов. Суммарная интенсивность дефектов на момент t в точке x нити равна

$$d(x, t) = \sum_{i=1}^{n(t)} D(i) f(\Delta x, \Delta t); \quad \Delta x = x - c(i), \quad \Delta t = t - tc(i) \quad (3.10)$$

Например, если распределение дефекта $f(x, i, t)$ моделировать распределением Лапласа [17] с зависящей от времени возникновения дефекта характерной длиной области влияния дефекта $a(i, \Delta t)$, то формула (2.10) преобразуется к виду

$$d(x, t) = 0,5 \sum_{i=1}^{n(t)} \frac{D(i)}{a(i, \Delta t)} \exp\left(-\frac{|\Delta x|}{a(i, \Delta t)}\right) \quad (3.11)$$

При диффузионном механизме распространения дефекта вдоль нити функция $f(x, i, t)$ является нормальным распределением с модой в центре дефекта

и дисперсией $S^2(i, t) = \sigma^2(i) \Delta t$, нарастающей с ростом времени [17]. В этом случае функция $d(x, t)$ будет равна

$$d(x, t) = \sum_{i=1}^{n(t)} \frac{D(i)}{\sigma(i)\sqrt{2\pi\Delta t}} \exp\left(-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2(i)\Delta t}\right) \quad (3.12)$$

В тех случаях, когда область влияния дефекта не меняется со временем, параметры $a(i, \Delta t) = a(i)$ и $S(i, \Delta t) = S(i)$ не зависят от времени. Для любых распределений $f(x, i, t)$ область распространения каждого дефекта много меньше длины нити L . Если в процессе эксплуатации или хранения нить находится в стационарных условиях, то можно принять, что моменты $t(i)$ возникновения дефектов образуют пуассоновский поток со средним интервалом времени τSr между моментами появления дефектов. Одним из важных преимуществ моделирования является возможность использования условных единиц для параметров и переменных, что делает выводы из результатов моделирования более общими, пригодными для целых классов подобных моделируемых систем и процессов. Далее считаем, что длина нити $L = 1000$, центры дефектов $xc(i)$ с одинаковой вероятностью могут возникать в любой точке длины нити, интервалы τ распределены по экспоненциальному закону со средним интервалом времени $\tau Sr = 1$. Средняя интенсивность дефекта $Dsr = 1$, а интенсивности $D(i)$ – случайные величины, также распределенные по экспоненциальному закону. Значения $a(i)$ и $S(i)$ у каждого дефекта – случайные величины, распределенные по треугольному закону распределения в пределах от нуля до максимального значения $aMax = 2$ и $sMax = 2$.

В задачах старения полимерных нитей наибольший интерес представляет время, за которое в результате накопления дефектов их суммарная интенсивность $d(x, t)$ достигнет в некоторой точке нити предельного уровня D_{max} , превышение которого означает непригодность нити для дальнейшей эксплуатации. Первое достижение этой границы функцией $d(x, t)$ к некоторому моменту T является случайным событием, а сама задача оценки T относится к категории задач о выбросах вероятностных процессов и достижении ими границ [146]. Аналитическое решение задачи в рассматриваемом случае возможно лишь в

простейших частных случаях. Поэтому дальнейший анализ выполнен численными методами с применением метода Монте-Карло. Ниже приведен алгоритм оценки T (Алгоритм 5).

1. Задание начальных значений $i = 0$; $t = 0$; $d(x, t) = 0$, $0 \leq x \leq L$
2. Моделирование появления нового дефекта: $i = i + 1$. Генерация атрибутов i -го дефекта: $\tau(i)$; $D(i)$; $c(i)$; $a(i)$ или $S(i)$.
3. Переход к моменту времени появления нового дефекта: $t = t + \tau(i)$.
4. Вычисление суммы (3.11) или (3.12) с учетом с учетом i -го дефекта.
5. Поиск $dMax = \max \{ d(x, t) \}$.
6. Если $dMax \leq Dmax$, то возврат к п.2.
7. $T = t$. Вывод или сохранение значений T , $n = i$; $dMax$, $d(x, T)$.

Поскольку значения $\tau(n)$, $D(n)$ и $c(n)$ для каждого дефекта – случайные, то и результирующие значения T , n и $dMax$ являются случайными.

Для робастной оценки статистических характеристик T , n и $dMax$ в соответствии с методом Монте-Карло было выполнено $Npovt$ прогонов алгоритма при следующих значениях параметров модели и условиях моделирования (все единицы измерения условные): $L = 2000$, число точек дискретизации длины нити $M = 10000$, величины интенсивности дефектов $D(i)$ и интервалы $\tau(i)$ распределены по экспоненциальному закону с соответствующими средними $Dsr = 1$ и $TauSr = 1$, координаты центров дефектов распределены равномерно от 0 до L . Предельно допустимый уровень интенсивности дефектов $Dmax = 3$. Число повторных прогонов алгоритма составило $Npovt = 10000$. По выборкам T , n и $dMax$ для моделей, основанных на формулах (3.11) и (3.12), найдены оценки числовых характеристик, приведенные в таблице 3.1. Это минимальное Min и максимальное Max значения выборочных данных, модальное Mod , медианное Med , среднее Sr , среднеквадратическое СКО значения, коэффициенты вариации CV , асимметрии KA и эксцесса KE . Была проверена гипотеза о незначимом различии между моделями (3.11) и (3.12) при прочих равных условиях моделирования. Гипотеза проверялась по критерию однородности Смирнова [147] по выборочным значениям случайных величин T и n и не противоречит этим данным с

вероятностью ошибки при отклонении гипотезы не менее 0, 83. Поэтому далее рассматривалась только модель на основе формулы (3.12). Подбор наиболее близкого к выборкам типового распределения по критерию максимального правдоподобия показал, что наиболее близким является инверсное гауссово распределение (распределение Вальда) [146б 147], что соответствует модели броуновского движения и достижения границы случайного блуждания. Отметим, что распределения величины $dMax$ в отличие от T и n для формул (3.11) и (3.12) значительно отличаются друг от друга. Поэтому при исследовании этой величины необходимо располагать достаточно достоверной информацией о функции $f(x, i, t)$.

Таблица 3.1 - Оценки основных параметров распределений T , n и $dMax$ при моделировании по формулам (3.11) и (3.12)

Параметр	Выборка					
	T(2)	N(2)	dMax(2)	T(3)	N(3)	dMax(3)
Min	3,034e-4	1	3,00	0,0003	1	3,00
Max	61,81	63	438,03	52,55	57	576,23
Mod	3,037e-4	1	3,00	0,0003	1	3,00
Med	4,23	4	4,88	4,28	4	5,05
Sr	6,08	6,06	7,18	6,20	6,18	7,57
СКО	6,09	5,55	10,32	6,19	5,60	11,90
CV, %	100,1	91,5	143,8	99,9	90,7	157,2
КА	1,99	2,02	16,18	1,93	1,94	20,72
КЭ	9,00	9,32	468,4	8,13	8,32	735,0

Для анализа робастности модели было выполнено сравнение результатов моделирования по выборкам T , n и $dMax$, полученным при экспоненциальных и равномерных распределениях величин $\tau(i)$ и $D(i)$. Соответствующие выборки обозначены T_u , n_u и $dMax_u$, когда $\tau(i)$ имеет равномерное распределение с тем же средним значением, и T_e , n_e и $dMax_e$, когда $D(i)$ имеет равномерное распределение, T_{uu} , n_{uu} и $dMax_{uu}$, когда обе величины имеют равномерное распределение (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Оценки основных параметров распределений T , n и $dMax$ при проверке робастности модели

Параметр	Выборки								
	T_u	n_u	$dMax_u$	T_e	n_e	$dMax_e$	T_{uu}	n_{uu}	$dMax_{uu}$
Min	0,0002	1	3,001	0,0019	1	3,000	0,0021	1	3,000
Max	56,65	47	423,47	57,72	58	582,71	57,40	55	605,90
Mod	0,0002	1	3,001	0,0019	1	3,000	0,0021	1	3,000
Med	4,17	4	4,60	4,36	4	5,05	4,28	4	4,56
Sr	5,98	5,97	6,59	6,15	6,14	7,49	6,05	6,06	6,48
СКО	5,94	5,37	9,09	5,80	5,61	10,91	5,76	5,60	9,63
CV, %	99,3	89,93	138,0	94,3	91,3	145,7	95,1	92,3	148,6
КА	1,96	1,85	17,8	1,98	2,01	22,03	2,05	2,07	30,01
КЭ	8,54	7,53	581,8	9,03	9,14	913,5	9,20	9,20	1605,0

Выборки сравнивались попарно по критерию однородности Смирнова. Установлена значимое различие в распределениях выборочных значений T , n и $dMax$ при разных модельных распределениях интервалов между моментами появления дефектов $\tau(i)$ и их интенсивностей $D(i)$.

3.6 Анализ старения синтетических нитей методами компьютерного моделирования

Для получения информации о свойствах синтетических нитей и волокон можно использовать либо результаты натуральных экспериментов с образцами нитей, выполненных с применением испытательного оборудования и средств измерительной техники [148], либо результаты вычислительных экспериментов с компьютерными моделями нитей и волокон. В некоторых задачах проведение натуральных экспериментов невозможно или весьма проблематично из-за связанных с экспериментами трудностей, например, больших затрат времени или отсутствия необходимого испытательного и измерительного оборудования. К таким задачам относятся исследования процессов износа и старения синтетических нитей и волокон. Поэтому метод компьютерного моделирования является не только перспективным и основным, но во многих случаях единственным инструментом детального исследования процесса [149-151].

Любые компьютерные модели, в том числе и для процессов износа и старения синтетических нитей и волокон, используют предположения, которые не всегда имеют надежное и однозначное основание, вытекающее из экспериментальных данных или фундаментальных физических законов. Поэтому важнейшим условием полезности моделей является устойчивость результатов моделирования к вариациям используемых значений параметров, других численных величин, законов распределения и зависимостей. Целью данной работы и являлось исследование разработанной компьютерной модели динамики развития процессов старения в синтетических нитях на ее робастность к исходным данным и значениям параметров [13].

Алгоритм моделирования основан на следующих представлениях о механизме старения нити. Предполагается, что нить находится в нормальных стационарных условиях эксплуатации или хранения. Под действием, главным образом, внешних факторов, например, излучения разных частот и энергий, в нити возникают центры с измененными свойствами нити – дефектами. Эти дефекты влияют на свойства нити в окрестности своего центра, причем интенсивность этого влияния снижается по мере удаления вдоль нити от центра зарождения дефекта. В соответствии с этим представлениями интенсивность влияния k -го дефекта на свойства нити, описывается функцией $d(x, t, k) = f(x, t, xc(k), tc(k))$, которая зависит от координаты центра дефекта $xc(k)$, момента появления дефекта $tc(k)$, координаты x точки на нити и текущего момента времени t . В модели старения при стационарных условиях эксплуатации и однородных свойствах по длине нити эту функцию можно считать одинаковой для всех дефектов и отвечающей условию нормировки, т.е. интеграл от нее по x равен единице независимо от t . Различие между дефектами состоит только в масштабных множителях. Поэтому суммарная интенсивность влияния дефектов на свойства нити, например, на прочность, может быть представлена выражением

$$d(x, t) = \sum_{k=1}^{n(t)} D(k) f\left(\frac{x - xc(k)}{S(k, t - tc(k))}, t - tc(k)\right), \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.13)$$

Здесь $n(t)$ – число дефектов к моменту t , $D(k)$ – начальная интенсивность k -го дефекта на момент $tc(k)$, параметр S определяет размер области влияния k -го дефекта к моменту времени t , L – длина нити. Очевидным условием достижения полимерной нитью предела старения является условие

$$\max_{0 \leq x \leq L} d(x, t < T) < Dmax, \quad \max_{0 \leq x \leq L} d(x, t \geq T) > Dmax, \quad (3.14)$$

означающее, что до момента времени T наибольшая суммарная интенсивность дефектов по длине нити не превышала предела $Dmax$, а после момента T по крайней мере, в одной точке нити она превысила этот предел.

В формуле (3.13) все величины являются случайными: $D(k)$, $xc(k)$, $S(k, t)$, $n(t)$, с неизвестными законами распределения. При аналитическом или компьютерном моделировании для оценки T по формуле (2.14) эти распределения выбирают, исходя из общих правдоподобных представлений о механизме процесса. Так, координаты $xc(k)$ центров дефектов можно считать равномерно распределенными по длине нити или волокна, поскольку ни одному из участков нельзя, как правило, отдать предпочтение перед другими: $xc(k) \sim Un(0; L)$. Как следствие, функцию (2.13) можно считать не зависящей от координаты x , за исключением самых концевых участков нити. Для стационарных условий эксплуатации и хранения моменты появления дефектов $tc(k)$ образуют однородный пуассоновский поток. Это означает, что интервалы $\Delta t(k) = tc(k+1) - tc(k)$ являются независимыми, одинаково распределенными случайными величинами с экспоненциальным законом распределения и постоянным средним значением $dTsr$: $\Delta t(k) \sim Exp(dTsr)$. При этом число дефектов $n(T)$, появляющихся за фиксированный интервал времени T , является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона со средним значением $nSr = T / dTsr$.

За время эксплуатации или хранения число дефектов, возникающих в нити, исчисляется, по меньшей мере, десятками. При этом длина области влияния каждого из них, характеризуемая параметром $S(k)$, хотя и является случайной, но всегда много меньше длины нити L . Поэтому для значений T определяющим является распределение интенсивностей дефектов, которое $D(k)$ является

унимодальным и может моделироваться разными типовыми распределениями из семейств гамма -, логнормального и других подобных видов распределений. В условиях высокой неопределенности исследование робастности результатов моделирования к вариациям распределения $D(k)$ является важной задачей. При малой интенсивности дефектов для достижения предельного значения D_{max} должна быть накоплена сумма большого числа дефектов. В этом случае $d(x, t)$ и T являются суммами большого числа независимых случайных величин, и поэтому, в силу центральной предельной теоремы, должны иметь распределение, близкое к нормальному.

Для проверки этих выводов и их робастности по отношению к различным исходным условиям: законам распределения и их параметрам, - была разработана компьютерная модель, алгоритм которой имитирует накопление дефектов в нити в соответствии с описанным механизмом старения. Проверка выполнялась методом Монте-Карло, причем для получения надежных выборочных оценок числовых параметров и распределении оказались достаточными выборки объемом 10^4 значений. В качестве результатов моделирования накапливались выборки значений времени T , числа дефектов $n(T)$ и значений накопленной интенсивности d_{Max} , превысившей допустимый порог D_{max} . Эти выборки для разных вариантов модели и условий моделирования сравнивались между собой по критерию Смирнова [147], который и позволял обнаружить значимость различия между вариантами. Приведем результаты проведенных вычислительных экспериментов с моделью.

Во всех экспериментах для выборочных значений T выполнен подбор наиболее близкого «типового» распределения. В качестве типовых использовались распределения, предлагаемые инструментарием `dfittool` системы Matlab (более десяти распределений). Во всех случаях распределением, наиболее хорошо согласующимся с выборочными данными, являлись гамма-распределение и распределение Вейбулла [152], что было подтверждено проверкой по критерию Колмогорова [147].

В первом эксперименте сравнивались результаты моделирования для распределений интенсивности $f(x, t, xc(k), tc(k))$, соответствующих двустороннему распределению Лапласа и нормальному распределению. Установлено, что вид распределения интенсивности дефекта по длине нити не имеет значения и не влияет на продолжительность старения нити, что согласуется с теоретическими предположениями.

Во втором эксперименте сравнивались результаты моделирования для вариантов, когда интенсивности дефектов $D(k)$ были распределены по экспоненциальному закону и по равномерному закону с одинаковым средним значением. Установлено, что распределения каждой из выборок T , $n(T)$ и $dMax$ не согласуются между собой практически с нулевой вероятностью ошибки. Результат объясняется присутствием в выборках заметной доли сильно выделяющихся значений для варианта экспоненциального распределения $D(k)$. В качестве примера этих различий на рис. 3.22 представлены гистограммы для этих двух вариантов распределения интенсивностей дефектов. По оси абсцисс отложены значения T , по оси ординат - число элементов выборки $p(T)$, соответствующих значению T .

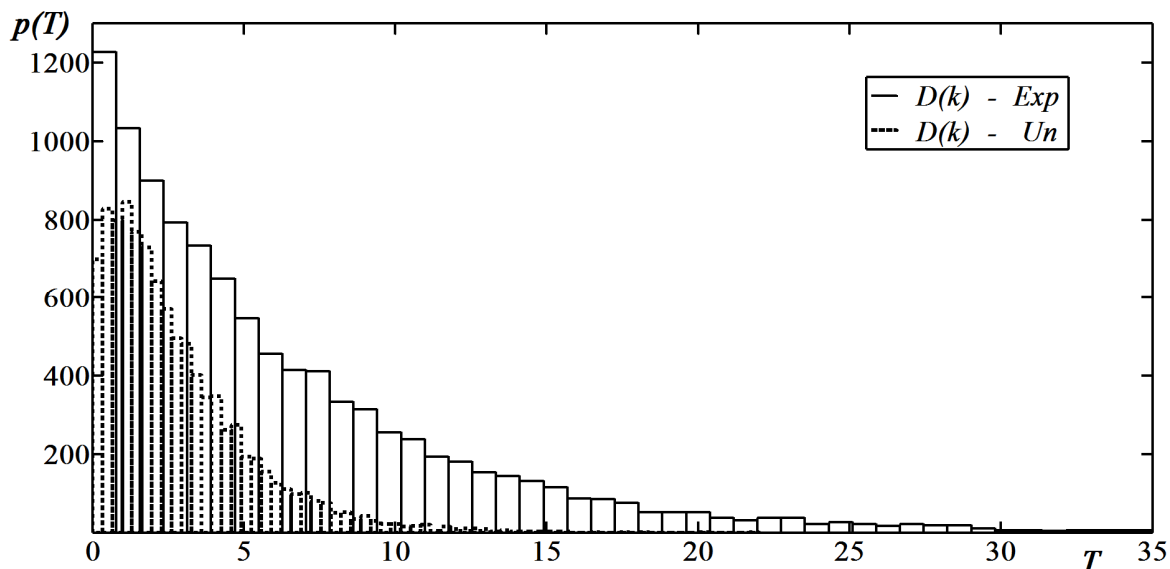


Рисунок 3.22 - Гистограммы времени достижения предельной интенсивности дефектов при экспоненциальном распределении (Exp) и равномерном распределении (Un)

Аналогичные результаты получены в других экспериментах, в которых комбинировались равномерное и экспоненциальное распределения для интенсивностей дефектов и для интервалов $\Delta t (k)$ между моментами их появления. Выбор экспоненциального и равномерного распределений обусловлен значительными отличиями в их свойствах. Такой выбор позволил более эффективно проверить робастность модели к подобным вариациям исходных условий моделирования.

В результате обработки выборок во всех экспериментах было установлено, что вид закона распределения для $dMax$, T и $n(T)$ остается одинаковым в широком диапазоне варьирования параметров и характеристик дефектов, а числовые характеристики этих распределений зависят от варьируемых величин.

3.7 Фрактальная модель статистической динамики старения одномерных полимерных материалов

При нормальных условиях эксплуатации эффекты старения полимерных материалов связаны с изменениями в молекулярной и надмолекулярной структуре полимера, например, изменениями или разрушением связей между элементами полимерных цепей. Факторы, вызывающие эти изменения, весьма многочисленны и, в большинстве, случайны. Это могут быть контактные механические воздействия на изделие из полимерного материала или бесконтактные радиационные воздействия в широком диапазоне частот электромагнитного излучения: от СВЧ и инфракрасного диапазона до солнечного ультрафиолета и жесткого рентгеновского излучения [137, 153].

Характерными для всех этих видов воздействия являются три особенности:

- 1) изменения происходят в случайные, заранее не предсказуемые моменты времени;
- 2) нарушения и разрушения (назовем их дефектами) возникают в отдельных, изолированных друг от друга точках полимера, расположенных случайным образом по объему материала;

3) интенсивность этих дефектов, т.е. величина изменений и разрушений, различна в разных точках и также случайна по величине;

4) дефекты имеют свойство влиять на соседние с ними участки полимера, распространяясь на них с некоторой скоростью и ослабевающей интенсивностью;

5) при пересечении областей от нескольких дефектов изменения в структуре и разрушения в полимере не просто складываются, но могут и усиливаться.

Данные предположения основаны на общепризнанных результатах физической механики и химии полимерных материалов [154, 155]. На основе этих предположений о механизме развития процесса старения полимера авторами были построены компьютерные модели старения полимерного материала [129, 143, 150, 156-158].

При моделировании динамики старения удобно рассматривать одномерные полимерные материалы, такие как текстильные волокна, элементарные или комплексные нити. В этом случае все параметры и характеристики зависят только от двух переменных: времени t и координаты вдоль нити x , что упрощает разработку алгоритмов моделирования.

На рис. 3.23 представлен модельный пример распределения интенсивности дефектов по длине полимерной нити для двух моментов времени. Модель была построена авторами на основе перечисленных выше базовых представлений о механизме возникновения и распространения дефектов.

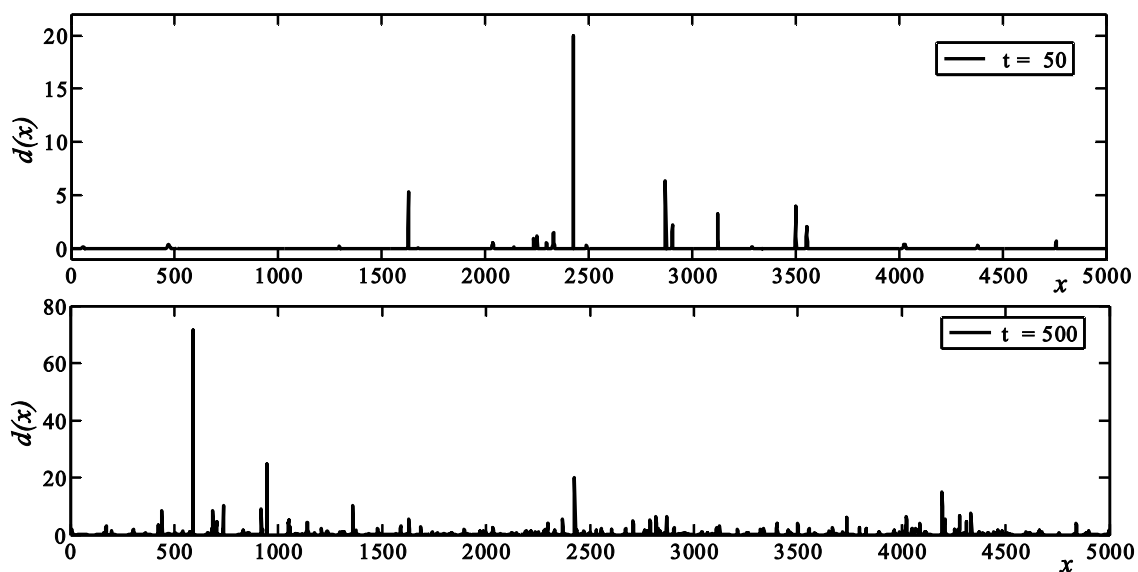


Рисунок 3.23 - Динамика нарастания числа, интенсивности $d(x)$ и размеров области дефектов по длине моделируемого образца нити со временем при $t = 50$ ед. времени и при $t = 500$ ед. времени

Как известно [121, 159, 160], в соответствии с теориями подобия и размерностей любые математические модели могут быть преобразованы к безразмерному виду, в котором модель оперирует с безразмерными параметрами и переменными. Для компьютерных моделей, такое представление модели является наиболее естественным, поскольку компьютер, в конечном счете, работает с безразмерными двоичными кодами, даже если эти коды отображают размерные величины. По этой причине результаты, получаемые от компьютерных моделей, всегда инвариантны относительно некоторых масштабных преобразований. Эти соображения приводят к вопросу о возможной фрактальности результатов. В данном случае фрактальность трактуется как самоподобие результатов моделирования относительно преобразования масштаба используемых в модели параметров и переменных, а также получаемых зависимостей. Представляет интерес установить, в каких случаях и для каких характеристик свойство фрактальности выполняется, а для каких случаев – нет.

Результаты компьютерного моделирования динамики всегда имеют вид потоков данных, зависящих от координаты x по длине нити и упорядоченных во

времени. При этом в зависимости от алгоритма моделирования шаг дискретизации переменной времени dt либо постоянный $dt = \text{const}$, либо является случайной величиной. Координата точек по оси X является случайной величиной. В качестве меры при проверке фрактальности потока данных используют оценку размерности фрактального пространства D или связанного с ней показателя Хёрста H . Оценку последнего находят, например, по формуле

$$H = [\text{Ln} (R / S)] / \text{Ln} (n / 2); \quad D = 2 - H \quad (2.15)$$

В этой формуле $\text{Ln} ()$ – функция натурального логарифма, R – оценка размаха, S – оценка среднеквадратического отклонения для выборочных данных объема n . Если различия в размерности фрактального пространства D или показателе Хёрста для сравниваемых вариантов модели и характеристик моделируемой нити оказываются статистически незначимыми при разных объемах выборок, то можно считать, что модель обладает свойством фрактальности по данной характеристике. Для процессов старения это будет означать, что они развиваются подобным образом, как на малых, так и на больших отрезках нитей.

Очевидно, что наличие или отсутствие этого свойства у модели зависит от алгоритма моделирования, учитываемых параметров и особенностей протекания процесса старения, накопления и распространения дефектов. Однако, с помощью модели можно оценить подмножество характеристик, для которых имеет смысл решать задачу о существовании (или отсутствии) фрактальности, а также отработать методику оценки показателей по формуле (2.15). Аналогичная методика может быть использована и при обработке данных натурального эксперимента, что позволит получить дополнительное средство проверки правильности компьютерной модели.

Процессы старения, как правило, отличаются большой длительностью. Это создает большие проблемы с проведением натуральных экспериментов и заставляет проводить так называемые ускоренные испытания, перенося их результаты на реальные сроки эксплуатации изделий из полимерных нитей. При этом возможность такого переноса, как правило, слабо обоснована. Анализ свойств

фрактальности процесса старения может кардинальным образом решить вопрос о связи между результатами ускоренных испытаний и реальных сроков эксплуатации, что имеет большое практическое значение как для прогнозирования сроков эксплуатации изделий, так и сроков их хранения без существенных потерь в эксплуатационных свойствах.

3.8 Методы и алгоритмы обработки экспериментальных данных при компьютерном моделировании процессов старения и износа волокнистых материалов

Старение волокнистых материалов и износ изделий из них в условиях нормальной эксплуатации относятся к одной из главных причин, вызывающих необходимость замены этих изделий новыми. Если для изделий потребительского ассортимента к причинам физического износа добавляются факторы морального износа и моды, то для материалов и изделий технического назначения факторы физического износа являются доминирующими [161].

Главным источником информации о сопротивлении волокнистого материала, например, текстильных полотен, процессам старения и износа до настоящего времени являются натурные эксперименты, в которых на специальных испытательных стендах и приборах воспроизводятся в ускоренном режиме воздействия на образцы испытуемого материала. Требования к материалам и изделиям включены в соответствующие нормативы и стандарты и согласованы с условиями натуральных испытаний. Как правило, длительность таких ускоренных натуральных испытаний составляет многие часы. Притом остается нерешенной проблема корреляции результатов этих ускоренных испытаний с реальными сроками эксплуатации. Таким образом, проблема анализа процессов старения и прогнозирования сроков эксплуатации изделий из волокнистых материалов является актуальной и к настоящему времени во многих аспектах остается нерешенной.

Одним из перспективных инструментов, с помощью которого можно получить дополнительную информацию о процессах износа и старения

волокнистых материалов, является компьютерная имитация этих процессов. Компьютерное моделирование находит применение при решении многих задач текстильной технологии [162]. Некоторые результаты этого направления исследований получили отражение в работах [16, 20, 30, 163]. Эти модели позволили рассмотреть динамику истирания текстильных полотен с учетом структурных особенностей полотна (рельефа, плотности и сопротивления истиранию материала), вероятностного рассеяния параметров материала и случайных составляющих самого процесса. Найденные закономерности на качественном уровне воспроизводят результаты натуральных испытаний на реальном приборе. Однако для количественного согласия между результатами натуральных и компьютерных экспериментов необходимо подобрать значения некоторых параметров, входящих в имитационную модель процесса. Эти значения не могут быть найдены с достаточной точностью на основании общетеоретических расчетов и оценок, тем более, что они зависят от конкретных особенностей испытываемого материала и могут варьировать в широких пределах.

В этих условиях целесообразно воспользоваться так называемым комбинированным подходом [164], когда основной объем информации об изучаемом явлении, в данном случае, о процессе истирания текстильного материала, получают от модели, а уточняющие сведения берут из результатов натуральных экспериментов.

Очевидно, что при таком подходе наилучшими оценками неизвестных параметров, входящих в модель, будут значения, которые минимизируют расхождение между результатами натуральных экспериментов и компьютерных исследований на модели. При этом остается свобода выбора критерия для оптимизации оценки и сравниваемых результатов.

Для рассматриваемого вида испытаний основным показателем является число циклов истирания, которое выдерживает образец до полного разрушения части образца. Факт разрушения образца фиксируется специальным электронным индикатором. Одновременно в ходе испытаний регистрируется потеря массы образца, приходящаяся на заданное число циклов истирания. Как в натуральных, так

и в компьютерных экспериментах отмечено нарастание дисперсии величины этой массы по мере увеличения числа циклов. Поэтому достоверность и надежность данных, полученных в конце испытаний, значительно ниже, чем данных в начале эксперимента. Это обстоятельство распространяется на результаты как натуральных, так и компьютерных экспериментов.

Для уравнивания результатов на протяжении всех циклов испытаний следует, очевидно, использовать их в формулах для оценивания параметров с соответствующим образом подобранными весовыми множителями. Наиболее практичным и проверенным способом оценивания в этом случае является метод взвешенных наименьших квадратов.

Формализуем процедуру комбинированного оценивания на основе этого метода. Обозначим T_k – число циклов, которое выдержал k -й образец волокнистого материала до окончания испытаний, $m_k(t)$ – остаточную массу образца после t циклов в натурном эксперименте. Число испытываемых образцов обычно не превышает одного десятка. Аналогично, N_i и $r_i(t)$ – число циклов и остаточная масса i -го образца после t циклов в имитационном компьютерном эксперименте. Очевидно, что число таких образцов в компьютерном эксперименте может быть симитировано практически неограниченное число.

Первым этапом обработки данных является усреднение результатов. Поскольку объемы выборок в каждом испытании различны (значения T_k и N_i случайны), то следует выполнить перемасштабирование этих выборок. В качестве базовых масштабных значений при перемасштабировании выбираем медианные значения величин как более устойчивые и менее чувствительные к выбросам.

Метод взвешенных наименьших квадратов дает удовлетворительные по точности и надежности оценки параметров имитационной модели, поскольку объемы выборочных данных исчисляются сотнями значений и десятками выборок и к данным вполне могут быть применены законы больших чисел и нормальная аппроксимация законов распределения.

3.9 Планирование экспериментов и обработка данных моделирования процессов старения полимерных материалов

Классическая теория планирования эксперимента [165] сформировалась как средство создания математических моделей сложных технических и производственных систем с целью анализа технологических процессов, свойств продуктов производства и управления этими системами и процессами [166]. При этом ввиду большой трудоемкости и дороговизны натуральных экспериментов с реальными системами и процессами критериями оптимальности плана эксперимента являлись:

1) стоимость и длительность, число опытов и повторных измерений в каждом из них, которые следовало минимизировать;

2) адекватность модели, точность ее прогностических возможностей, число учитываемых и одновременно варьируемых факторов, которые следовало максимизировать;

3) удобство и качество обработки результатов, позволяющие максимально использовать информацию, полученную в эксперименте.

Важным достижением теории явилось понимание, что план эксперимента, управление его проведением и обработка результатов необходимо рассматривать как одну общую задачу получения информации о системе, процессе или материале. Теория планирования эксперимента подтвердила также, что для получения многофакторных зависимостей необходимы многофакторные эксперименты, которые нельзя свести к последовательности или объединению однофакторных экспериментов. Основным предметом внимания теории и областью ее применения явились регрессионные многофакторные модели, которые были особенно полезны в приложениях, и для которых теория планирования была детально разработана.

Другой раздел теории планирования связан с получением динамических моделей и характеристик систем и процессов, в основном в линейной аппроксимации этих моделей. Использование результатов статистической динамики технических систем позволило планировать эксперимент с выбором

рабочих частот, шага квантования, длительности наблюдения и других параметров эксперимента. При этом критериями планирования были те же вышеперечисленные критерии.

Вместе с тем, для многих практически важных задач, решаемых экспериментальными методами, методы планирования либо не были разработаны, либо имели специфическую форму. Как правило, это было связано со спецификой решаемых задач. К их числу относятся исследования переходных режимов, процессов исследования отдельных этапов жизненного цикла изделий, сильно коррелированных многомерных процессов и др. Исследования процессов накопления структурных нарушений и дефектов вызванного ими старения материала также не укладывается в разработанные методики планирования. Основной принципиальной трудностью является необратимость и большая продолжительность процесса.

Создание компьютерных моделей динамики развития деформаций, структурных изменений, дефектов, старения и разрушения систем (если речь идет о материале) изменили ситуацию с планированием экспериментов. Критерии оптимальности для компьютерных экспериментов и обработка результатов существенно отличаются от задач планирования натуральных экспериментов. Стоимость компьютерного эксперимента, в основном, связана с трудом программиста, разрабатывающего интерфейс, управляющий ходом компьютерного эксперимента, включая базу данных для накопления его результатов и подключение программных средств обработки этих данных по выбранной методике. При этом число опытов, количество повторных прогонов модели в случае статистического моделирования, порядок варьирования факторов, объем сохраняемой информации ограничены только временными возможностями и производительностью применяемого компьютера.

Возможности экспериментатора в компьютерном эксперименте практически не ограничены [12, 22, 167, 168]. Поэтому, в противоположность к натурным экспериментам, задачей планирования является выделение наиболее существенной информации из того обилия, которое предоставляет компьютерная

модель. Решение этой задачи правильного выбора варьируемых факторов из общего, как правило, весьма обширного списка, позволяет сократить затраты компьютерного времени на эксперимент [11, 23]. При этом, на базе информации, получаемой от компьютерной модели, строят «частные» математические модели, описывающие отдельные зависимости и связи, присутствующие в системе, нашедшие отражение в компьютерной модели, но не проявляющие себя в явном виде. Это могут быть как регрессионные математические модели, например, полиномиального типа, имеющие корни в степенных аппроксимациях функциональных связей, так и линеаризованные динамические модели, например, передаточные функции по отдельным каналам преобразования материальных или информационных потоков в моделируемой системе или процессе.

Обилие информации, получаемой от компьютерной модели, принципиально меняет подход к ее обработке. Во-первых, вся информация по условиям проведения и результатам эксперимента накапливается в компьютерной базе данных и постоянно доступна для обработки. В этих условиях наиболее предпочтительным является метод графического отображения результатов, который одновременно совмещает в себе возможности представления больших объемов данных и наглядность этого представления. Оценка результатов в этом случае выполняется самим исследователем – «модельером» и носит субъективный характер. Роль статистических критериев снижается, а субъективного фактора повышается [143, 156, 169].

Процесс старения полимерных материалов в нормальных условиях хранения или эксплуатации состоит из многочисленных локальных нарушений надмолекулярной структуры, возникновения и распространения дефектов по объему материала. Эти эффекты, вызванные контактными механическими воздействиями и бесконтактным воздействием разного рода теплового и электромагнитного излучения, носят статистический характер и имеют вид неустойчивого и необратимого переходного процесса. При этом динамика переходного процесса отличается существенной временной корреляцией и широким спектром значений параметров на разных этапах перехода материала из

исходного рабочего состояния в конечном состоянии потери функциональных свойств.

Практика компьютерных экспериментов с такими моделями показала, что на этапе отладки модели, ее верификации, проверки адекватности приходится использовать максимально большое количество информации о моделируемом материале. При отображении свойств материала и особенностей его старения с применением уже проверенной компьютерной модели, наоборот, предпочтительней использовать интегральные показатели. Они позволяют более наглядно и выпукло отобразить особенности процесса старения полимерного материала, хотя и скрывают его детали. Другая сторона планирования компьютерного эксперимента, управления его ходом и обработки результатов – это статистическое усреднение результатов. Методы математической статистики, основанные на нормальном законе распределения и предоставляющие множество критериев для проверки различных гипотез и получения интервальных оценок, при исследовании процесса старения оказываются не пригодными, поскольку большинство статистических характеристик распределено по законам, существенно отличающимся от нормального, а результаты моделирования образуют множество коррелированных данных. Используются гораздо менее разработанные статистические робастные и асимптотические методы. Еще одна специфическая черта исследования процессов старения на компьютерных моделях – это применение методов масштабирования и подобия, поскольку модель предполагает разномасштабные по длительности процессы, совмещаемые в одной модели.

Выводы по третьей главе

1. Предложена простая компьютерная модель динамики развития дефектов в одномерном однородном материале в нормальных условиях эксплуатации. Установлен закон распределения времени накопления предельно допустимого числа дефектов. Показано, что статистический разброс данных по отдельным выборкам велик, что не допускает использования при прогнозировании только усредненных данных.

2. Имитационная модель износа и старения позволяет не только оценить на качественном уровне влияние различных особенностей износа и старения материалов результате действия дефектов, но и найти количественные оценки влияния различных факторов на эти процессы.

3. Предложены алгоритм и модель статистической динамики развития процессов износа и старения в одномерных полимерных материалах в стационарных и не стационарных условиях эксплуатации и хранения. Модель позволяет в обобщенном виде исследовать влияние интенсивности воздействия случайных внешних факторов на образец материала, приводящего к потере им своих эксплуатационных качеств и, в конечном счете, выходу из строя.

4. Разработана компьютерная модель статистической динамики старения полимерных нитей и волокон на основе появления и распространения по длине нити дефектов с различной интенсивностью влияния на свойства нитей. Установлено, что продолжительность срока службы нитей распределена по инверсно-гауссову закону (распределение Вальда).

5. Анализ робастности статистической динамики старения полимерных нитей и волокон показал необходимость получения информации о законах распределения интервалов между моментами появления дефектов и интенсивностей дефектов. Вид этих распределений значительно сказывается на оценках показателей старения и износа полимерных нитей и волокон.

6. Исследована робастность компьютерной модели старения синтетических нитей к вариациям важнейших параметров и условий старения. Установлено, что распределение дефектов по длине нити не влияет на динамику старения и износа, а распределения интенсивности дефектов и интенсивности возникновения дефектов требуют адекватной оценки для получения более точных результатов моделирования старения. Показано, что распределения всех важных характеристик существенно асимметричны, хорошо аппроксимируются гамма распределением или распределением Вейбулла с параметрами, чувствительными к параметрам модели и условиям моделирования.

7. Рассмотрены особенности анализа данных натуральных и компьютерных экспериментов при исследовании процессов износа и старения изделий из волокнистых материалов в условиях нормальной эксплуатации. Предложено использовать комбинированные методы обработки информации и методы получения оценок параметров имитационных компьютерных моделей для достижения адекватных результатов моделирования.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРЫВА ТКАНЫХ ПОЛОТЕН И НИТЕЙ

4.1 Динамика удлинения и разрыва комплексных нитей и ее связь со свойствами элементарных нитей при моделировании полуцикловых деформаций

Механические свойства синтетической комплексной нити зависят от механических свойств элементарных нитей и ее структуры, т.е. конфигурации элементарной нити в пределах комплексной нити. Поскольку сопротивление изгибу у элементарных нитей пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением удлинению, можно считать, что элементарные нити полностью распрямлены и расположены параллельно оси комплексной нити. В таком приближении структура комплексной нити проявляется в конфигурации участков контакта и величине сил взаимодействия между соседними элементарными нитями на этих участках [98, 170, 171].

Назовем SS -кривой зависимость между нагрузкой (stress) и удлинением (strain). При полуцикловом испытании динамика удлинения комплексной нити определяется SS -кривой для элементарных нитей. Существенное значение имеет статистический разброс значений разрывного удлинения S_b (breaking strain) и удельной разрывной нагрузки P_b (breaking stress) элементарных нитей. Этот разброс приводит к неодновременному разрыву элементарных нитей. Полуцикловое растяжение вплоть до полного разрыва всех элементарных нитей превращается в необратимый динамический процесс деформации и разрушения комплексной нити [3, 20].

Для исследования роли различных факторов, влияющих на этот процесс, была построена компьютерная модель имитации полуциклового удлинения образца комплексной нити [13]. Ниже приведены результаты исследований влияния основных факторов, проявляющихся в SS -зависимости комплексной нити. Перечислим основные параметры модели: N – число элементарных нитей в комплексной нити; $Prsr$ и $CvPr$ – среднее значение и коэффициент вариации разрывной нагрузки Pr элементарных нитей; $SmaxSr$ и $CvSmax$ – среднее значение

и коэффициент вариации разрывного удлинения Sm элементарных нитей; $nb(t)$ – число разорвавшихся элементарных нитей на момент t от начала удлинения; $Ps(t)$ – суммарная сила сопротивления комплексной нити удлинению; $y(t)$ – коэффициент использования прочности элементарной нити в прочности комплексной нити, $y(t) = Ps(t) / (Prsr \cdot N)$. Моделирующий алгоритм 6 в обобщенном виде включает следующие шаги:

1. Задание значений постоянным параметрам моделируемой комплексной нити.
2. Генерация значений случайных значений для Pr и Sm элементарных нитей в соответствии с выбранными распределениями.
3. Масштабное преобразование типичной SS -кривой элементарных нитей в индивидуальные кривые для каждой из этих нитей в соответствии с их значениями Pr и Sm .
4. Задание начальных значений переменным модели и стартовых условий моделирования.
5. Пошаговое приращение смещения подвижного зажима, имитирующего растяжение комплексной нити.

5.1 Проверка достижения разрывного удлинения или разрывной нагрузки каждой из элементарных нитей. При фиксации разрыва элементарной нити исключение ее из списка нитей, продолжающих оказывать сопротивление удлинению.

5.2 Накопление суммы разорвавшихся нитей.

5.3 Пересчет удельной нагрузки, приходящейся на каждую из еще не разорвавшихся элементарных нитей.

6. Сохранение и вывод результатов прогона модели.

Очевидно, что из-за наличия в модели случайных значений результаты разных прогонов при одних и тех же значениях параметров и стартовых условиях будут разными. Для обеспечения статистически устойчивых выводов по результатам моделирования прогоны повторялись многократно, а их результаты усреднялись методами, описанными в [121, 60].

На рис. 4.1а приведены модельные SS -кривые для комплексной нити из волокна Орлон при значениях $CvPr$ и $CvSmax$ 0%, 5%, 10%, 20% и 30%. Кривая для 0% совпадает с SS -кривой элементарных нитей. Видно, как с увеличением статистического разброса в прочностных свойствах элементарных нитей изменяется динамика сопротивления комплексной нити удлинению. При этом уменьшается использование прочности элементарных нитей и значительно возрастает диапазон удлинения комплексной нити до полного разрыва всех элементарных нитей.

На рис. 4.1б приведены модельные SS -кривые для разного числа N элементарных нитей в составе комплексной нити: от 10 до 500 при $CvPr = 10\%$ и $CvSmax = 5\%$. Из рисунка видно, что увеличение числа элементарных нитей в модели удлинения комплексной нити незначительно влияет на динамику деформации и разрыва нити. Этот вывод позволяет использовать при моделировании небольшое количество (несколько десятков) элементарных нитей, что существенно сокращает затраты времени на прогон модели на компьютере.

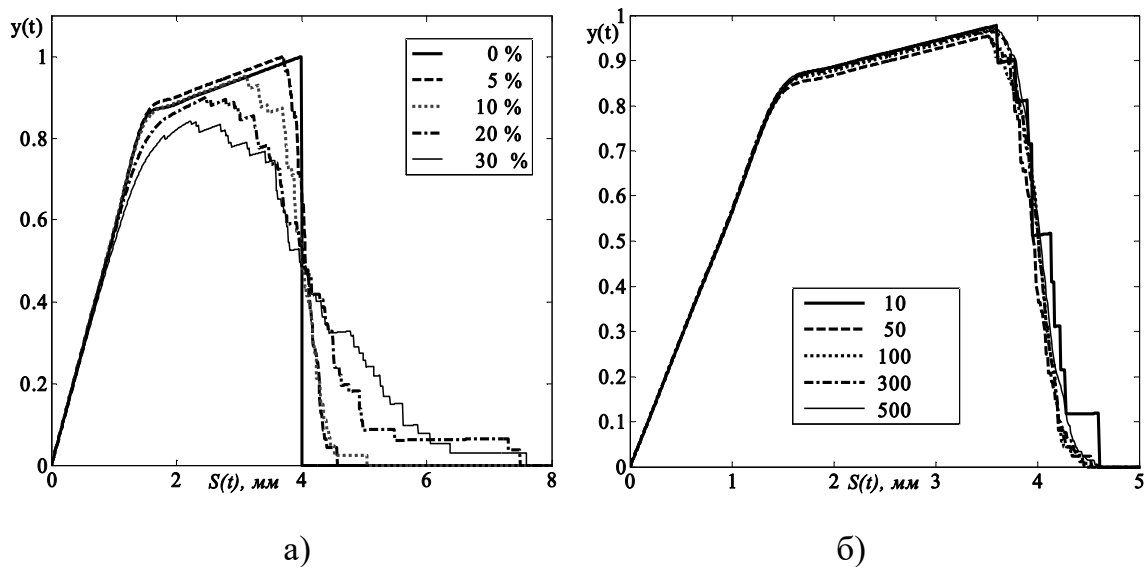


Рисунок 4.1 - Модельные SS -кривые для различных $CvPr$ и $CvSmax$ (а) и N (б)

Модель также позволила исследовать влияние корреляции между значениями разрывного удлинения и разрывной нагрузки у элементарных нитей

на динамику и разброс экстремальных значений SS -кривых. SS -кривые были получены при значениях коэффициента корреляции между Pr и Sm : $-0,7$; $-0,35$; 0 ; $+0,35$; $+0,7$. Повторные прогоны модели показали, что форма SS -кривых практически одинакова для всех значений коэффициента корреляции и такая же, как у кривых, приведенных на рис. 4.1б.

Для каждого значения коэффициента корреляции было выполнено 100 повторных прогонов модели. У полученных SS -кривых вычислялись экстремальные значения $yMax = \max\{y(t)\}$ и соответствующие им значения удлинения $sMax$. На рис. 4.2 приведены диаграммы рассеяния этих значений для трех величин коэффициента корреляции: $r = -0,7$; 0 ; $+0,7$.

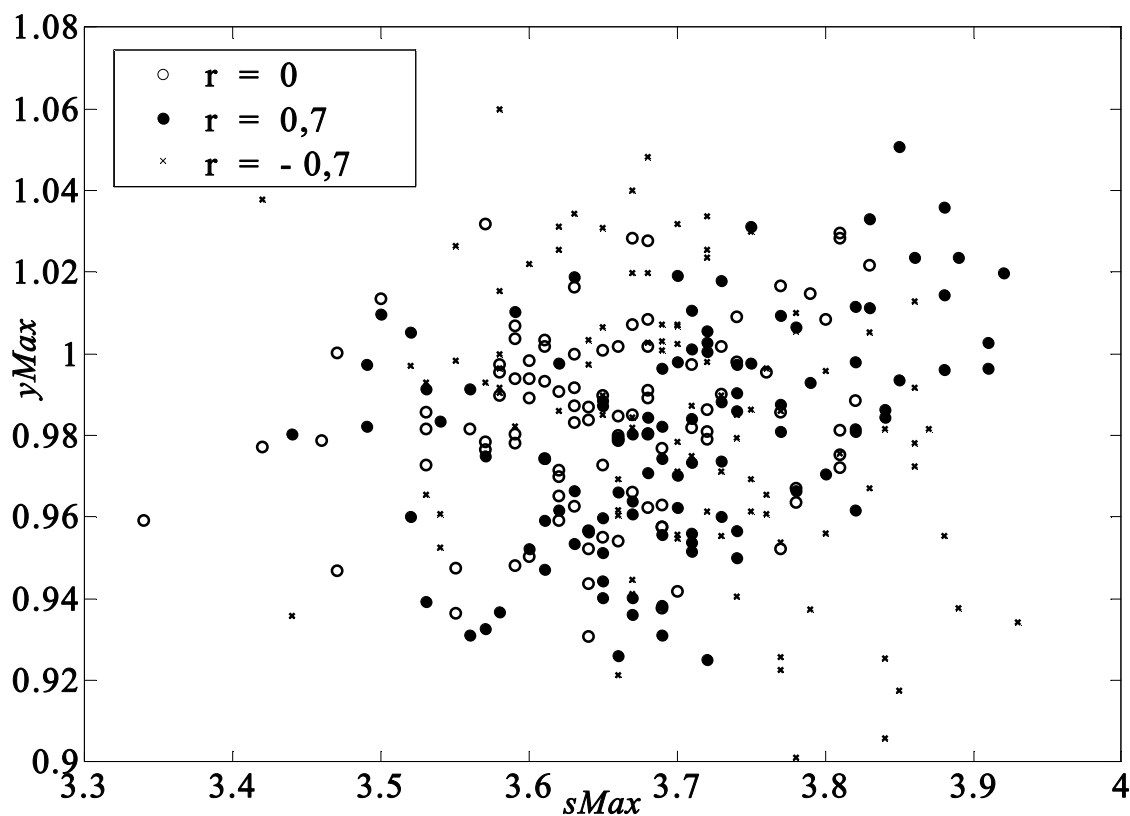


Рисунок 4.2 - Диаграммы рассеяния значений «разрывное удлинение – разрывная нагрузка» комплексных нитей при разной корреляции между этими показателями для элементарных нитей

На рисунке видно, что во всех случаях диаграммы рассеяния имеют примерно одинаковую форму и размер «облака» рассеяния, которые не зависят от корреляции между разрывным удлинением и нагрузкой элементарных нитей. Из диаграмм также можно оценить корреляцию между этими же характеристиками у комплексной нити. Оценка коэффициента корреляции по данным диаграммы рассеяния дает значения в диапазоне $(-0,26; -0,36)$, т.е. корреляция имеет отрицательный знак и по величине соответствует слабо выраженной корреляционной зависимости [120].

4.2 Некоторые аспекты моделирования задач структурной механики тканых полотен

Моделирование деформации тканых полотен при механических нагрузках является одним из распространенных методов исследования свойств этих полотен [13, 169, 172]. Рассмотрим деформацию прямоугольного образца текстильной ткани под действием линейно нарастающего удлинения вдоль одной из систем нитей, например, основы. Вдоль каждой системы нитей полотно имеет периодическую структуру, обусловленную раппортом ткани или чередованием перекрытий нитей и участков между перекрытиями. Это позволяет считать, что геометрические и механические характеристики образца описываются периодическими функциями координат вдоль основы (ось X) и утка (ось Y). Для больших образцов, включающих сотни и тысячи нитей, эта периодическая составляющая является «высокочастотной», поскольку ее периоды лежат в пределах малого числа нитей [173].

Целью данного исследования была оценка роли этой «периодики» в напряженном состоянии образца ткани в пределах упругой составляющей деформации. Сравнивались результаты моделирования деформации при разных уровнях детализации моделей. В первом варианте (одномерная модель ОМ-1) образец рассматривался как одномерная сплошная абсолютно упругая линейная среда при малых деформациях. В двух других вариантах модели с учетом симметрии образец рассматривался как одномерный объект с распределенной по

его длине силовой нагрузкой и неоднородными характеристиками упругости. В пределах линейной упругой теории базовыми соотношениями, описывающими деформацию, являются зависимость между относительной деформацией $\varepsilon_{xx}(x)$ и механическим напряжением $\sigma_{xx}(x)$ (закон Гука): $\sigma_{xx}(x) = E_{xx}(x) \varepsilon_{xx}(x)$, где $E_{xx}(x)$ модуль упругости, зависимость между механическим напряжением $\sigma_{xx}(x)$ и распределенной по длине образца нагрузки $q(x)$

$$\frac{d\sigma_{xx}(x)}{dx} = q(x) \quad (4.1)$$

и зависимость между относительной деформацией и смещением поперечных сечений $u(x)$

$$\frac{du(x)}{dx} = \varepsilon(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.2)$$

Интегрирование уравнений (4.1) и (4.2) приводит к формулам

$$\sigma_{xx}(x) = \int_0^x q(z) dz + C_1 \quad (4.3)$$

$$u(x) = \int_0^x \frac{1}{E_{xx}(l)} \left(\int_0^l q(z) dz + C_1 \right) dl + C_2 \quad (4.4)$$

Константы интегрирования C_1 и C_2 находят из граничных условий $u(0) = 0$ и $u(L) = pL t / T_{мод}$. Здесь L длина образца вдоль оси X , p наибольшее относительное смещение подвижного края образца, t время удлинения, $T_{мод}$ модельное время удлинения.

Распределенная нагрузка (одномерные модели ОМ-2 и ОМ-3) моделирует силы воздействия нитей утка на удлиняемые нити основы, и действует в сторону, противоположную деформации. Для однородного образца (одномерная модель ОМ-2) эта нагрузка и модуль упругости – постоянные величины. Интегралы (4.3) и (4.4) и константы интегрирования легко вычисляются аналитически. В одномерной модели ОМ-3 модуль упругости, коэффициент Пуассона и распределенная нагрузка являются периодически меняющимися параметрами. Например, $E_{xx}(x) = E_0 (1 + A \sin(2\pi f x))$, где E_0 среднее значение модуля, A

амплитуда колебаний модуля относительно среднего значения, f частота этих колебаний. Для этой модели интегралы (4.3) и (4.4) можно найти численными методами с желаемой точностью.

Одномерные модели не учитывают влияния поперечных и касательных деформаций в двумерном образце, которые возникают при его одноосном растяжении. Поэтому сравнение вариантов модели было обобщено на двумерный образец (модель ДМ), имевший периодически меняющиеся $q(x, y)$, $E(x, y)$ и коэффициент Пуассона $\mu(x, y)$ вдоль и поперек удлинения образца. Моделирование выполнено с применением метода конечных элементов.

На рис. 4.3 в качестве примера результатов моделирования показаны распределения абсолютной деформации вдоль диагонального сечения образца от крайней точки линии закрепления образца до середины линии движущегося зажима, удлиняющего образец, для разных вариантов моделей.

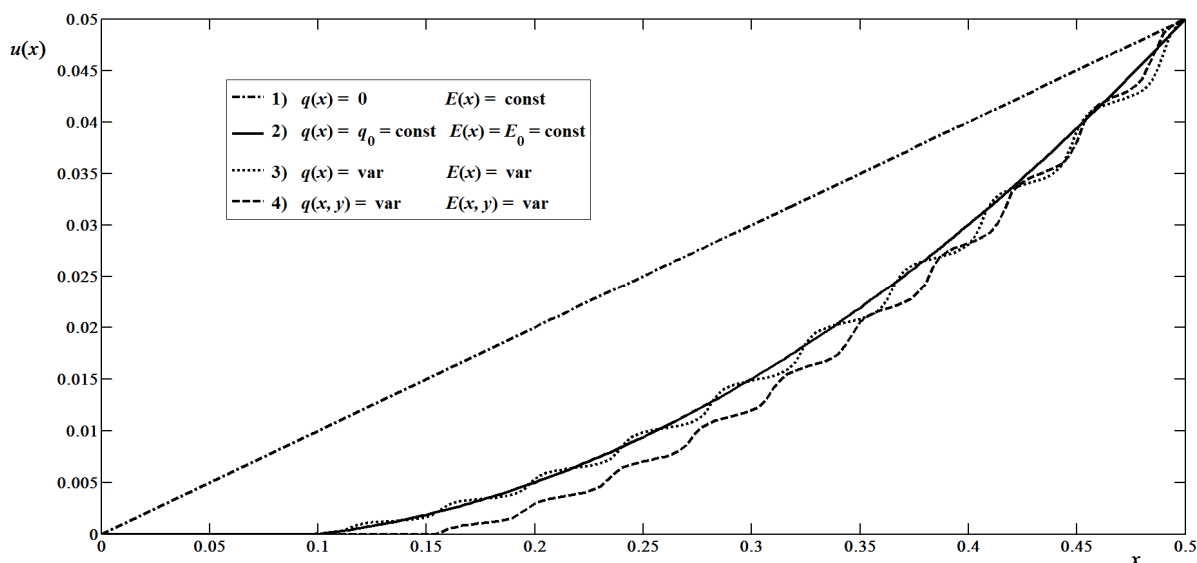


Рисунок 4.3 - На рисунке обозначены: 1) модель ОМ-1; 2) модель ОМ-2; 3) модель ОМ-3; 4) модель ДМ.

Рисунок подтверждает вывод о том, что локальная структурная деформация в образце существенно варьирует в зависимости от значений локальных параметров материала, а глобальная тенденция в изменении напряжений и

деформаций в образце подобна однородному образцу. Поэтому при исследовании деформации участков тканых полотен, включающих в себя большое число нитей основы и утка образец можно рассматривать как однородный материал.

Все варианты моделей сравнивались при одинаковых исходных значениях параметров и начальных условиях моделирования: длина образца $L = 0,5$ м, ширина образца $H = 0,2$ м; средние значения модуля упругости, распределенной нагрузки и коэффициента Пуассона соответственно равны $E_0 = 2e9$ Па; $q_0 = 1e9$ Н м⁻³; $\mu_0 = 0,27$, $A = 0,8$ и $f = 12/L$. Относительное удлинение образца по оси X равно $p = 0,1$. В моделях ОМ-3 и ДМ приняты следующие законы варьирования параметров

$$\begin{aligned} q(x) &= q_0(1 + A \sin(2\pi f x)); \quad E(x) = E_0(1 + A \sin(2\pi f x)) \\ q(x, y) &= q_0(1 + A \sin(2\pi f x)); \quad \mu(x, y) = \mu_0(1 + A \cos(2\pi f y)) \\ E(x, y) &= E_0(1 + A \sin(2\pi f x) \cos(2\pi f y)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Сравнение результатов моделирования однородного материала и материала с периодически изменяющимися параметрами в широком диапазоне значений A, f, p и отношений q/E_0 показало, что хотя локальные распределения напряжений и деформаций в двух моделях отличаются, общие тенденции и закономерности оказываются одинаковыми.

Заметим, что при исследовании задач истирания и разрыва образца ткани такое упрощение неприемлемо, поскольку оба эффекта: истирание и разрыв, - развиваются и локализуются в малой области полотна. Моделирование этих процессов должно осуществляться обязательно с привлечением статистических методов и учета неоднородности структуры и строения полотна в локальных областях ткани.

4.3 Робастность моделей разрыва тканых полотен

Моделирование разрыва образцов тканых полотен под действием механических воздействий основано на гипотезе, что этот разрыв представляет собой динамический процесс распространения деформаций и механических

напряжений сначала по всему образцу, а затем локализующийся вдоль одной из систем нитей – основы или утка. Локализация деформаций и концентрация напряжений в образце происходят вследствие статистической неоднородности свойств нитей в ослабленных участках. Далее вступает в силу принцип положительной обратной связи: чем более ослабевает изначально слабый участок, тем больше концентрируются на нем напряжения, которые еще сильнее его ослабляют [174].

Основанные на этой гипотезе математические компьютерные модели динамики разрыва [13, 129, 143, 173] для своей числовой реализации нуждаются в информации о механических свойствах нитей полотна и их переплетении. Поэтому актуальной является задача оценки робастности, т.е. нечувствительности, устойчивости результатов моделирования, к форме этих законов при фиксированных значениях числовых характеристик и параметров. В зависимости от результатов решения можно утверждать необходимость или необязательность детального исследования этих законов распределения.

В разработанных моделях для участвующих в них случайных величин использовалось нормальное распределение. Как правило, все эти величины по своему физическому смыслу не могут принимать отрицательных значений. Для соблюдения этого условия среднеквадратические отклонения σ задавались так, чтобы вероятность генерации отрицательных значений генераторами нормально распределенных случайных величин была ничтожно мала: $\sigma < (3 \div 4) m$, где m – математические ожидания. Это соотношение в большинстве случаев отвечает реальному соотношению средних и среднеквадратических значений для разрывной нагрузки и разрывного удлинения нитей основы и утка.

В качестве более удобного критерия при анализе робастности использованы кривые, отображающие изменение числовых характеристик поля удлинений нитей $d(i, j, t)$. Здесь d – удлинение участка i -й нити основы на участке между ее перекрытиями с j -й и $j+1$ -й нитями утка в момент t удлинения прямоугольного образца ткани вдоль нитей основы. В силу приведенной гипотезы значения d являются случайными величинами, причем по мере нарастания удлинения

увеличиваются не только их средние значения, но также и разброс значений. При моделировании динамики удлинения образца ткани до его разрыва для каждого момента времени t вычислялись значения: минимальное $dMin(t)$, максимальное $dMax(t)$, среднее $dMean(t)$, медианное $dMed(t)$, среднеквадратическое отклонение $dS(t)$, коэффициенты асимметрии $dA(t)$ и эксцесса $dE(t)$. На приведенных ниже графиках показаны относительные величины $dMin(t)$, $dMax(t)$, $dMed(t)$, $dS(t)$, отнесенные к среднему: $Dmin(t) = dMin(t) / dMean(t)$; $Dmax(t) = dMax(t) / dMean(t)$; $Dmed(t) = dMed(t) / dMean(t)$; $Cvd(t) = dS(t) / dMean(t)$. Относительные значения позволяют сделать более обобщенные выводы по результатам эксперимента.

Для проверки робастности нормальное распределение $N(md, \sigma d)$, моделирующее значения $d(i, j, 0)$, было заменено: 1) нормальным распределением со среднеквадратическим отклонением, уменьшенным в 10 раз $N10(md, \sigma d / 10)$ и 2) равномерным распределением $U(ad, bd)$. Диапазон варьирования d в этом распределении $ad < d < bd$ подбирался таким образом, чтобы среднее значение md и среднеквадратическое отклонение σd совпадали с их значениями у нормального распределения

$$\frac{bd + ad}{2} = md; \quad \frac{bd - ad}{2\sqrt{3}} = \sigma d \quad (4.6)$$

Выбор в качестве альтернативных распределений $N10(md, \sigma d / 10)$ и $U(ad, bd)$ позволил ответить на вопрос о роли параметров и формы распределения на результаты моделирования. При прочих равных условиях по сравнению с «базовым» вариантом распределения N для распределения $N10$ длительность удлинения до разрыва увеличивается практически в 2 раза: в «базовом» варианте разрыв наступает после $t = 27$ шагов удлинения, а для $N10$ – после $t = 52$ шагов. Для распределения U при равных средних и среднеквадратических отклонениях длительность удлинения до разрыва возрастает ($t = 39$ шагов до разрыва) в полтора раза по сравнению с «базовым» вариантом.

На рисунках 4.4-4.7 показана динамика нарастания $Dmin(t)$, $Dmax(t)$, $Dmed(t)$, $Cvd(t)$ по мере удлинения образца. Из графиков следует, что все основные числовые характеристики распределения удлинения участков основных

нитей изменяются подобным образом независимо от величины разброса разрывного удлинения для каждого участка каждой из нитей и самого закона распределения этого разрывного удлинения. Вместе с тем, изменение закона распределения с нормального закона на равномерное распределение при неизменных числовых характеристиках этих распределений, в соответствии с (4.6), приводит изменению удлинения всего образца до разрыва.

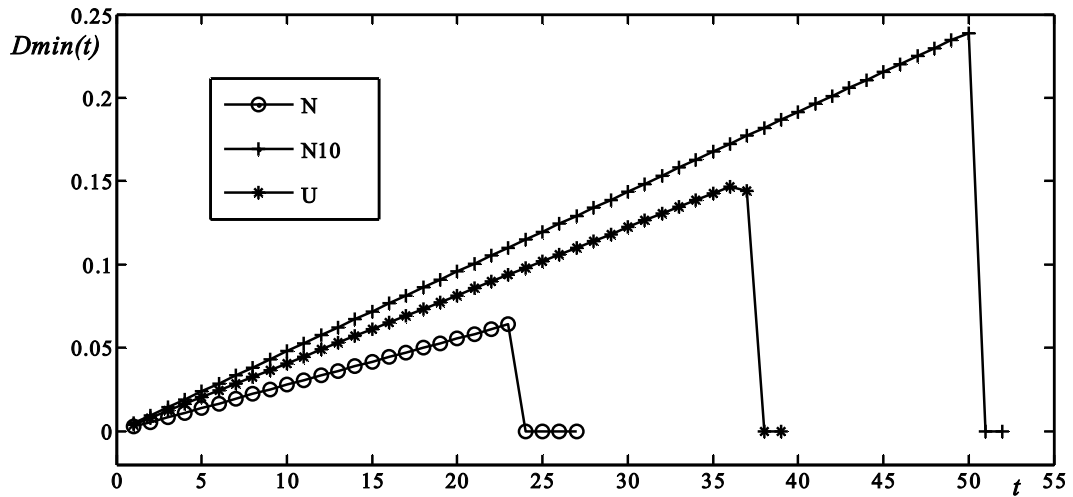


Рисунок 4.4 - Динамика изменения минимального удлинения $D_{min}(t)$

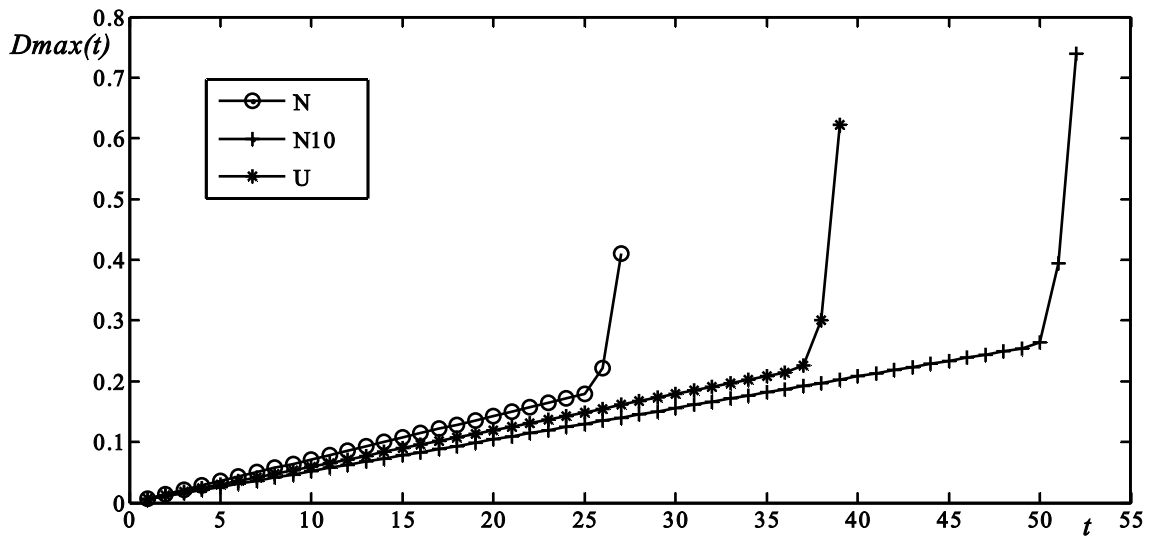
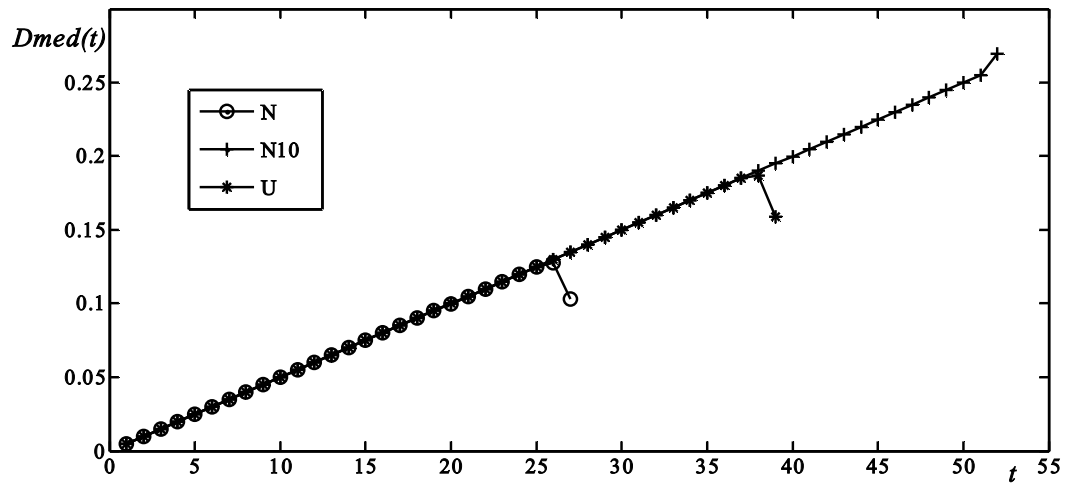
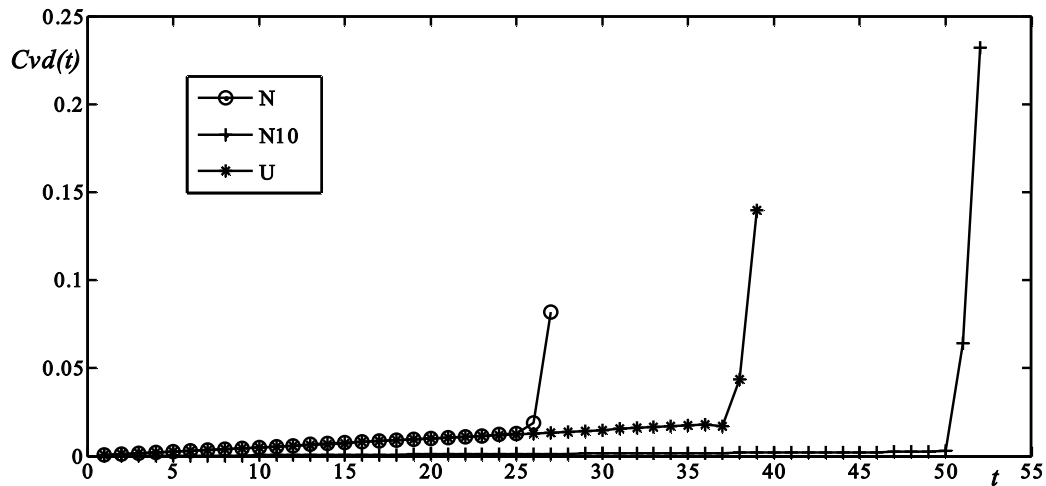


Рисунок 4.5 - Динамика изменения максимального удлинения $D_{max}(t)$

Рисунок 4.6 - Динамика изменения медианы удлинения $D_{med}(t)$ Рисунок 4.7 - Динамика изменения коэффициента вариации удлинения $C_{vd}(t)$

Следовательно, при исследовании особенностей динамики развития деформации в образцах ткани нет необходимости точно знать закон распределения разрывного удлинения нитей. Однако, если желательно спрогнозировать разрывное удлинение образца, исходя из информации о свойствах нитей, необходимо использовать данные не только о числовых значениях параметров нитей, но и их законы распределения.

4.4 Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна

Механические свойства текстильных тканых полотен зависят от двух групп факторов. Первая группа - это механические характеристики и свойства нитей основы и утка, из которых сформировано полотно. Вторая группа факторов определяет особенности переплетения нитей, которые зависят от геометрии раппорта и фазы строения. Как известно, фаза строения определяется по величине изгиба нитей основы и утка в областях их перекрытия и их окрестностях [175-177]. Текстильные полотна, выработанные из пряжи или/и нитей, являются уникальными искусственными материалами, созданными человеком и не имеющими аналогов в природе. Изделия из полотен представляют собой плоские или искривленные поверхности, площадь которых обычно составляет десятки квадратных дециметров или метров. Размеры раппорта переплетения двух систем нитей: основы и утка, - ничтожно малы по сравнению с этими площадями. Однако при этом все основные свойства полотен определяются именно особенностями переплетения [178].

Можно построить аналогию с полимерными материалами, свойства которых зависят от свойств, расположения и взаимодействия огромных молекул полимера, которые, однако, не смотря на огромные для микромира размеры, несоизмеримо меньше размеров изделий из этих полимерных материалов. Но есть и важнейшие отличия между текстильными полотнами и, например, полимерными пленками. Взаимодействие молекул полимера подчиняется законам квантовой механики, статистической физики и термодинамики. Взаимодействие нитей и волокнистых продуктов (например, пряжи) подчиняется законам классической механики. При этом специфика структуры и взаимодействия этих механических конструкций в ткани требует адаптации общих законов классической механики к этим объектам, чтобы получить возможность решать необходимые прикладные задачи. Огромное количество точек взаимодействия, распределённых по поверхности полотна, и безусловное наличие статистического разброса значений переменных и параметров, хотя бы в малых пределах, между точками взаимодействия, означает, что наиболее естественным было бы включить

в список используемых методов классическую статистическую механику. Взаимодействие элементов волокон и нитей в ткани происходит в результате их точечных или поверхностных контактов. Оно приводит либо к деформациям самих элементов, либо к их смещениям. Эти изменения можно разделить на консервативные и диссипативные. Первые не приводят к потерям механической энергии, вторые необратимым образом переводят механическую энергию деформации и перемещения элементов волокон и нитей в тепловую энергию. Именно благодаря диссипативным свойствам тканый материал, принимая на себя внешние механические воздействия, «гасит» их энергию, распределяя ее по своей поверхности и переводя ее в тепло.

Для прогнозирования механических свойств полотна на основе свойств нитей и переплетений разработано большое число различных геометрических, математических и компьютерных моделей. Некоторые из них рассмотрены, например, в [13, 31, 38, 177]. Однако, проблема моделирования продолжает оставаться актуальной и привлекать внимание многих исследователей. Здесь приводится двумерная модель тканого полотна в пределах линейно упругой составляющей деформации. Она основана на методе конечных элементов и позволяет учесть структурные особенности ткани.

Рассмотрим прямоугольный образец тканого полотна. Его проекция на плоскость, параллельную плоскости образца, состоит из участков трех типов. Первый тип - это "поры" - участки полотна, не заполненные нитями. После формирования ткани и ее последующей обработки нити частично расплющиваются в плоскости полотна и могут полностью или частично закрыть эти участки. В некоторых видах полотен, например, марли или сети, поры создают специально. Важно, чтобы размеры этих пор не слишком сильно отличались от проектных значений.

Второй тип участков - это перекрытия основы и утка. На эти участки попадают проекции, как минимум, одной нити основы и одной - утка. В многослойных тканях на эти участки могут проектироваться и больше двух нитей. Перекрытия и тесный контакт между нитями, усиленный трением и сцеплением

между нитями и волокнами внутри нитей на этих участках, являются главными факторами, от которых зависят механические свойства и целостность данного участка полотна.

Третий тип участков - это проекции участков нитей одной из систем: основы или утка - между участками перекрытий. В однослойных полотнах эти участки образуются проекциями одной из нитей. В многослойных тканях на эти участки могут попадать участники нескольких нитей, которые, однако, в отличие от участков второго типа, непосредственно не контактируют, лишь их проекции попадают на одни и тот же участок плоскости. На таких участках механические свойства полотен определяются свойствами только этих нитей.

Простейшим видом механического воздействия на прямоугольный образец полотна является его удлинение вдоль одной из его сторон (и одной из систем нитей - основы или утка) с сохранением плоской формы образца. Стандартные размеры образца для такого воздействия в лабораторных условиях равны 0.20 м вдоль удлинения и 0.10 м в поперечном направлении. Для определенности, будем считать, что удлинение образца происходит вдоль нитей основы. При плотности ткани по утку 4000 нитей/м получим, что на нагружаемой части образца находится порядка 800 нитей утка.

Модель удлинения образца основана на замене ткани сплошной деформируемой средой в двумерном пространстве. При быстром монотонном удлинении образца эффектами релаксации и пластической составляющей деформации можно пренебречь. В линейной упругой модели материал описывается двумя параметрами: модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν . Чтобы учесть особенности периодической структуры ткани, обусловленные раппортом переплетения и параллельными нитями основы и утка, значения E и ν будем описывать периодическими функциями координат. В качестве простейшего примера таких функций выберем следующие зависимости, приближенно отвечающие однослойной ткани полотняного переплетения

$$\begin{aligned} E(x, y) &= 2e9(1 + 0.6\sin(2\pi x / 0.0005)\cos(2\pi y / 0.0005)), Pa \\ \nu(x, y) &= 0.2((1 + 0.6\sin(2\pi x / 0.0005)\cos(2\pi y / 0.0005))) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Значения E и ν меняются синхронно по обеим осям с периодом $T = 0.0005$ м. При удлинении образца на 10% (0.02 м) в образце возникают механические напряжения и пропорциональные им деформации в плоскости образца. Используем для моделирования этих напряжений и деформаций метод конечных элементов, построив в пределах геометрической модели образца сетку конечных элементов прямоугольной формы. Число элементов 5000, число степеней свободы 40602, моделирование выполнено в системе Comsol 4.

В качестве интегрального показателя напряженного состояния деформируемой сплошной среды, использованной в качестве модели образца, принято использовать так называемое эквивалентное «напряжение по фон Мизесу». Распределение этого напряжения по плоскости удлиненного образца показано цветной контурной диаграммой на рис. 4.8.

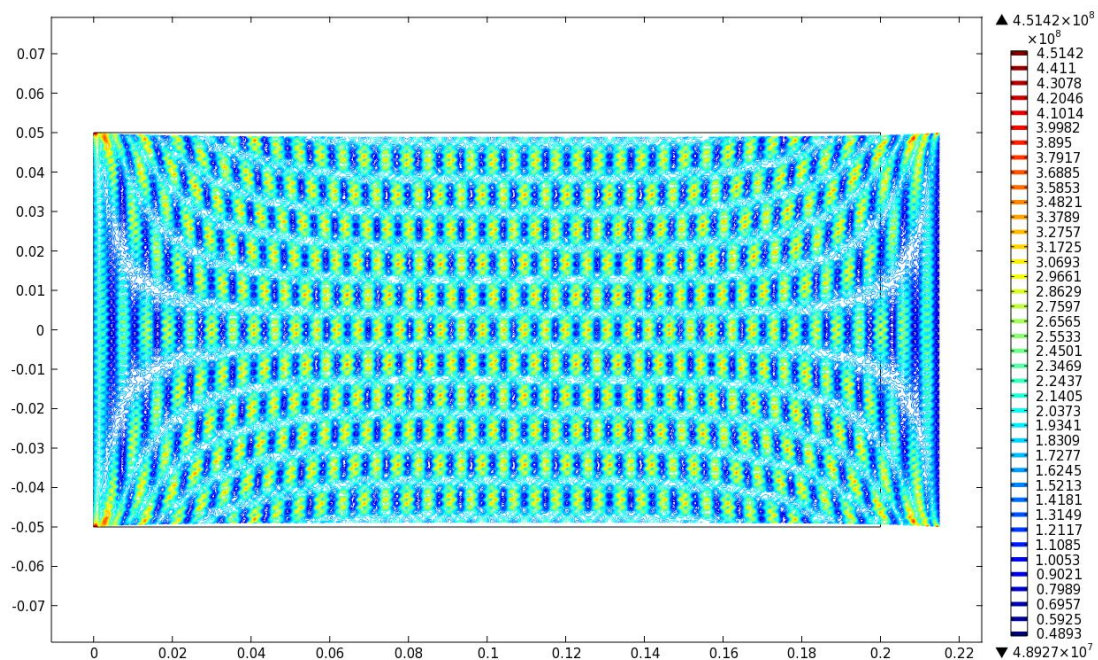


Рисунок 4.8 - Контурные диаграммы равных механических напряжений по фон Мизесу

Видно, что наиболее напряженными и деформированными являются участки по углам образца.

Периодически меняющиеся механические характеристики полотна приводят к волнам в распределении напряжений. Это отчетливо видно на рис. 4.9,

на котором представлены напряжения по фон Мизесу и относительные продольные и поперечные удлинения (первая и третья главные компоненты тензора деформаций) по линиям, направленным вдоль середины образца и одного из его краев.

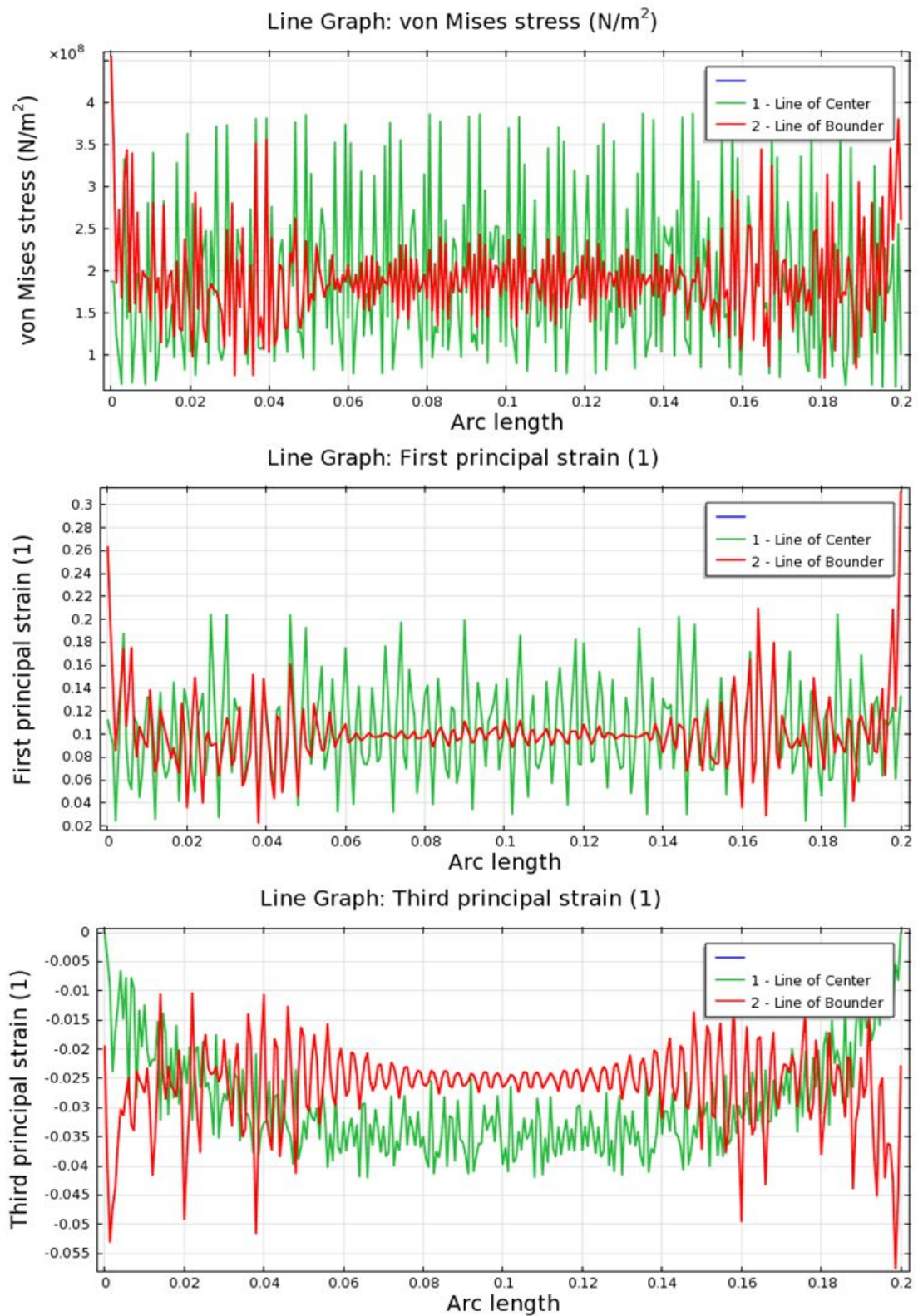


Рисунок 4.9 - Напряжения и относительные продольные и поперечные деформации по длине образца в его середине и по краю

Большой размах колебаний напряжений и деформаций свидетельствуют о том, что при проектировании и прогнозировании механических свойств тканых полотен нельзя исходить из усредненных значений. Необходимо учитывать изменения механических свойств нитей после заработки их в полотно и особенности их взаимодействия на участках перекрытия и в промежутках.

4.5 Одномерная модель удлинения нитей основы в тканом полотне с учетом сил трения

Важнейшую, если не основную, роль во взаимодействии волокон в пряже, а нитей основы и утка, - в ткани, играют силы трения и сцепления. Их принято относить к разновидности трения, называемого «сухим» трением, и описывать обобщенным законом Кулона – Амонтона [119]. Движение или покой взаимодействующих по этому закону тел описываются уравнениями механики, которые являются нелинейными, плохо поддающимися линеаризации. Поэтому адекватное включение поля сил сухого трения, например, в конечно-элементную модель проблематично. Как было доказано в [13], при квазистатических нагрузках наличие большого числа участков трения в материале со статистическим разбросом значений нормальных давлений, площадей контакта и коэффициентов трения и сцепления происходит нивелирование нелинейного закона Кулона – Амонтона и преобразование его в закон вязкого трения, в котором сила трения линейно связана со скоростью деформации [179].

Для оценки роли сил трения при деформации тканого полотна рассмотрим упрощенную модель деформации нити основы при удлинении образца ткани. Геометрическая схема модели представлена в верхней части рис. 3.10. На участках перекрытия основы и утка происходит уменьшение передаваемой по основе силы натяжения $T(k)$ из-за противодействующих сил трения. В идеализированной форме для тонких нерастяжимых нитей, огибающих криволинейную поверхность, это уменьшение описывается формулой Эйлера $T(k) = T(k-1) \exp(-\mu \alpha)$, где k – номер уточной нити, который отсчитывается от подвижной кромки образца; μ – коэффициент трения, α – угол охвата нитью

криволинейной поверхности. В рассматриваемом случае формула может быть применена к тем волокнам основной нити, которые на участке перекрытия неподвижны относительно утка и охватывают его на участке перекрытия. Та часть волокон основы, которая непосредственно не взаимодействует с утком, находится в тесном взаимодействии с окружающими их волокнами за счет уплотнения сечений основы на участках перекрытия. Поэтому их также можно считать неподвижными относительно уточной нити и распространить и на них применение формулы Эйлера. Поскольку поперечное сечение нитей основы соизмеримо с радиусом кривизны, а нити содержат большое число волокон или элементарных нитей, и само сечение далеко от идеализированной формы вследствие расплющивания при формировании элемента переплетения, то формула Эйлера применима с определенными оговорками.

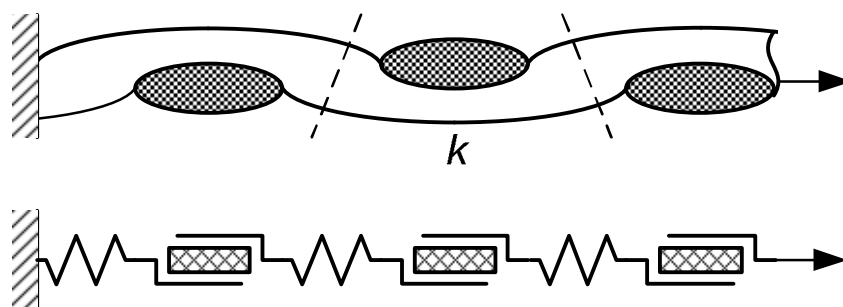


Рисунок 4.10 - Геометрическая схема и механическая модель удлинения нити основы при растяжении образца тканого полотна. Чередование упругих элементов и элементов с сухим трением

Существуют и другие важные особенности деформации основной нити при удлинении образца ткани вдоль основы. Участки основной нити, направленные вдоль действия растягивающей нагрузки, приходятся на перекрытия с нитями утка. Взаимодействие с утком упрочняет нить основы. Части основной нити, приходящиеся на участки между перекрытиями, находятся под большими углами β к плоскости ткани. Поэтому деформация этих частей нити относительно невелика. Эти особенности в целом приводят к увеличению прочности ткани и увеличивают ее сопротивление удлинению.

Перечисленные специфические особенности можно приближенно учесть, уменьшив эффективное значение коэффициента трения. Учитывая, что в каждом перекрытии эти изменения имеют случайные вариации, примем, что эффективное значение коэффициента трения равно $\mu_e = z \mu$, где z – равномерно распределенное случайное число.

Каждый элемент ткани, включающий в себя участок перекрытия основной и уточной нитей и участок основы между соседними уточинами, описывается следующими соотношениями

$$\begin{aligned} T(k) &= T(k-1) \cdot \exp(-\mu_e(k) \cdot \alpha(k)) \\ \Delta L(k) &= \frac{T(k) \cdot L(k)}{E(k) \cdot S(k)} \cdot \cos(\beta(k)), \quad k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4.8)$$

В этих формулах: $T(k)$ – натяжение нити основы в k -м элементе перекрытия; $\mu_e(k)$ – значение эффективного коэффициента трения между волокнами основной нити и волокнами утка; $\alpha(k)$ – угол охвата нитью основы уточной нити на участке перекрытия; $\Delta L(k)$ – величина абсолютного удлинения основной нити в пределах k -го элемента перекрытия в плоскости тканого полотна; $L(k)$ – длина нити основы в пределах k -го элемента перекрытия; $E(k)$ и $S(k)$ – соответственно, модуль упругости и площадь поперечного сечения основной нити; $\beta(k)$ – угол наклона нити основы к плоскости полотна в соответствии с фазой строения переплетения. Все перечисленные величины, входящие в формулы, зависят от номера элемента перекрытия, поскольку они могут варьироваться в некоторых, иногда весьма значительных пределах, от элемента к элементу из-за влияния различных случайных факторов.

Для моделирования удлинения нити основы был построена компьютерная программа [139, 143], выполняющая вычисления в соответствии с приведенными формулами рекуррентно для каждого элемента полотна. Исходные данные, использованные при расчетах: длина моделируемого образца 0,2 м; плотность ткани по утку 400 нитей на дециметр; толщина основной и уточных нитей принята одинаковой и равной 30 текс; модуль упругости $2 \cdot 10^9$ Па, что соответствует нейлону; среднее значение коэффициента трения 0,26; углы

охвата основной нитью уточной нити и наклона основной нити к плоскости ткани соответственно 140 и 60 градусов.

На графиках рис. 4.11 показаны кривые изменения относительного удлинения нити основы и относительной накопленной деформации в зависимости от номера элемента. Кривые получены для трех вариантов моделей. В первом варианте среднее значение коэффициента трения равно 0,26 с равномерно распределенными случайными вариациями между элементами перекрытия в пределах $\pm 0,03$. Во втором варианте случайная составляющая вариации исключена, а коэффициент трения равен среднему значению. В третьем варианте случайная составляющая коэффициента трения также отсутствует, но значение увеличено до 0,33. В соответствии с этими вариантами на рисунке относительные удлинения обозначены: u для первого варианта; uSr для второго варианта и uM для третьего варианта. Аналогично, накопленные по длине образца относительные удлинения обозначены us , $usSr$ и usM . В качестве аргумента в графиках всех этих зависимостей использованы не номера элементов k , а их отношения к общему числу уточных нитей в моделируемом образце Nk .

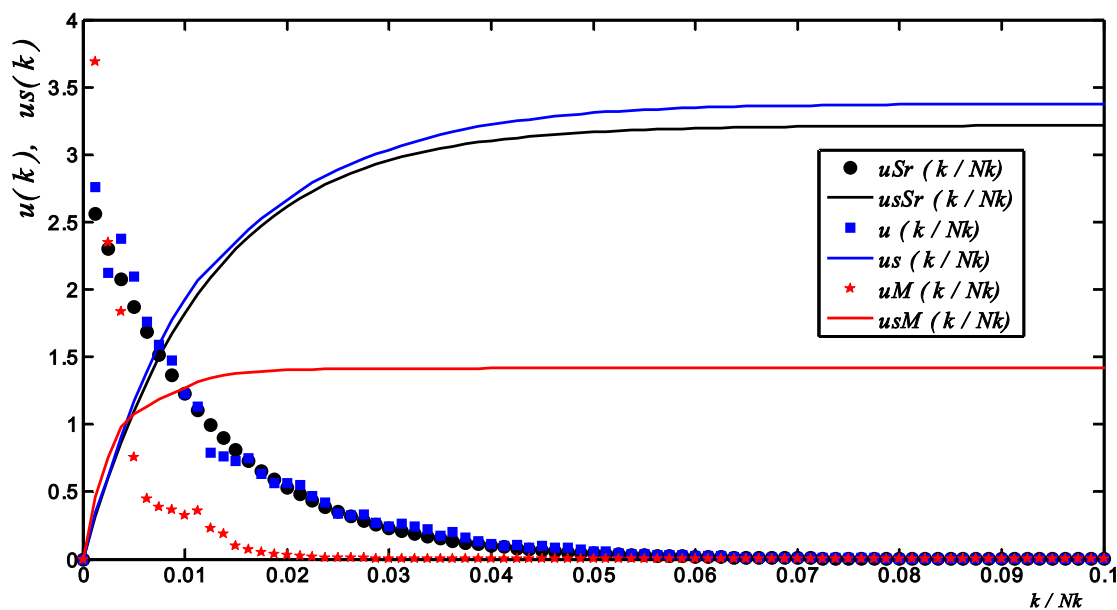


Рисунок 4.11 - Изменение относительной деформации нити основы по длине растягиваемого образца тканого полотна

Кривые на рис. 4.11 показывают, что, несмотря на заметные случайные вариации относительной деформации нити основы от элемента к элементу, относительная накопленная деформация нивелирует эти вариации и может быть хорошо аппроксимирована экспоненциальной зависимостью. Таким образом, моделирование показало, что деформация удлинения распространяется не по всей длине образца полотна равномерно, а постепенно ослабевает от той части образца, к которой она непосредственно применяется, к удаленной части образца. Напряжение в нити также ослабевает за счет сил трения по мере удаления участка от места приложения нагрузки. Вместе с тем, случайные вариации величин от одного к другому элементов перекрытия не существенны для распространения деформации и напряжения и могут быть исключены из рассмотрения, что упрощает модель.

Аналогичные выводы можно получить и с помощью конечно-элементной модели основной нити в растягиваемом образце ткани. В основу геометрической модели при конечно-элементном моделировании нити основы использованы геометрическая модель нити основы и схема структуры ее взаимодействия с нитями утка, изображенная на рис. 4.10. Для имитации взаимодействия нити основы с уточными нитями задавались граничные условия в виде чередующихся по направлению действия сил, направленных перпендикулярно оси нити основы в пределах полуволн только на участках ее взаимодействия с нитями утка. Для имитации сил трения задавались силы, направленные в сторону, противоположную деформации, и действующие по объему нити основы в пределах взаимодействия с уточными нитями. Амплитудные значения этих сил обозначим A усл. ед., а коэффициент трения μ .

На рис. 4.12 представлены полученные с помощью этой модели эпюры первого главного компонента тензора деформации ϵ_{rx} для трех вариантов моделирования.

В первом варианте силы взаимодействия с уточными нитями отсутствовали, и силы трения были «выключены», т.е. нить моделировалась как абсолютно

упругий, прямолинейный стержень, удлиняемый на 10% своей длины. При этом, за исключением краев нити, деформация распределена равномерно по длине.

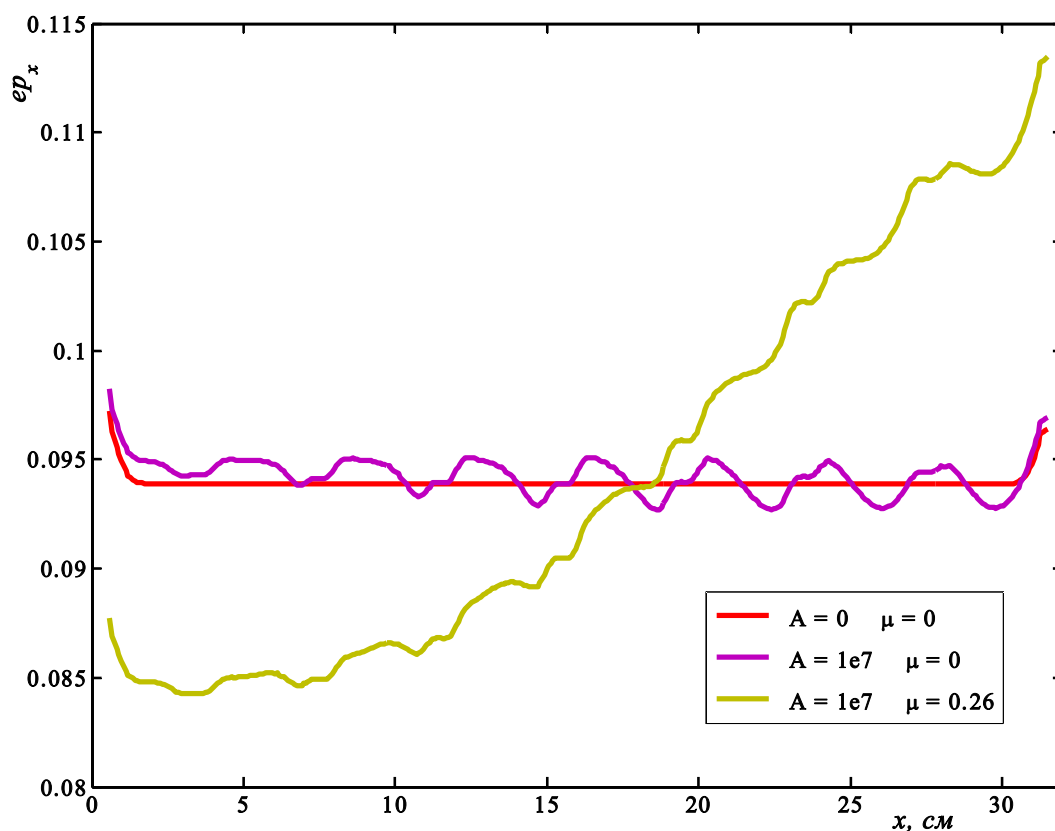


Рисунок 4.12 - Диаграмма распределения главного компонента тензора деформации по длине основной нити при отсутствии сил трения для трех вариантов конечно-элементного моделирования

Во втором варианте «включены» силы поперечного воздействия (изгиба) нити под действием нитей утка, что привело к изгибу основы и возникновению периодических изменений в величине деформации по длине нити.

В третьем варианте, кроме изгибающих поперечных воздействий, на нить основы действуют также силы трения, распределенные по ее объему на участках взаимодействия с нитями утка. При этом деформация нити основы сосредоточена у конца, к которому приложена удлиняющее воздействие. На зажатом и неподвижном конце нити деформация принимает малые значения. Это подтверждает вывод о том, что трение в нити основы, как между ее волокнами,

так и о нити утка, приводит к перераспределению деформации и напряжений по длине нити основы, а значит, и по длине образца ткани.

4.6 Моделирование удлинения основной нити в ткани

В [13, 14, 24, 169, 172] рассмотрены разработанные авторами компьютерные модели деформации и разрыва прямоугольных образцов тканого полотна и описаны результаты некоторых экспериментов с этими моделями. Накопленный опыт работы с этими моделями показал, что они, безусловно, углубляют представления о механизме взаимодействия нитей в ткани, роли переплетения и физической природы волокон, из которых выработаны нити основы и утка [10, 180-183]. Вместе с тем, разработанные модели ограничены различными условиями, предположениями, неопределенностью исходных данных [16, 15, 28, 184]. Это стимулирует разработку новых моделей в качестве эффективных инструментов для дальнейших исследований [30, 92, 185, 186].

Рассмотрим роль нелинейной формы, которую приобретают нити основы в процессе их заработки в полотно, при растяжении образца ткани на разрывной машине [106]. В рассматриваемой модели нить основы рассматривается как сплошная среда. Для исследования ее деформации использован метод конечных элементов. Геометрическая модель нити основы в полотне показана на рис. 4.13.

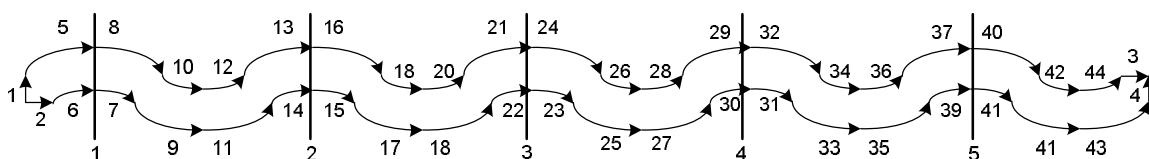


Рисунок 4.13 - Геометрическая модель основной нити

Контур нити составлен из эллиптических сегментов, которые отмечены порядковыми номерами [187]. Эллиптические сегменты согласуются с формой поперечных сечений уточных нитей и формой основной нити на фотографиях поперечных сечений ткани. Для моделирования динамики удлинения образца вдоль основы с постоянной скоростью зададим краевые условия: сегмент 1 не

смещается и не вращается в течение всего моделируемого интервала времени. Сегмент 4 смещается вправо на величину u_4 с постоянной скоростью V : $u_4(t) = Vt$. При растяжении основной нити амплитуды полуволин ее формы уменьшаются, и возрастает сопротивление деформации основы со стороны уточных нитей. Эта специфика деформации основы учтена в модели заданием граничных условий на контуре формы. На сегментах {6, 7, 14, 15, 22, 23, 30, 31, 39, 41} задана нарастающая со временем нагрузка $P(t) = p t$, а на сегментах {10, 12, 18, 20, 26, 28, 34, 36, 42, 44} нагрузка - $P(t)$, которые направлены вдоль оси Y , соответственно в положительном и отрицательном направлениях. $P(t)$ имитируют нарастающее сопротивление уточин распрямлению основы при ее удлинении. К сегментам {7, 12, 15, 18, 23, 26, 30, 34, 39, 42} приложены также силы $T(t) = -m t$. Эти нагрузки имитируют нарастающее противодействие уточин смещению полуволин основы в сторону удлинения. Они направлены вдоль оси X в сторону, противоположную удлинению.

При формировании элемента ткани нить основы подвергается деформации. В результате форма и площадь поперечного сечения, механические характеристики нити в разных сечениях могут заметно отличаться. Эти изменения сохраняются в нити вследствие пластической составляющей ее свойств. В первом приближении эту неоднородность нити по длине можно учесть, задавая модуль упругости в виде периодической функции по длине нити $E(x) = E_0 (1 + A \cos(2\pi x / L_0 - q))$. Здесь E_0 - постоянная составляющая модуля, A - доля переменной составляющей модуля, L_0 - длина раппорта по основе. Аналогичная формула использована для коэффициента Пуассона $m(x)$. Начальная фаза q задавалась таким образом, чтобы наибольшие значения $E(x)$ и наименьшие значения $m(x)$ приходились на участки перекрытия нитей основы и утка. Как известно [13, 14, 15, 92], любая математическая и компьютерная модель обладает свойствами подобия, которые позволяют задавать все параметры модели в относительных единицах. В описываемой модели наибольшее удлинение равно $D = 10\%$ длины образца. Длина моделируемого участка нити составляла всего пять раппортов, что оказалось достаточным для обнаружения эффектов и нивелирования

особенностей деформации на концах нити. Относительная величина амплитуды $A = 0.2$, «средний» диаметр нити равен 20% длины раппорта. В МКЭ для построения сетки использована триангуляция Делоне с числом степеней свободы 12544.

Приведенные ниже результаты относятся к конечному состоянию нити по завершении удлинения. Моделирование выполнено в системе Comsol. На рис. 4.14 показана трехмерная диаграмма распределения удлинения нити u по длине образца. Периодические вариации параметров нити и внешних воздействий от уточных нитей привели к заметным вариациям и отклонениям от линейного закона, который описывает удлинение однородного и прямолинейного стержня. В нижней части рисунка показаны контуры недеформированной и деформированной нити.

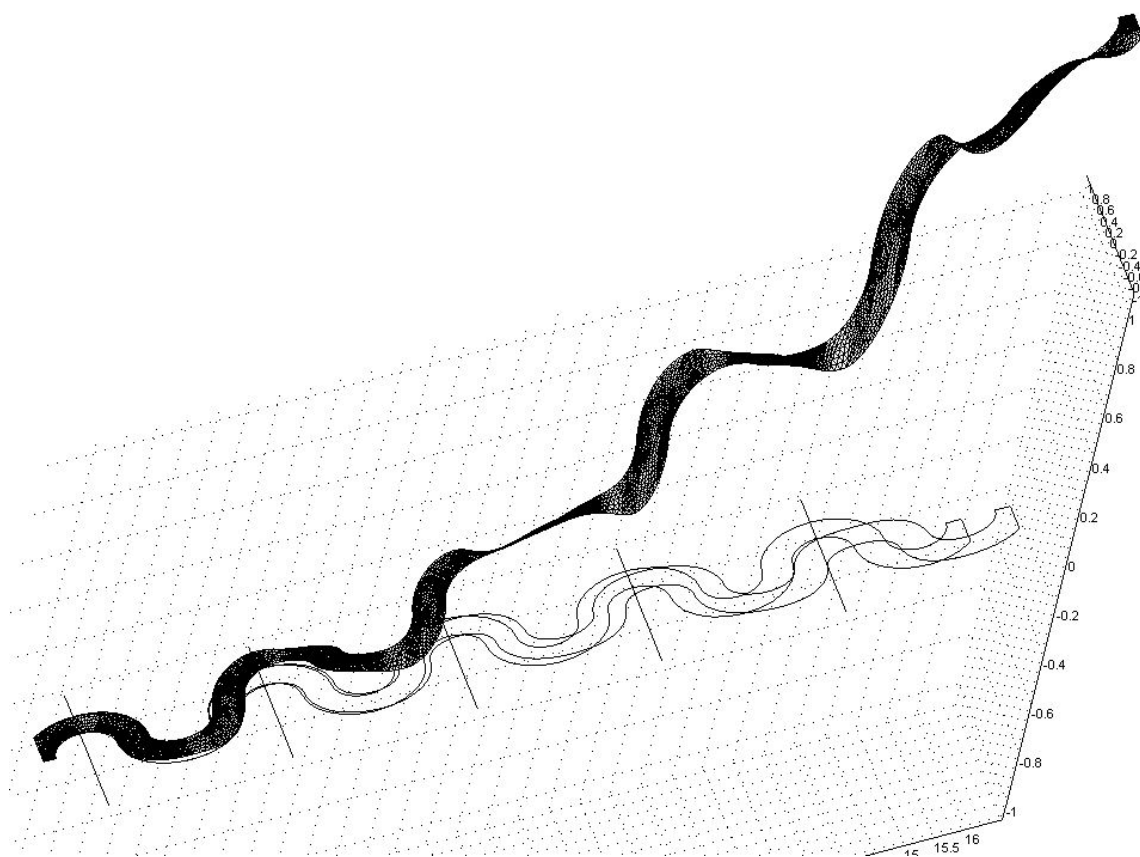


Рисунок 4.14 - Распределение удлинения в нити основы при ее удлинении

На рис. 4.15 показаны линии уровня распределения обобщенного напряжения «по Мизесу» и главного компонента тензора относительной деформации fps по оси X в объеме нити. На рис. 4.16 показано распределение fps в различных поперечных сечениях нити в зависимости от положения этих сечений на длине нити. Сечения показаны на рис. 4.13 вертикальными линиями.

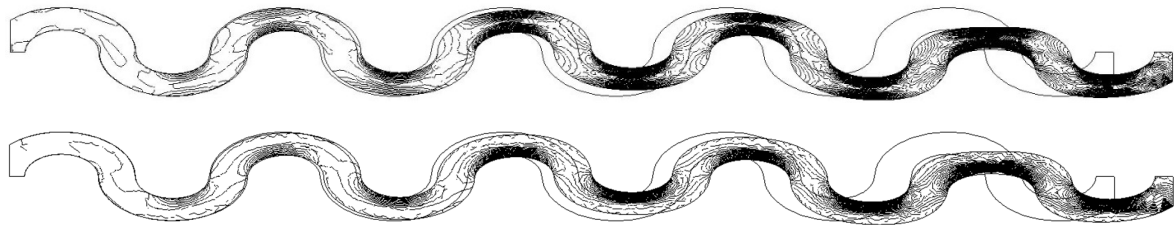


Рисунок 4.15 - Распределения напряжений "по Мизесу" (вверху) и главного компонента тензора деформации fps (внизу) в объеме нити в деформированном образце

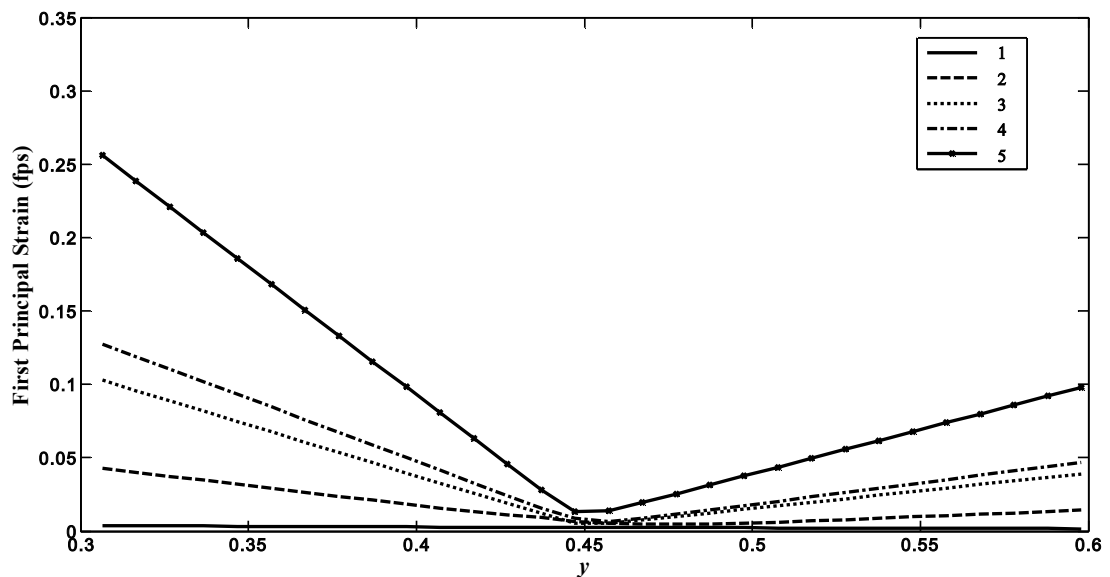


Рисунок 4.16 - Распределение fps вдоль поперечного сечения y нити для разных сечений 1, ..., 5 на рис. 3.13.

Из приведенных диаграмм следует, что деформация нити основы при удлинении образца ткани существенно отличается от деформации удлинения нити до заработки ее в ткань. Происходит не просто аффинное пропорциональное преобразование всех сечений нити, но меняется форма нити, например, форма

полуволокна. Деформация сосредотачивается, в основном, на участках перекрытия нитей основы и утка. Промежуточные участки основы напряжены в значительно меньшей степени, несмотря на меньшие значения модуля упругости для этих участков благодаря большим углам наклона этих участков к плоскости ткани.

Существенная неоднородность деформации нити по длине и поперечным сечениям должна учитываться при анализе деформации и разрыва ткани, изучении прочности тканых полотен, проектировании и выборе переплетения, при моделировании деформации образцов ткани.

4.7 Распределение деформаций по основе и влияние уточных нитей на деформацию при моделировании удлинения основной нити в ткани

Рассмотрим роль уточных нитей в увеличении прочности тканого полотна. В качестве объекта возьмем прямоугольный образец полотна, растягиваемый вдоль основы с постоянной скоростью на разрывной машине. Очевидно, что пучок нитей основы сопротивляется удлинению гораздо меньше, чем те же нити и в том же числе, заработанные в ткань [13, 24, 169, 172]. Их переплетение с утком создает в полотне распределенное по площади поле сопротивления, препятствующее деформации образца. Механизм возникновения этого сопротивления [28, 180, 181, 183, 184] прост: нить основы в полотне изогнута и находится в равновесии, как и уток. При удлинении образца основа пытается распрямиться, поскольку ее сопротивление на изгиб значительно меньше сопротивления на растяжение. Однако распрямление основы означает давление на уток и попытку увеличить его изгиб, чему уток сопротивляется, т.е. энергия деформации основы частично передается утку, а значит, доля энергии, приходящая на деформацию основы, уменьшается. Наряду с упругими силами, в механизме распределения напряжений и деформации важнейшую роль играют диссипативные силы трения между нитями основы и утка и между волокнами и элементарными нитями внутри основы и утка, что затрудняет получение аналитических оценок для этого перераспределения [188].

Воспользуемся разработанной авторами конечно-элементной моделью деформации тканого полотна и изогнутой в полотне нити основы [16, 30, 186]. Кроме внешней нагрузки, приложенной к одному концу нити и удлиняющей ее в плоскости образца с постоянной скоростью, к нити приложены поверхностные силы ее взаимодействия с утком (рис. 4.17).

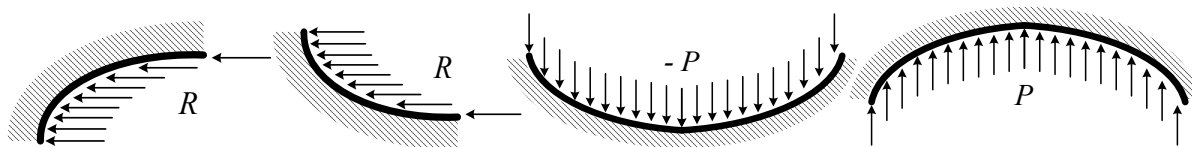


Рисунок 4.17 - Распределенная силовая нагрузка на участках взаимодействия основной нити с нитями утка

Эти силы действуют как в направлениях, перпендикулярных плоскости образца (ось Y), так и вдоль этой плоскости (ось X). Величина этих сил пропорциональна деформации основы в соответствующем направлении:

$$R(t) = Rm e_{XX}(t), \quad P(t) = \pm Pm e_{YY}(t) \quad (4.9)$$

Здесь e_{XX} и e_{YY} нормальные компоненты тензора деформации по осям X и Y , Pm и Rm интенсивности сил трения и упругого сопротивления деформации основы со стороны утка.

Рассмотрим, как интенсивности Pm и Rm влияют на распределение и величину деформации основы. С этой целью было выполнено моделирование деформации основной нити при удлинении ее с постоянной скоростью на 10% от исходной длины образца. Поскольку удлинение моделировалось для квазистатического режима [10, 92], эффекты релаксации в рассмотрение не включались. Среднее значение модуля упругости нити принято равным $2e9$ Па, что соответствует нейлону-6, с периодическими вариациями в соответствии с чередованием участков перекрытия «основа – уток» и промежуткам между ними и с относительной амплитудой вариаций A . План эксперимента включал в себя варьирование трех факторов: A , Pm и Rm , каждый – на двух уровнях: $A = \{ 0 ; 0,8$

}; $Pm = \{ 0 ; 1e7 \text{ Pa} \}$; $Rm = \{ 0 ; 1e6 \text{ Pa} \}$. В эксперименте моделировались варианты деформации основы, показанные в таблице 4.1.

Варианты моделирования деформации нити основы отличались значениями Pm и Rm . В первой серии экспериментов с моделью варьировалась величина Rm от 0 до $1e8 \text{ Pa}$ с шагом $2,5e7$, всего 5 уровней. Среди большого списка рассчитываемых характеристик деформации и напряжения нити основы, рассчитываемых компьютерной моделью, выбран компонент e_{XX} тензора деформации. Эта характеристика деформации выражена в относительных единицах, что удобно для сравнения вариантов [95, 99, 101], и является главным показателем деформации нити вдоль направления приложения нагрузки.

Таблица 4.1 - План компьютерного эксперимента
с моделью деформации основной нити

№№ вариантов модели	Значения варьируемых факторов		
	A	Pm	Rm
1	0	0	0
2	0,8	0	0
3	0	$1e7, \text{ Pa}$	$1e6, \text{ Pa}$
4	0,8	$1e7, \text{ Pa}$	$1e6, \text{ Pa}$

Поскольку в результате моделирования каждого варианта были получены распределения e_{XX} по длине нити, то результаты моделирования наиболее наглядно можно представить кривыми на рис. 4.18, 4.19.

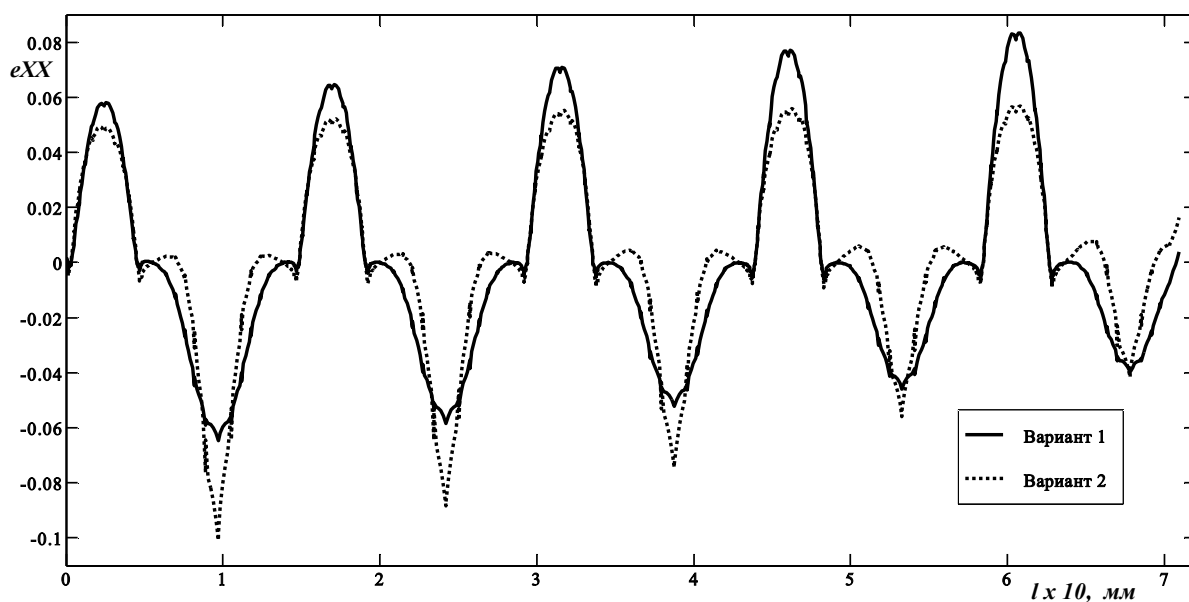


Рисунок 4.18 - Распределение нормального компонента e_{XX} тензора деформации вдоль основной нити для 1-го и 2-го вариантов модели удлинения образца

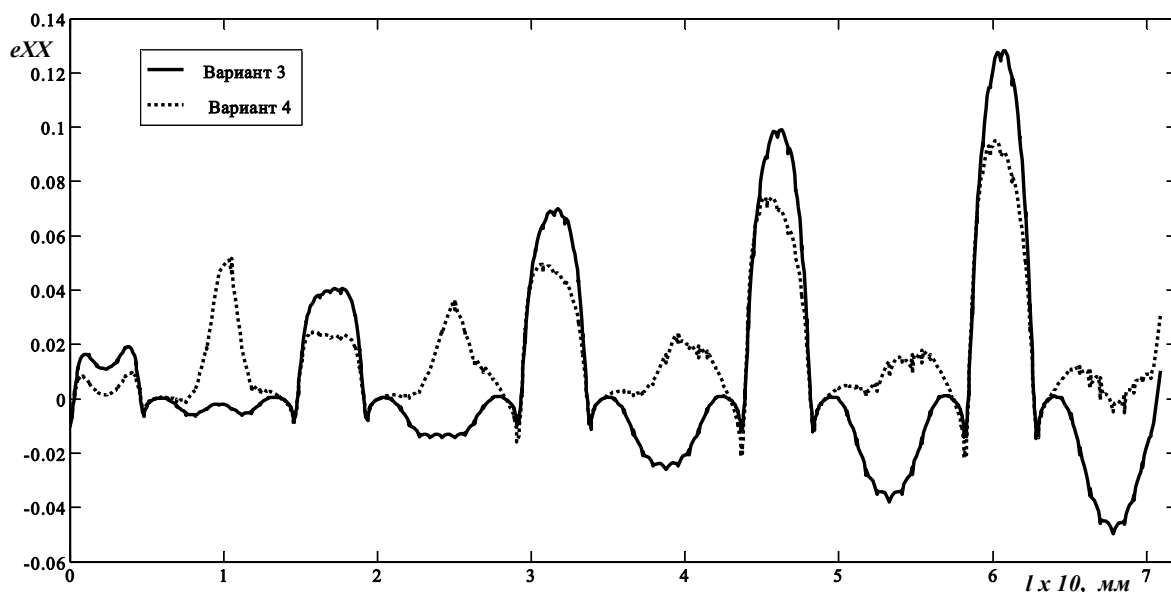


Рисунок 4.19 - Распределение нормального компонента e_{XX} тензора деформации вдоль основной нити для 3-го и 4-го вариантов модели удлинения образца

Кривые распределения компонента тензора деформации показывают, что в пределах одного элемента ткани продольная деформация имеет большой диапазон варьирования как по величине, так и по знаку. Вариации нарастают по мере приближения участков основы к области подвижного зажима (на рисунках -

справа). Силы давления со стороны утка на нить основы приводят к заметному увеличению асимметрии в кривых распределения и росту перепадов деформации. Периодичность вариаций деформации кратна длине элемента ткани, от участка перекрытия основы и утка до следующего аналогичного перекрытия. Однако для разных показателей в этих периодических вариациях наблюдаются фазовые смещения, величина которых зависит от соотношения внешних нагрузок и вариаций модуля упругости. Отметим, что аналогичные эффекты проявляются и у других компонентов тензора деформации и тензора напряженности материала нити.

4.8 Моделирование неравномерности распределения деформации основных нитей в тканых полотнах методом конечных элементов

В современных тканых полотнах технического и специального назначения основа и уток сформированы, как правило, из химических волокон и/или элементарных нитей искусственного или синтетического происхождения [189, 190]. После завершения формирования очередного элемента ткани: участка перекрытия основной нити утком и промежутка между соседними нитями утка, - механические напряжения, возникшие в нитях в процессе прибоа, релаксируют, и нити в пределах элемента ткани находятся в равновесном состоянии, т.е. внутренние напряжения и деформации в пределах элемента ткани равны нулю [15, 28, 183, 184]. При этом нити основы и утка претерпевает существенные изменения по сравнению с их видом до заработка нитей в ткань [180-182]. Это видно на множестве фотографий поперечных срезов элементов ткани [16]. Перечислим основные из этих изменений.

1. Элемент ткани имеет размеры, соизмеримые с толщиной нитей. Поэтому механика бесконечно тонкой и растяжимой или нерастяжимой нити вряд ли применима [92] для изучения деформации нитей в пределах элемента ткани.

2. Размеры элемента ткани на один - три порядка меньше длины волокон или нитей, из которых выработаны основа и уток. Поэтому при рассмотрении

механики деформации элемента ткани не имеет значения, их чего они выработаны: из волокон конечной длины или нитей [13, 14, 30].

3. При формировании элемента ткани деформации изгиба и поперечного сжатия нитей настолько велики, что нити теряют свою округлую форму и приобретают форму неправильного овала, которая заметным образом меняется от одного поперечного сечения нити к другому в пределах одного элемента ткани [13, 14]. Поэтому механические характеристики нитей основы и утка нельзя считать постоянными в этих пределах. Они периодически варьируют с периодом, равным протяженности элемента в направлении соответствующей нити. Нити основы и утка сильно изогнуты, что следует учитывать в механике их деформации при нагрузках на полотно [13, 14, 24].

4. По тем же причинам для нитей не выполняется один из базовых принципов линейной теории сопротивления материалов - плоские до деформации сечения нитей перестают оставаться плоскими после деформации. Этот принцип позволяет использовать линейную теорию деформаций в механике элемента ткани, например, для исследования удлинения нитей при растяжении образца тканого полотна на разрывной машине. Поэтому необходимо использовать исследовательский инструментарий, способный учесть возможные отклонения от линейности.

5. Скорость деформации нитей в пределах элемента ткани при полуцикловом растяжении образца такова, что можно пренебречь динамическими эффектами и считать процесс деформации квазистатическим, в отличие, например, от процесса приборя уточной нити на ткацком станке [13, 15, 180, 181, 183].

6. При растяжении прямоугольного образца тканого полотна на разрывной машине вдоль нитей основы все элементы ткани, расположенные вдоль одной уточной нити, с точностью до статистических вариаций [10, 15, 169, 172, 181, 186], деформируются практически одинаково. Это позволяет рассмотреть лишь один элемент для некоторой "типичной" нити основы.

7. При растяжении образца ткани нити основы и утка меняют свою форму. Это отражается на изменении сил взаимодействия между этими двумя системами нитей при растяжении образца, которое необходимо учитывать при исследовании механики деформации.

Перечисленные особенности обусловили выбор метода моделирования механики [13, 24, 30, 124, 185]. Ниже описываются результаты исследований, выполненных на компьютерной модели деформации нити основы в пределах нескольких элементов ткани во взаимодействии с уточными нитями и с учетом перечисленных особенностей. Для моделирования использовался метод конечных элементов (МКЭ), успешно зарекомендовавший себя в ряде аналогичных моделей [13, 15, 14, 30, 129, 183, 185]. Модель пригодна главным образом для тканых полотен, выработанных из текстильных нитей. Фрагмент контура нити основы с сеткой конечных элементов в виде неправильных выпуклых четырехугольников показан на рис. 4.20. Выбор четырехугольников в качестве элементов МКЭ вместо, например, более "удобных" для реализации МКЭ треугольников Делоне, позволил более точно отобразить в сетке расположение волокон в нити.

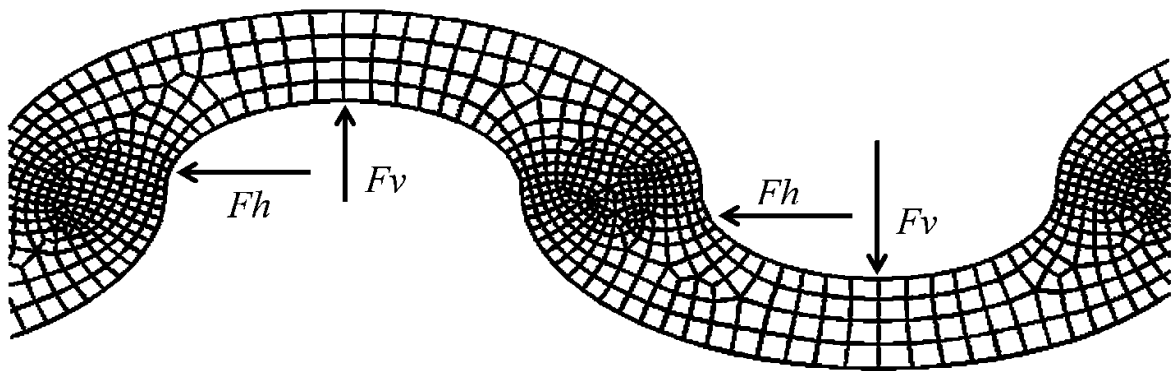


Рисунок 4.20 - Фрагмент сетки МКЭ для участка нити основы в элементе ткани

Стрелками на рисунке показаны направления сил давления, действующего со стороны уточных нитей на нить основы и препятствующих изменению ее формы. Горизонтальное Fh и вертикальное Fv составляющие давления распределены по длине соответствующего сегмента контура нити в пределах

области взаимодействия между основой и утком. При моделировании значения этих давлений задавались в паскалях (Па) линейно нарастающими со временем t моделирования: $Fh = Fch \cdot t / Tm$; $Fv = Fcv \cdot t / Tm$. В этих формулах Fch и Fcv – наибольшие значения горизонтального и вертикального составляющих давления утка на основу, Tm – моделируемый интервал, времени, принятый равным единице отсчета времени. Модуль упругости нити основы $E(x)$ в модели был задан периодически меняющимся в соответствии с формулой

$$E(x) = Em \cdot \left(1 + A \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot x}{d} \right) \right), \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.10)$$

Здесь Em – среднее значение модуля упругости для материала нити, A – относительная амплитуда вариаций модуля упругости, x – координата вдоль основы в плоскости растягиваемого образца ткани, d – длина элемента ткани в том же направлении, L – протяженность моделируемого участка нити основы вдоль образца ткани. В модели все величины описываются в Эйлеровых координатах. Коэффициент Пуассона был принят постоянным и равным $\mu = 0,24$.

Целью компьютерных экспериментов с моделью была оценка влияния параметров модели A , Fch и Fcv , отражающих структурные особенности основной нити в тканом полотне, на особенности деформации этой нити при растяжении образца ткани с постоянной скоростью удлинения до величины 10% от первоначальной длины L . Для отображения результатов моделирования в качестве контролируемых величин выбраны компоненты тензора относительной деформации. Относительная, безразмерная величина этих компонентов наиболее удобна для получения обобщенных выводов. Разные стороны контура нити находятся в разных условиях деформации. Поэтому значения компонентов тензора приводятся для каждой стороны контура нити отдельно. Для верхней на рисунке стороны контура нормальный компонент тензора вдоль оси X обозначен eXX_1 , а для нижней стороны – eXX_2 .

В качестве базового варианта выбраны условия моделирования, при которых $A = 0$, $Fch = 0$ и $Fcv = 0$. Эти условия означают, что нить основы представляет собой механически однородный материал, не взаимодействует с

уточными нитями и подвергается растягивающему воздействию. Один конец нити, на рисунке – левый, находится в неподвижном зажиме разрывной машины, а второй конец – в подвижном зажиме и перемещается с постоянной скоростью до 10% удлинения образца. Среднее значение модуля упругости принято равным $E = 2 \cdot 10^9$ Па, что соответствует нейлону 6. На рис. 4.21 показаны распределения величины e_{XX_1} и e_{XX_2} вдоль оси X образца. Величины относительной деформации на противоположных сторонах нити деформируются в противофазе. Отрицательные деформации сжатия по абсолютной величине меньше положительных деформаций растяжения. Наблюдается слабое нарастание амплитуды изменения деформации от неподвижного зажима к подвижному зажиму и несимметричность кривых. Два последних эффекта связаны малым числом моделируемых полуволокн нити. Поэтому результат зависит от того, с какой из полуволокн – нижней или верхней – начинается участок на концах нити. На модели с большим числом полуволокн, свыше десяти, обе кривые зеркально симметричны. В моделируемом отрезке было всего по пять таких полуволокн, что соответствует пяти последовательным элементам ткани. Эта небольшая длина моделируемого отрезка достаточна для получения оценочных выводов при небольших расходах компьютерного времени на расчет одного варианта модели.

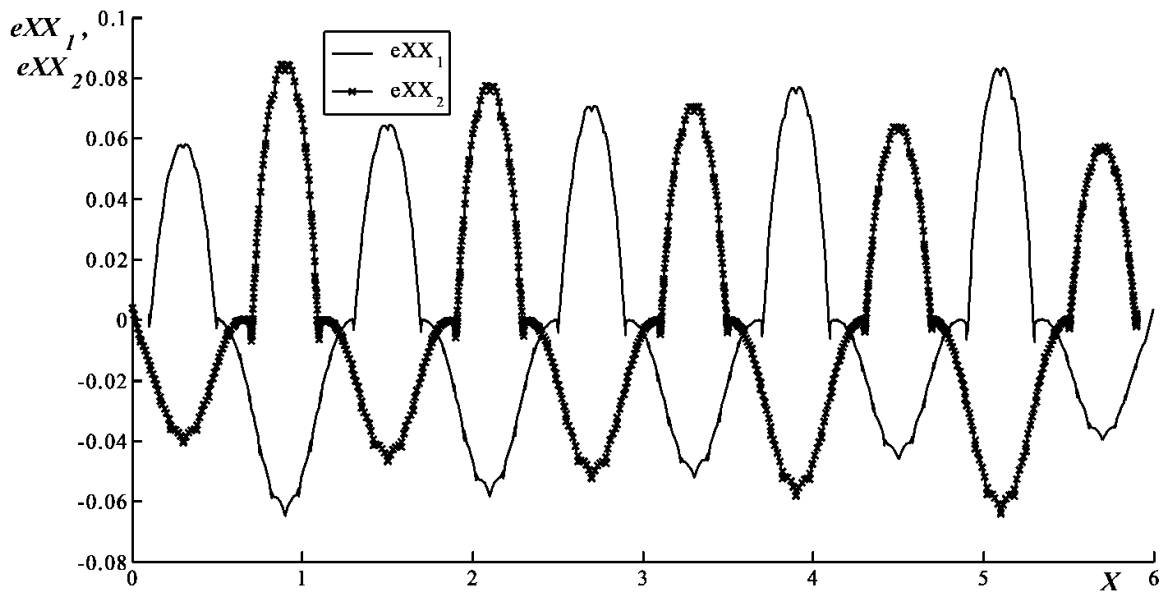


Рисунок 4.21 - Распределение компонента тензора деформации по верхнему eXX_1 и нижнему eXX_2 контуру нити при $E = \text{const}$, $A = 0$ и $F_{cv} = F_{ch} = 0$

На рис. 4.22 приведены распределения eXX_1 и eXX_2 , полученные в результате моделирования варианта значений параметров $A = 0,8$ и $F_{ch} = F_{cv} = 0$. Вариации модуля упругости в диапазоне 80 % от среднего уровня с периодичностью элементов ткани привело к асимметрии распределения деформации в пределах одного элемента ткани и изменению формы самих волнообразных изменений относительной деформации.

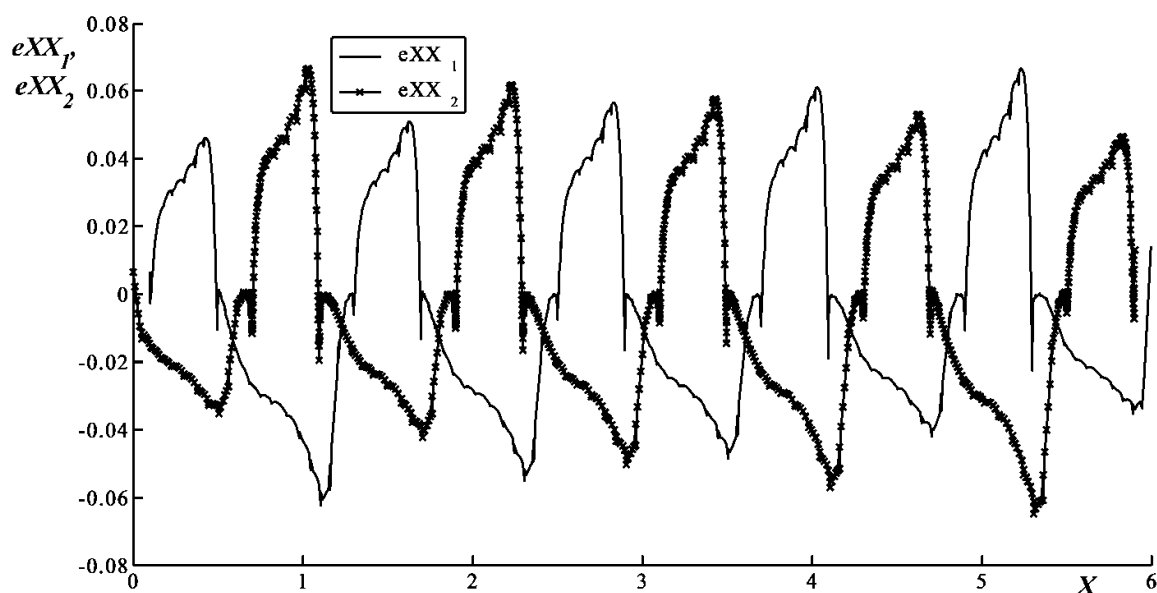


Рисунок 4.22 - Распределение компонента тензора деформации по верхнему eXX_1 и нижнему eXX_2 контуру нити при $A = 0,8$ и $F_{cv} = F_{ch} = 0$

На рис. 4.23 приведены распределения eXX_1 и eXX_2 , полученные в результате моделирования варианта значений параметров $A = 0$ и $F_{ch} = 1e7$ Па и $F_{cv} = 1e6$ Па. Взаимодействие с нитями утка, препятствующими деформации основы, привело к перераспределению деформации в сторону участков нити ближе к подвижному зажиму. На рис. 4.24 приведены распределения eXX_1 и eXX_2 для варианта $A = 0,8$ и $F_{ch} = 1e7$ Па и $F_{cv} = 1e6$ Па. Распределения деформации eXX_1 и eXX_2 для приведенных вариантов наглядно показывают роль вариаций модуля упругости вследствие структурных изменений нити основы при формировании элементов ткани и взаимодействия с нитями утка.

Несмотря на периодичность вариаций модуля упругости и приложенных к основе сил давления от уточных нитей периодичность распределения деформации нарушена, а форма распределения приобрела еще более вычурную форму с большим числом пиковых значений, как при растяжении, так и сжатии.

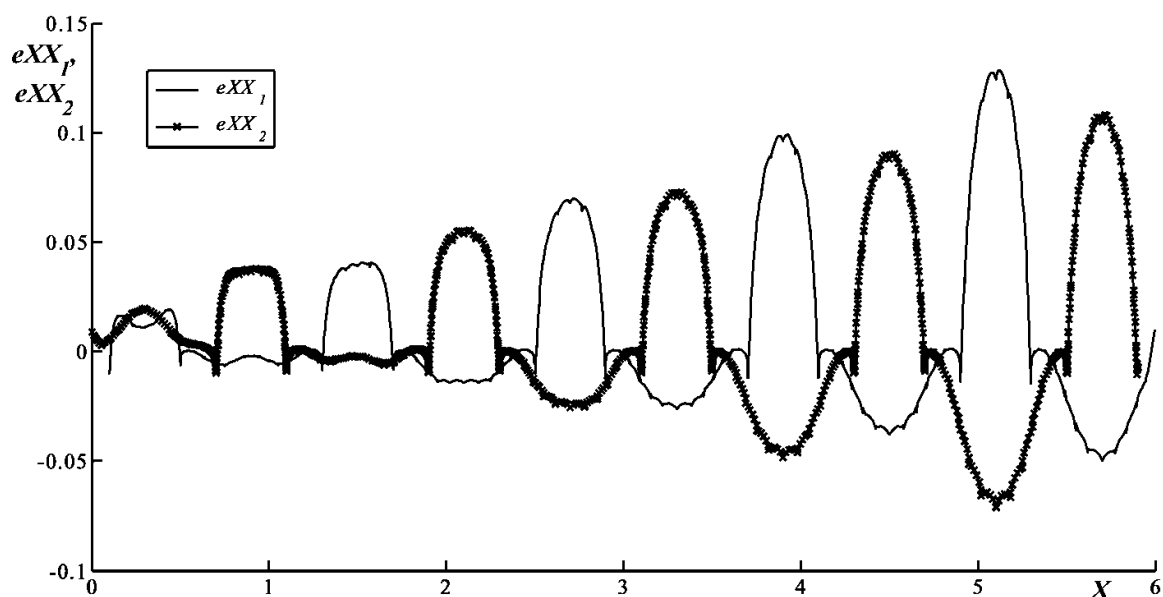


Рисунок 4.23 - Распределение компонента тензора деформации по верхнему e_{XX_1} и нижнему e_{XX_2} контуру нити при $A = 0$ и $F_{cv} = 1e7$ Па, $F_{ch} = 1e6$ Па

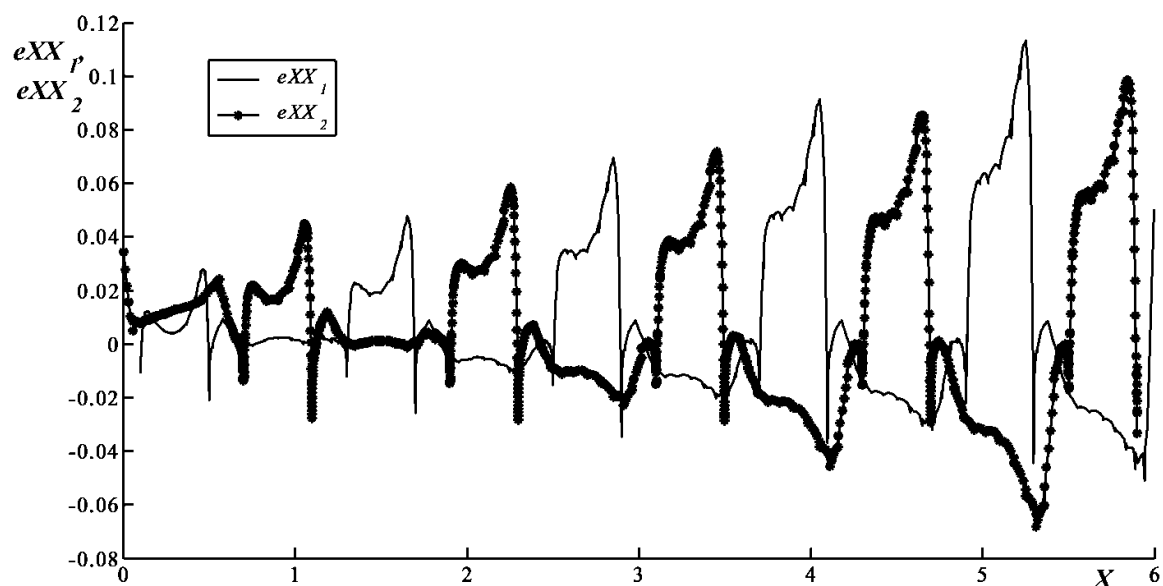


Рисунок 4.24 - Распределение компонента тензора деформации по верхнему e_{XX_1} и нижнему e_{XX_2} контуру нити при $A = 0,8$ и $F_{cv} = 1e7$ Па, $F_{ch} = 1e6$ Па

Приведенные результаты имеют значение при анализе прочности тканых полотен, оценке роли структурных изменений в нитях в процессе формирования элементов ткани, изучении механики развития напряжений, деформаций и динамики разрыва и разрушения в тканях и композитных материалах.

4.9 Особенности и методы моделирования деформации и разрыва тканых полотен

Тканые полотна образованы чередующимися перекрытиями двух взаимно перпендикулярных систем нитей: основных и уточных. В последние десятилетия разработаны структуры и технологии производства тканей из более, чем двух систем нитей, ориентированными относительно друг друга под углами, отличными от прямого, а также многослойных тканей. Компьютерное управление ткацкой машиной позволяет производить эти полотна по рентабельным технологиям. Уникальность ткацких полотен по многим характеристикам и широчайший ассортимент при однотипных и дешевых технологиях производства в сочетании с применением современных синтетических нитей и пряжи привел к массовому переходу в промышленности от дерева, металла, пластмасс, других конструкционных и строительных материалов к техническим тканям и композитам на их основе [191].

Существование тканого полотна как единого целого и его поведение при деформации обеспечивается двумя факторами: равновесием участков нити вследствие геометрической формы переплетения нитей и силами механического трения между двумя системами нитей, возникающих при их перекрытии, и натяжения нитей в момент формирования полотна [178, 188]. Это трение является существенно нелинейным видом взаимодействия и описывается обобщенным законом Кулона – Амонтона [18, 192].

Геометрические и механические параметры перекрытия нитей: площадь перекрытия, углы изгиба нитей, натяжение и нормальное давление их друг на друга, коэффициенты сцепления и трения, - варьируют случайным образом. Количество перекрытий в образце ткани N_{Π} равно произведению числа нитей основы N_0 и утка N_y . Для однослойных тканей средней плотности квадратный дециметр образца содержит $\sim 10^4 - 10^5$ перекрытий. В соответствии с законом больших чисел теории вероятностей можно говорить о возможности статистического усреднения вариаций.

При деформации образца ткани нити, воспринимающие нагрузку, пытаются распрямиться, чему препятствует другая система нитей. В результате энергия деформации затрачивается не только и не столько на распрямление нитей, сколько на их расплющивание, меняющее перечисленные выше параметры участков перекрытия [193]. Кроме того, происходят удлинения нитей на участках между перекрытиями, на которые и распределяется приложенная к образцу деформация. Если в качестве основы и/или утка в ткани использована пряжа, которая сама представляет собой сложную структуру из волокон, то при малых удлинениях нити растягиваются практически по закону Гука. Однако одноосное сжатие у них либо вообще отсутствует, либо возможно только при очень малых деформациях.

При больших деформациях возможно значительное ослабление или даже разрыв нити на отдельном участке между областями перекрытия. В отличие от так называемых сплошных сред это не ведет к развитию процесса разрыва нитей в данном участке ткани. Развитие разрушения образца зависит от количества таких участков и их распределения по площади ткани.

Перечисленные особенности поведения ткани под действием нагрузки ставят задачи, требующие решения:

1) оценка возможности статистического усреднения получаемых при моделировании различных числовых характеристик как деформации, так и разрыва ткани, и упрощение за счет этого применяемых моделей;

2) оценка возможности применения методов механики деформируемых сплошных сред к описанию деформации и разрыва тканых полотен и выбор наиболее подходящих моделей;

3) разработка в необходимых случаях оригинальных методов моделирования и моделей образцов тканей, позволяющих учитывать описанную выше специфику поведения тканых структур под действием прилагаемых нагрузок. Реализация этой программы привела к исследованию моделей разных классов. Результаты этих исследований можно резюмировать следующим образом.

Одна из моделей основана на механической аналогии. Предполагалось, что тканое полотно представляет собой структуру из параллельно и/или последовательно соединенных звеньев, включающих линейный упругий элемент $\sigma = E\varepsilon$ и элемент, описываемый обобщенным законом «сухого» трения Кулона – Амонтона $\sigma = (q_0 + \mu N) \text{sign}(\varepsilon')$. Здесь: σ – напряжение, q_0 – удельная сила сцепления, μ – коэффициент трения, N – удельная сила нормального давления, ε' – скорость относительной деформации, причем N и μ зависели от деформации. Значения параметров E , q_0 , μ и N содержат случайные вариации с заданными средними и коэффициентами вариации.

Такая достаточно простая модель позволила получить эффект гистерезиса при имитации циклических нагрузок, несимметричную реакцию на нагрузки удлинения и сжатия и доказать, что статистический разброс параметров нивелирует нелинейную природу «сухого» трения. Это обосновывает и позволяет в целом для усредненного описания материала использовать более «гладкую» и линейную по деформации и скорости деформации зависимость между механическим напряжением $\sigma = E\varepsilon + b \varepsilon'$ или полиномиальную зависимость между напряжением, деформацией и скоростью деформации.

Второй класс моделей рассматривает поведение отдельной нити, например, основы, под действием растягивающих нагрузок. При этом нить изогнута волнообразно. К ее участкам приложены поля сил трения, препятствующие распрямлению нити и ее растяжению. Поля сил трения описывались формулой Эйлера для нити, лежащей на криволинейной поверхности $dT = T_0 \exp(-\mu\alpha)$. Здесь dT – убыль натяжения нити на одном участке перекрытия; T_0 – натяжение в начале этого участка; α – угол охвата нити на участке перекрытия. Установлено, что последовательность участков перекрытия «гасит» силу натяжения по экспоненте и препятствует ее распространению вдоль нити от места приложения натяжения. При этом в силу малой жесткости нити на изгиб можно вместо изогнутой нити рассматривать линейную нить, скорректировав известным образом коэффициент трения. Результаты и выводы подтверждены как известными данными натуральных

экспериментов, так и моделированием с применением конечно-элементной модели.

Третий класс моделей основан на использовании конечно-элементных схем для двумерных геометрических моделей. Были построены модели в виде прямоугольной сетки и в виде прямоугольного образца двумерной сплошной среды с меняющимися вдоль каждой системы нитей по периодическому закону (в соответствии с раппортом переплетения) модулями упругости, коэффициентами Пуассона и демпфирования. Они позволили установить, что распространение деформации удлинения основы передается на нити утка в значительно более ослабленном виде, чем это должно быть в соответствии с коэффициентом Пуассона согласно механике деформируемой сплошной среды. Вместе с тем, наличие уточных нитей значительно упрочняет ткань по сравнению с системой одиночных основных нитей. Вывод подтверждает априорные представления о принципиальных отличиях механизма деформации ткани по сравнению с моделью сплошной среды и усредненными параметрами без учета структуры и строения полотна.

Четвертый класс моделей основан на имитации поведения «сетки» двух взаимодействующих систем нитей. Прочностные характеристики нитей варьируют случайным образом как вдоль каждой нити обеих систем, так и между нитями. Модель позволила рассматривать не только малые, но и «большие» деформации, могущие вызвать разрыв нити на отдельном участке между областями перекрытия, т.е. исследовать динамику развития разрывов в тканых полотнах. Модель производит динамическое перераспределение нагрузки на оставшиеся участки нитей и при нарастании нагрузки находит новые «слабые звенья» и имитирует их разрыв. В итоге имитируется динамика развития и распространения больших плоских, двумерных деформаций, возникновения разрывов нитей и разрушения образца тканого полотна.

Следует подчеркнуть, что механизм разрыва текстильных тканей принципиально отличается от механизма развития разрушения деформируемых сплошных сред, таких, как металлы или полимерные материалы. Специфика

структуры ткани как системы геометрически и механически, через трение, связанных нитей, приводит к специфике развития разрывов вдоль одной из систем нитей. Созданный «модельный» задел открывает возможности более глубокого, детального и всестороннего исследования этой специфики механизма деформации тканых полотен и их разрыва.

Выводы по четвертой главе

1. Получены модельные кривые «удлинение – сопротивление», описывающие динамику растяжения и разрыва комплексных нитей. Для моделирования разработан алгоритм и его программная реализация, имитирующая процесс растяжения вплоть до полного разрыва нити. Модель учитывает нелинейный закон упругой деформации, статистический разброс разрывного удлинения и разрывной нагрузки и корреляцию между ними для элементарных нитей. Установлено, что этот статистический разброс существенно влияет на динамику растяжения и разрыва комплексной нити, снижая ее разрывную нагрузку и увеличивая ее разрывное удлинение. Корреляция между разрывным удлинением и нагрузкой элементарных нитей не существенно отражается на динамике растяжения и разрыва.

2. Исследовано влияние структурных изменений основных нитей и воздействия на них уточных нитей на деформацию в пределах нескольких элементов ткани. Установлено, что периодические вариации структурных свойств нити основы и силовых воздействий со стороны уточных нитей приводят к неперiodическим, нарастающим деформациям. Вариабельность деформации основы весьма велика, и существуют участки нити с значительным превышением среднего уровня деформации, что необходимо учитывать при проектировании полотен и прогнозировании их прочностных свойств.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложен комплексный подход к исследованию процессов старения свойств текстильных материалов, проявляющихся в износе, истирании и разрушении этих материалов в процессе эксплуатации, основанный на применении методов компьютерного статистического моделирования и методе статистической имитации динамики процесса.

2. Предложены алгоритмы моделирования, основанные на воспроизведении физических представлений о процессах старения, установлена адекватность модели, построенной на основе этих алгоритмов, с имеющимися данными натуральных экспериментов.

3. Предложен ряд упрощенных математических моделей, позволяющих исследовать отдельные аспекты описанных процессов. Получена модель динамики изменения массы волокнистого материала на разных участках полотна с учетом статистического разброса и структурной неоднородности этих материалов. Компьютерные модели позволили впервые выявить роль неоднородности материала и случайных вариаций в свойствах нитей, образующих материал, на скорость истирания.

4. Установлена принципиально важная роль случайного разброса свойств волокон в волокнистых материалах на эффекты трения, которое приводит к нивелированию законов сухого трения в волокнистой массе и приближает эти законы к законам вязкого трения.

5. Впервые разработана модель разрушения разрыва тканых полотен под действием нагрузки и показано, что механизм разрыва принципиально отличается от механизмов разрушения сплошных сред. Выявлена важная роль статистического разброса в свойствах нитей и волокон на возникновение и развитие областей разрушения.

6. Построена модель старения одномерных волокнистых материалов (нитей, пряжи, волокон) вследствие воздействия на них внешних факторов светопогоды, излучений, химических воздействий и других, приводящее к

возникновению локальных центров повреждения, которые в дальнейшем усиливаются и распространяются по длине материала этих нитей.

7. Все разработанные модели включают в себя большое число факторов, которые практически невозможно учесть в натуральных и эмпирических исследованиях. Модели дают преимущество в исследовании этих процессов, поскольку позволяют наблюдать все процессы старения в динамике, что весьма затруднительно делать в натуральных экспериментах.

8. Исследована робастность моделей к ряду неопределенных факторов и установлена в ряде случаев незначимость этих факторов на характер процессов.

9. Впервые применен метод компьютерной статистической имитации, который позволил детально моделировать этот процесс на уровне, недостижимом другими способами исследования, и который позволил получать детальную информацию о динамике процесса с учетом статистического разброса характеристик.

10. Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами некоторых натуральных исследований процессов истирания и старения волокнистых материалов подтвердил адекватность этих моделей и является основанием для применения этих моделей для прогнозирования влияния различных факторов на процесс старения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (исходные текстильные материалы) [Текст] : Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев. - М.: Легпромиздат, 1985. - 216 с.
2. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение. Часть 1 [Текст] / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев. – М.: Ростехиздат, 1961. – 304 с.
3. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение. Часть 2 [Текст] / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев – М.: Легкая индустрия 1964. – 380 с.
4. Шустов, Ю. С. Основы текстильного материаловедения. Учебное пособие [Текст] / Ю. С. Шустов. - М: МГТУ им. А. Н. Косыгина. 2007. - 302 с.
5. Киселев, В. И. Развитие теории поверхностных явлений и разработка методов оценки их взаимосвязи со свойствами и прогнозирование качества стеклянных нитей [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.01 / Киселев Виктор Иванович; [Место защиты: Моск. текст. ин-т]. – М., 1991. - 472 с.
6. Соловьев, А. Н. Оценка качества и стандартизация текстильных материалов [Текст] / А. Н. Соловьев, С. М. Кирюхин. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 248 с.
7. Соловьев, А. Н. Оценка и прогнозирование качества текстильных материалов [Текст] / А. Н. Соловьев, С. М. Кирюхин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 215 с.
8. Перепелкин, К. Е. Структура и свойства волокон [Текст] / К. Е. Перепелкин М.: Химия, 1985. - 208 с.
9. Никитиных, Е. И. Разработка теоретических основ и методики прогнозирования характеристик старения текстильных материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Никитиных Елена Игоревна [Место защиты: Моск. гос. текстильная академия]. - М, 1993. - 178 с.
10. Севостьянов, П. А. Исследование на ПЭВМ статистических свойств алгоритмов прогнозирования свойств текстильных материалов [Текст] / П. А.

Севостьянов, В. Г. Митихин, Е. И. Никитиных // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1992. - № 3. – С. 66-69.

11. Митихин, В. Г. Анализ результатов машинных экспериментов с прогнозирующей моделью в задачах старения текстильных материалов [Текст] / В. Г. Митихин, Е. И. Никитиных, П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1992. - № 1.

12. Севостьянов, П. А. Прогнозирование характеристик и повышение эффективности исследований технологических систем прядильного производства [Текст] : дис. ... доктора техн. наук / Севостьянов Петр Алексеевич. - М., 1985. – 437 с.

13. Севостьянов, П. А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов [Текст] / П. А. Севостьянов. – М.: Тисо Принт, 2013. - 253 с. - ISBN 978-5-9904852-1-1.

14. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, П. Е. Дасюк. – М.: Тисо Принт, 2014. - 263 с. - ISBN 978-5-9904852-2-8.

15. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование технологических систем и продуктов прядения [Текст] / П. А. Севостьянов. – М.: Информ–Знание, 2006. – 448 с. - ISBN 5-8032-00-98-0.

16. Севостьянов П. А., Статистическая имитация истирания тканей методами компьютерного моделирования [Текст] / П. А. Севостьянов, В. Ю. Никитюк, Д. А. Забродин, В. И. Лебедева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011. - № 2. – С. 93-96.

17. Никитюк, В. Ю. Компьютерное моделирование динамики истирания текстильных полотен [Текст] / В. Ю. Никитюк, В. И. Лебедева, П. А. Севостьянов // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности). - 2011. - № 5.

18. Никитюк, В. Ю. Исследование динамики истирания и сравнение методик приборов ИТ-3М и Мартиндаля [Текст] / В. Ю. Никитюк, П. А.

Севостьянов, В. И. Лебедева // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности). - 2011. - № 5.

19. Севостьянов, П. А. Моделирование изменения функциональности специальных тканей с использованием теории надежности [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 8. – С. 96-99.

20. Севостьянов, П. А. Моделирование потери свойств текстильных материалов как задача теории надежности [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин // Химические волокна. -2009. - № 2. - С. 102–104.

21. Севостьянов, П. А. Модель потери функциональности технических материалов при их износе [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности). - 2011. - № 5.

22. Севостьянов, П. А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 1981. - № 3. – С. 9-13.

23. Севостьянов, П. А. Computer modeling of strand elongation [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности.- 2009. - № 3С. – С. 95 – 99

24. Севостьянов, П. А. Статистическое компьютерное моделирование одноосного растяжения тканого полотна методом конечных элементов [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, П. Е. Дасюк, Е. А. Баландин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности.- 2014. - № 6. - С. 102-105.

25. Севостьянов, П. А. Оценка воспроизводимости методов определения истираемости тканей специального назначения [Текст] / П. А. Севостьянов, В. Ю. Никитюк, Д. А. Забродин, В. И. Лебедева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011. - № 3, С. 26 – 29.

26. Севостьянов, П. А. Компьютерные технологии в анализе и проектировании геометрических и механических свойств волокнистых

материалов [Текст] / П. А. Севостьянов, В. И. Лебедева, Т. В. Серякова // Вестник МГТУ им. А.Н. Косыгина. – 2010. С. 95 – 99.

27. Севостьянов, П. А. Статистическая модель деформации волокнистого материала с кулоновским трением [Текст] / П. А. Севостьянов, Ю. С. Яковлева // Сборник научных трудов аспирантов – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. – 2008. - С. 73 - 78.

28. Севостьянов, П.А. Исследование роли кулоновского трения в некоторых волокнистых продуктах методами статистического компьютерного моделирования [Текст] / П. А. Севостьянов, А. В. Радов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2008. - № 1. - С. 77-83.

29. Севостьянов П.А. Модели сечений комбинированных нитей и пряжи [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, И. С. Горячая, В. И. Лебедева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011. - № 7. - С. 65 – 69.

30. Севостьянов П.А. Обобщенная перколяционная модель износа двумерных полотен из волокнистых материалов [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011. - № 4. – С. 151-153.

31. Ломов, С. В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.01 / Ломов Степан Владимирович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна]. – СПб.: 1995. – 486 с.

32. Макаров, А. Г. Прогнозирование деформационных процессов в текстильных материалах [Текст] / А. Г. Макаров. – СПб.: Изд-во СПГУТД: 2002 - 220°с.

33. Макаров, А. Г. Компьютерное моделирование вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного строения [Текст] / А. Г. Макаров, Н. Н. Труевцев, Л. Н. Петрова // Вестник СПГУТД. – 2004. - № 10. - С. 39 - 45.

34. Демидов, А. В. Компьютерное моделирование деформационных процессов текстильных материалов [Текст] / А. В. Демидов, А. Г. Макаров, А. М. Сталевич // Физико-химия полимеров. – 2005. - № 11. - С. 161-166.

35. Демидов, А. В. Моделирование сложных деформационно-восстановительных процессов полимерных материалов [Текст] / А. В. Демидов, А. Г. Макаров, А. М. Сталевич // Физико-химия полимеров. – 2006. - № 12. - С. 131-134.

36. Демидов, А. В. Моделирование сложных деформационных процессов материалов текстильной промышленности [Текст] / А. В. Демидов, А. Г. Макаров, А. М. Сталевич // Текстильная промышленность. – 2006. № 8. - С.30 - 32.

37. Демидов А. В. Вариант математического моделирования деформационных процессов синтетических нитей [Текст] / А. В. Демидов, А. Г. Макаров, А. М. Сталевич // Химические волокна. – 2007. - № 4. - С. 55-58.

38. Примаченко, Б. М. Разработка методов прогнозирования структуры и эксплуатационных свойств тканей бытового и технического назначения на основе технологических параметров их производства [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.02 / Примаченко Борис Макарович; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна]. – СПб.: 2009. – 406 с.

39. Коробов, Н. А. Развитие теории и практики построения методов измерения характеристик строения текстильных материалов с использованием современных информационных технологий [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.01 / Коробов Николай Анатольевич; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина]. - Иваново, 2007. - 364 с.

40. Нуркевич, С. А. Моделирование износа тканых полотен специального назначения под воздействием ультрафиолета [Текст] / С. А. Нуркевич, А. Ю. Матрохин, А. В. Умников // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК – 2017): сб. материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов (с междунар. участием). Ч. 2. – Иваново: ИВГПУ, 2017. – 302 с. – С. 319-321.

41. Киселев, М. В. Моделирование строения льняного чесаного волокна и процесса дробления его комплексов [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.01 / Киселев Михаил Владимирович; [Место защиты: Костромской государственной технологической университет]. - Кострома, 2009. - 250 с.

42. Киселев, А. М. Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.01 / Киселев Андрей Михайлович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»]. - Казань, 2019. - 391 с.

43. Голубков, Д. В. Моделирование текстильных материалов с использованием численных методов анализа механики нелинейных систем [Текст] / Д. В. Голубков // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 4С.

44. Ломов С. В. Wisetex – виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойств текстильных композитов [Текст] / С. В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. – 2006. - № 13.

45. Коржева, И. А. Исследование влияния деформации сжатия на толщину армирующих трикотажных полотен [Текст] / И. А. Коржева, И. Л. Верняева, Р. Б. Нелюбова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 4С.

46. Чебунькина, Т. А. Имитационное моделирование расположения металлических частиц на поверхности тканей [Текст] / Т. А. Чебунькина, И. В. Землякова, В. А. Гусев, М. С. Буров // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 5. – С. 8-10.

47. Киселев, А. М. Математическое моделирование процесса сжатия волокнистых материалов в массе [Текст] / А. М. Киселев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 5. – С. 14-17.

48. Матрохин, А. Ю. Моделирование поперечного сечения хлопковых волокон различного уровня зрелости [Текст] / А. Ю. Матрохин, О. А. Шаломин,

А. В. Круглов, Б. Н. Гусев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 6. – С. 10-12.

49. Киселев, А. М. Прогнозирование разрывной нагрузки нетканых материалов на основе математического моделирования их геометрической структуры [Текст] / А. М. Киселев, А. П. Соркин, М. В. Киселев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011. - № 5. – С. 14-17.

50. Шаломин О. А. Проектирование номинальных значений показателей качества текстильных изделий с использованием нейросетевого анализа [Текст] / О. А. Шаломин, А. Ю. Матрохин, А. С. Шубин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 3. – С. 18-25.

51. Переборова, Н. В. Разработка критериев и методов качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств материалов текстильной и легкой промышленности [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Переборова Нина Викторовна; [Место защиты: С.-Петерб.гос. ун-т технологии и дизайна]. - СПб, 2015. - 190 с.

52. Виноградова, Н. А. Разработка методов оценки качества тканей медицинского назначения, предназначенных для сотрудников поликлиник [Текст] дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Виноградова Наталья Алексеевна; [Место защиты: Рос. гос. ун-т им. А.Н. Косыгина]. – М., 2019. - 230 с.

53. Рымкевич, О. В. Методы исследования, прогнозирования и моделирования эксплуатационных свойств термоусаживаемых текстильных материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Рымкевич Ольга Васильевна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна]. - СПб, 2013. – 222 с.

54. Васильева, Е. К. Системное исследование деформационно-релаксационных характеристик полиамидных тканей для парашютостроения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Васильева Елизавета Константиновна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. ун-т промышленных технологий и дизайна]. - СПб, 2016. - 178 с.

55. Костомаров, С. А. Разработка методов прогнозирования физико-механических свойств тканей для спецодежды от воздействий химических реактивов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Костомаров Сергей Александрович; [Место защиты: Рос. гос. ун-т им. А.Н. Косыгина]. – М., 2019. – 231 с.
56. Кудринский, С. В. Разработка методов оценки показателей безопасности и качества тканей для специальной одежды работников нефтяных комплексов в условиях морских шельфов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Кудринский Сергей Владимирович; [Место защиты: Рос. гос. ун-т им. А.Н. Косыгина]. – М., 2018. – 165 с.
57. Томилова, М. В. Разработка методов оценки и прогнозирования свойств плетеных полотен из текстильных материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Томилова Маргарита Викторовна; [Место защиты: Костром. гос. ун-т им. Н.А. Некрасова]. – Кострома, 2018. – 152 с.
58. Бусленко, Н. П. Метод статистического моделирования [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Статистика, 1970. – 109 с.
59. Kleijnen, J. Statistical techniques in simulation, volumes I and II. Marcel Dekker Inc., New York, 1974- 1975, 775 p.
60. Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании [Текст] / Дж. Клейнен / Пер. англ. Ю. П. Адлера, К. Д. Аргуновой, В. Н. Варыгина, А. М. Талалая. Вып.1. – М.: Статистика, 1978. – 221 с.; Вып.2. – М.: Статистика, 1978. – 336 с.
61. Рыжиков, Ю. И. Имитационное моделирование. Теория и технологии [Текст] / Ю. И. Рыжиков. – СПб: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2004. — 384 с.
62. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем. [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
63. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : Учеб. для вузов — 3-е изд., перераб. и доп. / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — М.: Высшая школа, 2001. — 343 с.

64. Нейлор, Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем [Текст] / Т. Нейлор. – М.: Мир, 1975. – 500 с.
65. Полляк, Ю. Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах [Текст] / Ю. Г. Полляк. – М.: Сов.Радио, 1971. – 400 с.
66. Шаракшанэ, А. С. Сложные системы [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов, В. А. Ивницкий. – М.: Высш. школа, 1977. – 247 с.
67. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – Искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
68. Кирюхин, С. М. Текстильное материаловедение [Текст] / С. М. Кирюхин, Ю. С. Шустов. – М.: КолосС, 2010. – 360 с.
69. Кукин, Г. Н. Лабораторный практикум по текстильному материаловедению [Текст] : Учебное пособие для студентов, изучающих текстильное материаловедение / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, Ф. Х. Садыкова и др. - М.: Легкая индустрия, 1974. - 390 с.
70. Кукин Г. Н. Текстильное материаловедение. Текстильные полотна и изделия [Текст] : Учебник для вузов. – 2–е изд., перераб. и доп. / Г. Н. Кукин, А.°Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – М.: Легпромбытиздат, 1992. – 272 с.
71. Бартенев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенев. - М. : Химия, 1984. - 279 с.
72. Бартенев, Г. М. Трение и износ полимеров [Текст] / Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев. - Ленинград : Химия. Ленингр. отд-ние, 1972. - 240 с.
73. Зеленев, Ю. В. Релаксационные явления в полимерах [Текст] : автореферат дис. ... доктора физико-математических наук : (054) / Зеленев Юрий Владимирович; [Место защиты: Моск. обл. пед. ин-т им. Н. К. Крупской]. – М., 1971. - 57 с.
74. Прогнозирование физических свойств текстильных полимерных материалов [Текст] : Межвуз. сб. науч. тр. / Моск. текстил. ин-т им. А. Н. Косыгина; [Редкол.: Ю. В. Зеленев (гл. ред.) и др.]. - М.: МТИ, 1982. - 96 с.

75. Зеленов, Ю.В. О прогнозировании физических свойств полимеров по данным изучения их электрических флуктуаций в широком интервале температур [Текст] / Ю. В. Зеленов, В. А. Ивановский // Молекулярные соединения. – 1987. - № 4. – С. 812-817.

76. Жихарев, А. П. Влияние факторов окружающей среды на материалы легкой промышленности [Текст] : монография / А. П. Жихарев [и др.] ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Казанский гос. технологический ун-т». - Казань: КГТУ, 2011. - 231 с. : ил., табл.; ISBN 978-5-7882-1071-1.

77. Виноградов, Б. А. Действие лазерного излучения на полимерные материалы: научные основы и прикладные задачи [Текст] : в 2 кн. / Б. А. Виноградов, К. Е. Перепелкин, Г. П. Мещерякова ; Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана, Санкт-Петербургский гос. ун-т технологии и дизайна, Амурский гос. ун-т. – Спб: Наука, 2007. Кн. 1: Полимерные материалы. : Науч. основы лазерного воздействия на полимерные диэлектрики. - 2006. – 378 с.; Кн. 2: н. 2. Полимерные материалы : практическое применение лазерных методов в изучении и обработке. - 2007. - 442 с.

78. Андреева, И. В. Изменение свойств высокопрочных, высокомодульных параарамидных нитей при термическом старении [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Андреева Ирина Владимировна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна]. - СПб, 2005. - 159 с.

79. Федорова, А. Ф. Технология химической чистки [Текст] : учеб. пособие / А. Ф. Федорова ; Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования, М-во образования и науки Рос. Федерации, «Моск. гос. ун-т сервиса» (ГОУВПО «МГУС»). - М.: Танграм, 2005. - 559 с.

80. Перепелкин, К. Е. Дефектность, гетерогенность микроструктуры химических нитей и их влияние на свойства [Текст] / К. Е. Перепелкин, А. Т. Серков, Т. М. Иванцова и др. - М. НИИТЭхим, 1989. – 43 с.

81. Журков, С. Н. Изучение механизма разрушения полимеров методом э.п.р. [Текст] / С. Н. Журков, А. Я. Савостин, Э. Е. Томашевский // Докл. АН СССР. – 1964. – Т. 159. - № 2. – С. 303–305

82. Национальные стандарты [Текст] : указатель / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. - Издание официальное. – М: Стандартиформ, 1999-2019, Т. 1 (по состоянию на 1 января 2019 г.). - 2019. - 855 с.

83. Shustov, Y. S. Comparative assessment of quality of para-aramide rusar fibers after natural and artificial light and weather exposure [Текст] / Y. S. Shustov, A. V. Kurdenkova // Textile industry technology. – 2009. - № 3С. – С. 9-11.

84. Никитиных, Е. И. Разработка теоретических основ и методики прогнозирования характеристик старения текстильных материалов [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.19.01 / МГТА. – М., 1993. - 18 с.

85. ГОСТ 18976-73. Ткани текстильные. Метод определения стойкости к истиранию [Текст]. - М.: Издательство стандартов, 1985. – 5 с.

86. ГОСТ 9913–90. Материалы текстильные. Методы определения стойкости к истиранию [Текст] . – М: Издательство стандартов, 1999. – 11 с.

87. Цыбикдоржиева, А. В. Анализ исследования стойкости основных нитей к истирающим воздействиям [Текст] / А. В. Цыбикдоржиева, С. С. Юхин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 2С. – С. 13-15.

88. Малявко, Е. Н. Изменение механических свойств мебельных тканей в процессе их истирания [Текст] / Е. Н. Малявко, А. В. Курденкова, Ю. С. Шустов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2012. - № 1. – С. 12-14.

89. Федорова, Е. Е. Исследование многоцикловых характеристик к истиранию арамидных нитей [Текст] / Е. Е. Федорова, П. Е. Сафонов, О. Н. Фетисова, С. С. Юхин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2012. - № 1. – С. 19-21.

90. Воронова, Л. В. Анализ методов для определения трения и цепкости текстильных полотен [Текст] / Л. В. Воронова, Н. А. Смирнова, А. Н. Флегонтов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2012. - № 4. – С. 45-49.
91. Лисиенкова, Л. Н. Исследование деформационных свойств материалов для одежды методом циклического сжатия [Текст] / Л. Н. Лисиенкова, Е. А. Кирсанова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - №4. – с. 15-18.
92. Щербаков, В. П. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов [Текст] / В. П. Щербаков, Н. С. Скуланова. – М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2008. — 268 с.
93. Чагина, Л. Л. Исследование и учет деформационных свойств при проектировании одежды из льняных трикотажных полотен [Текст] / Л. Л. Чагина, Н. А. Смирнова, А. В. Вершинина // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 5. – С. 10-14.
94. Лапшин, В. В. Прогнозирование способности льняных тканей к изменению угла между нитями основы и утка по характеристикам их строения [Текст] / В. В. Лапшин, Н. А. Смирнова, К. В. Мартышенко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011. - № 5. – С. 11-13.
95. Егоров, Н. В. Новый метод расчета жесткости нити при изгибе [Текст] / Н. В. Егоров, В. П. Щербаков // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 5. – С. 23-27.
96. Некрашевич, А. Б. Изменение упругорелаксационных характеристик нити в зависимости от влажности [Текст] / А. Б. Некрашевич, В. Г. Тиранов, А. В. Постников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2013. - № 1. – С. 22-24.
97. Трещалин, Ю. М. Анализ внутренних напряжений в волокнах, возникающих в процессе полимеризации связующего при изготовлении композиционных материалов на основе нетканых полотен [Текст] / Ю. М.

Трещалин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 4. – С. 37-40.

98. ГОСТ 3813 – 72. Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 20 с.

99. Кирюхин, С. М. Сравнительная оценка качества и надежности тканей для спецодежды [Текст] / С. М. Кирюхин, Д. В. Куроедова, О. Н. Денисова, С. Ф. Литовченко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 4. – С. 13-19.

100. Шустов, Ю. С. Прогнозирование разрывной нагрузки хлопчатобумажных трикотажных полотен одежной группы [Текст] / Ю. С. Шустов, А. В. Курденкова, Н. С. Бернштейн // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 2С. – С. 11-13.

101. Ломакина, И. А. Определение нормативных значений по разрывной нагрузке ткани с использованием статистических характеристик [Текст] / И. А. Ломакина, Н. А. Грузинцева, Б. Н. Гусев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 3. – С. 8-10.

102. Ким, А. А. Исследование механических свойств тканей для изготовления бронежилетов [Текст] / А. А. Ким, А. В. Курденкова, Ю. С. Шустов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 2. – С. 31-33.

103. Шустов, Ю. С. Прогнозирование разрывной нагрузки тканей для изготовления бронежилетов [Текст] / Ю. С. Шустов, А. В. Курденкова, А. А. Ким // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2010. - № 4. – С. 15-18.

104. Шустов, Ю. С. Комплексная оценка механических свойств мебельных тканей [Текст] / Ю. С. Шустов, А. В. Курденкова, Е. Н. Малявко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2011. - № 6. – С. 12-14.

105. Никитина, О. В. Оценка изменения механических свойств параарамидных нитей после действия светопогоды [Текст] / О. В. Никитина, А. В.

Курденкова, Ю. С. Шустов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 2. – С. 17-20.

106. ГОСТ 6611.2–73. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве [Текст]. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1973. – 128 с.

107. Ноздрина, Н. А. Исследование действия высоких температур на разрывную нагрузку термостойких арамидных волокон [Текст] / Н. А. Ноздрина, А. В. Мошкова, А. И. Слугин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 2. – С. 15-16.

108. Анисимов, Д. И. Выбор определяющих показателей качества тканей для бронежилетов [Текст] / Д. И. Анисимов, М. Ю. Кузнецов, С. М. Кирюхин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 2. – С. 33-35.

109. Кузнецов, М. Ю. Определяющие показатели качества парашютных тканей [Текст] / М. Ю. Кузнецов, С. М. Кирюхин, Н. В. Макарова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 3. – С. 12-15.

110. Шустов, Ю. С. Прогнозирование нагрузки при прорезании термоскрепленных нетканых материалов после искусственной инсоляции [Текст] / Ю. С. Шустов, А. В. Курденкова, И. В. Люкшинова, Е. В. Бызова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 5. – С. 23-25.

111. Никитина, О. В. Исследование разрывной нагрузки при растяжении параарамидных нитей [Текст] / О. В. Никитина, А. В. Курденкова, Ю. С. Шустов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2012. - № 6. – С. 27-28.

112. Ишматов, А. Б. Исследование разрывных характеристик трощеных нитей из натурального шелка [Текст] / А. Б. Ишматов, П. С. Балабаев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2013. - № 1. – С. 36-39.

113. Кобляков, А. И. Лабораторный практикум по текстильному материаловедению [Текст] / Кобляков А. И. – М.: Легпромсбыт, 1986. – 344 с.

114. Садыкова, Ф. Х. Текстильное материаловедение и основы текстильных производств [Текст] / Ф. Х. Садыкова, Д. М. Садыкова, Н. И. Кудряшова. — М.: Легпромбытиздат, 1989. — 288 с.

115. Давыдов, А. Ф. Текстильное материаловедение [Текст] / А. Ф. Давыдов. - М.: РЗИТЛП, 1997. – 168 с.

116. Шустов, Ю. С. Текстильное материаловедение. Лабораторный практикум [Текст] : Учебное пособие / Ю. С. Шустов, С.М. Кирюхин, А.Ф. Давыдов, С. Б. Белкина и др. – М.: Инфра-М, 2016. – 341 с.

117. Севостьянов, П. А. Статистические закономерности взаимосвязи между сухим и вязким трением в волокнистом материале [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы промышленности товаров народного потребления» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения» (11-12 октября 2017 года). Том 2. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – 317 с. – С. 82-84.

118. Крагельский, И. В. Физические свойства лубяного сырья [Текст] : 2-е изд. / И. В. Крагельский. – М.: Гизлегпром, 1939. – 427 с.

119. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968.– 257 с.

120. Севостьянов, П. А. Основы анализа и моделирования данных в технике и экономике [Текст] / П. А. Севостьянов, К. В. Ордов. – М.: «Тисо Принт», 2015. – 412 с. ISBN 978-5-9904852-3-5

121. Севостьянов, П. А. Основы компьютерного моделирования систем [Текст] / П. А. Севостьянов, В. И. Монахов – М.: «Тисо Принт», 2016. – 368 с. ISBN 978-5-9904852-4-2.

122. ГОСТ 18976-73. Ткани текстильные. Метод определения стойкости к истиранию. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 6 с.

123. ГОСТ Р 51552-99. Материалы текстильные. Методы определения стойкости к истиранию текстильных материалов для защитной одежды. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 8 с.

124. Монахов, В. В. Компьютерное моделирование динамики износа и старения материалов в условиях нормальной эксплуатации [Текст] / В. В. Монахов, К. В. Ордов, Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов / Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. - №3 (363). – С. 286-290.

125. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения [Текст] : В 2-х томах. Пер. с англ. / В. Феллер. – М.: Мир, 1984. - 528 с.

126. Карлин, С. Основы теории случайных процессов [Текст] : Пер. с англ. / С. Карлин – М.: Мир, 1971. – 536 с.

127. Тихонов, В. И. Марковские процессы [Текст] / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. – М.: Советское Радио, 1977. – 488 с.

128. Монахов, В. В. Имитационные модели процессов износа и старения волокнистых материалов при нормальных условиях эксплуатации [Текст] / В. В. Монахов, Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, К. В. Ордов // Моделирование в технике и экономике : материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 23–24 марта 2016 года / УО «ВГТУ». – Витебск, 2016. – 557 с. – С. 125-127.

129. Севостьянов, П. А. Имитационная модель износа и старения одномерного материала в нестационарных условиях внешних воздействий [Текст] / П. А. Севостьянов, В. В. Монахов, Т. А. Самойлова, К. В. Ордов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017. - № 1 (367). – С. 223-226.

130. Вентцель, Е. С. Введение в исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Советское Радио, 1964. – 390 с.

131. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Советское Радио, 1972. – 552 с.

132. Самойлова Т. А. Статистические аспекты моделирования рыхления клочков хлопка [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин,

С. Г. Савельев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. - № 1. – С. 147–150.

133. Семенов, В. К. Прогнозирование накопления дефектов на трубопроводах ТЭС и АЭС [Текст] / В. К. Семенов, А. А. Беляков, В. С. Щербнев // Вестник ИГЭУ. - 2009. – Вып .2. - С.1 -4.

134. Козинкина, А. И. Определение концентрации деформационных дефектов [Текст] / А. И .Козинкина, Е. А. Козинкина // Прикладная механика и техническая физика. - 2010. - Т. 51. - № 6. - С.164-170.

135. Севостьянов, П. А. Модель динамики старения и износа одномерного полимерного материала [Текст] / П. А. Севостьянов, В. В. Монахов, Т. А. Самойлова // Химические волокна. – 2017. - № 1. – С. 74-76.

136. Севостьянов, П. А. Модель динамики старения одномерного полимерного материала в стационарных и нестационарных условиях эксплуатации [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Academic science - problems and achievements VIII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 15-16.02.2016, Vol. 2 — North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2016, p. 206, 132-133 p.

137. Монахов, В. В. Исследование динамики старения материалов методами компьютерной имитации [Текст] / В. В. Монахов, Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Тезисы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». — Витебск, 2016. - 194 с. – С. 114.

138. Забродин, Д. А. Моделирование потери свойств текстильных материалов как задача теории надежности [Текст] / Д. А. Забродин, П. А. Севостьянов // Химические волокна. - 2009. - № 4. - С. 41 – 43.

139. Баруча-Рид, А. Т. Элементы теории Марковских процессов и их приложения [Текст] / А. Т. Баруча-Рид. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

140. Рыков, В. В. Обобщенные процессы рождения и гибели и их применение к моделям старения [Текст] / В. В. Рыков // Автоматика и телемеханика. – 2006. - Вып. 3 - С.103-120.

141. Калинин, А. В. Метод разделения переменных для уравнения Марковских процессов гибели [Текст] / А. В. Калинин, А. В. Мاستихин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Естественные науки». – 2007. - № 2. - С. 45-63.

142. Karpelson, A. Probability of Detection and Uncertainty of Measurement during Ultrasonic Inspection of CANDU Reactor Pressure Tubes [Текст] / A. Karpelson // The e-Journal of Nondestructive Testing. – Vol .20. - No. 7.

143. Севостьянов, П. А. Исследование робастности старения полимерных нитей и волокон методами компьютерной имитации [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017. - № 2 (368). – С. 305-308.

144. Бокшицкий, М. Н. Длительная прочность полимеров [Текст] / М. Н. Бокшицкий. – М.: Химия, 1978. – 308 с., ил.

145. Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров [Текст] / Отв. редактор к.ф.-м.н. В. А. Иванов, д.ф.-м.н. А. П. Рабинович, акад. А. Р. Хохлов. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 696 с.

146. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения [Текст] / В. Феллер; Пер. с англ. Р.Л. Добрушина. А.А. Юшкевича, С.А. Молчанова. – Т. 1 – М.: Мир, 1967. – 500 с., т. 2 – М.: Мир, 1967. – 752 с.

147. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики. Справочн. [Текст] / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.

148. Бартенев Г.М. Физика полимеров [Текст] / Г. М. Бартенев, С. Я. Френкель / под ред. д-ра физ.-мат. наук А. М. Ельяшевича. – Л.: Химия, 1990. – 432 с. – ISBN 5-7245-0554-1.

149. Кукуджанов, В. Н. Численное моделирование локализации деформаций и разрушения упруговязкопластических материалов [Текст] / В. Н. Кукуджанов, В. Ю. Кибардин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2001. - № 1. - С.113-123.

150. Севостьянов, П. А. Анализ старения синтетических нитей методами компьютерного моделирования [Текст] / П. А. Севостьянов, В. В. Монахов, Т. А. Самойлова // Химические волокна. – 2017. - № 4. – С. 52-54.

151. Sevost'yanov, P.A. Analysis of ageing of synthetic filaments by methods of computer simulation [Текст] / P. A. Sevost'yanov, V. V. Monakhov, T. A. Samoiloa // Fibre Chemistry. – 2017 - 49(4). - pp. 281-283.

152. Справочник по надежности [Текст] / под ред. Б. Р. Левина, в 3 томах, Т. 1. - М.: Мир, 1969. - 339 с.

153. Севостьянов, П. А. Фрактальная модель статистической динамики старения одномерных полимерных материалов [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, И. Н. Воробьев // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2018): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – 282 с. – С. 242-245.

154. Бартнев, Г. М. Физика и механика полимеров [Текст] : Учеб. пособие для вузов / Г. М. Бартнев, Ю. В. Зеленеv – М.: Высшая Школа, 1983. – 392 с.

155. Перепелкин, К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты [Текст] / К. Е. Перепелкин. – М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. – 658 с.

156. Sevostyanov, P. A. One-dimensional Polymeric Material Aging and Wear Model [Текст] / P. A. Sevostyanov, V. V. Monakhov, T. A. Samoiloa // Fibre Chemistry. - 2017- V. 49 (1). – pp. 76–78.

157. Севостьянов, П. А. Имитационная модель возникновения дефектов в материале [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК – 2017): сб. материалов межвуз. Науч.-техн. Конф. Аспирантов и студентов (с междунар. Участием). Ч. 2. – Иваново: ИВГПУ, 2017. – 302 с. – С. 368–369.

158. Монахов, В. В. Компьютерная модель динамики возникновения дефектов в одномерном материале [Текст] / В. В. Монахов, Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Студенты и молодые ученые КГТУ — производству :

материалы 68-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов. 25–29 апреля 2016 г. В 2 т. Т. 2. Секции 4–8 / Костромской гос. технол. ун-т. — Кострома : Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2016. - 148 с. – С. 111-112.

159. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] : 8-е изд., перераб. / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.

160. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования [Текст] : Учеб. пособие для вузов, 2- изд., доп. и перераб. / В. А. Веников - М.: Высшая Школа, 1976. – 479 с.

161. Севостьянов, П. А. Методы и алгоритмы обработки экспериментальных данных при компьютерном моделировании процессов старения и износа волокнистых материалов [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 3. – М.: ФГБОУ ВО «МГУДТ», 2016. – 308 с. – С. 113-116.

162. Николаев, В. В. Особенности имитационного моделирования технологической машины на примере ленточной машины для хлопка [Текст] / В. С. Николаев, В. В. Волков, И. А. Прошин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2015. - № 1. - С. 139 - 143.

163. Севостьянов, П. А. Оценка воспроизводимости методов определения истираемости тканей специального назначения [Текст] / П. А. Севостьянов, В. Ю. Никитюк, Д. А. Забродин, В. И. Лебедева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011. - № 3. - С. 26-29.

164. Пугачев, В. Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик [Текст] / В. Н. Пугачев. – М: Советское радио, 1973. – 256 с.

165. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1971. - 208 с.

166. Севостьянов, П. А. Планирование экспериментов и обработка данных моделирования процессов старения полимерных материалов [Текст] / П. А.

Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, И. Н. Воробьев // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2018): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – 282 с. – С. 246-249.

167. Севостьянов, П. А. Оценка влияния свойств волокнистого материала и конструктивных параметров на выравнивающую и смешивающую способности дозатора-смесителя [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1983. - № 1.

168. Севостьянов, П. А. Влияние законов распределения времени наработки на отказ и восстановления технологического оборудования на стабильность работы автоматизированного хлопкопрядильного производства [Текст] / П. А. Севостьянов, А. В. Логинов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 1988. - № 4.

169. Севостьянов, П. А. Моделирование динамики удлинения и разрыва образца ткани с учетом случайных вариаций и изменений в структуре ткани и взаимодействии нитей [Текст] / П. А. Севостьянов, В. И. Монахов, Т. А. Самойлова, П. Е. Дасюк // Химические волокна. – 2015. - № 6. – С. 79-82.

170. Севостьянов, П. А. Динамика удлинения и разрыва комплексных нитей и ее связь со свойствами элементарных нитей при моделировании полуволновых деформаций [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, К. В. Ордов, В. В. Монахов // Химические волокна. – 2017. - № 2. – С. 64-66.

171. Sevost'yanov, P. A. Dynamics of Elongation and Breaking of Complex Yarns and Its Dependence on Filament Properties in Modeling Semicyclic Deformations [Текст] / P. A. Sevost'yanov, T. A. Samoiloa, K. V. Ordov, V. V. Monakhov // Fibre Chemistry. - 2017. - 49(2). - pp. 142-144.

172. Sevost'yanov, P. A. Modeling fabric sample elongation and breaking dynamics, taking account of random variations and changes in fabric structure and interaction of yarns [Текст] / P. A. Sevost'yanov, V. I. Monakhov, T. A. Samoiloa, P. E. Dasyuk // Fibre Chemistry. - March 2016. - Volume 47. - Issue 6. - pp. 501–504.

173. Севостьянов, П. А. Некоторые аспекты моделирования задач структурной механики тканых полотен [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Материалы докладов 50-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной году науки в двух томах. Т. 1. – 2017. – 266 с. – С. 273-275.

174. Севостьянов, П. А. Робастность моделей разрыва тканых полотен [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, И. Н. Воробьев // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности» - Витебск: ВГТУ, 2017. – 308 с. – С. 295-298.

175. Розанов, Ф. М. Строение и проектирование тканей [Текст] : Учеб.пособие для текстильных ин-тов / Ф. М. Розанов, О. С. Кутепов, Д. М. Жупикова, Н. В. Молчанов. – М.: Гизлегпром, 1953. – 471 с.

176. Мартынова, А. А. Лабораторный практикум по строению и проектированию тканей [Текст] / А. А. Мартынова, Л. А. Черникина – М.: Легкая индустрия, 1976. – 296 с.

177. Гордеев, В. А. Ткацкие переплетения и анализ ткани [Текст] / В. А. Гордеев. – М.: Ростехиздат, 1962. – 10 с.

178. Севостьянов, П. А. Простая конечноэлементная модель удлинения образца тканого полотна [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Материалы и технологии. - 2018. - № 1. – с. 33-36.

179. Севостьянов, П. А. Одномерная модель удлинения нитей основы в тканом полотне с учетом сил трения [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Материалы и технологии. - 2018. - № 2. – с. 89-93.

180. Севостьянов, П. А. О закономерности расположения утка в ткани [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1971. - № 2 - С.89-92.

181. Севостьянов, П.А. Взаимосвязь между неровнотой пряжи и неровнотой ткани [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1971. - № 4 - С.95-98.

182. Севостьянов, П. А. Методы оценки и измерения неравномерности расположения нитей в ткани [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук / МТИ - М., 1973. - 24 с.

183. Севостьянов, П. А. Оценка размера зоны формирования ткани [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1978. - № 2. – С. 99-106.

184. Севостьянов, П. А. Алгоритм моделирования прибора уточных нитей к опушке ткани как волнового процесса в сплошной среде с кулоновским трением [Текст] / П. А. Севостьянов, А. В. Радов // Известия вузов, Технология текстильной промышленности. - 2008. - № 2С. - С.72-76.

185. Севостьянов, П.А. Сингулярный спектральный анализ неравномерности структуры тканых полотен [Текст] / П. А. Севостьянов, Е. А. Баландин, Т. С. Бутенко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 3. - С. 112-116.

186. Севостьянов, П. А. Модель удлинения и разрыва ткани с учетом статистических вариаций параметров нитей и структуры [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, П. Е. Дасюк, Н. М. Пучкова // Химические волокна. – 2014. - № 6. - С. 47-53.

187. Севостьянов, П. А. Моделирование удлинения основной нити в ткани [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019. - № 2 (380). – С. 199-202.

188. Севостьянов, П. А. Распределение деформаций по основе и влияние уточных нитей на деформацию при моделировании удлинения основной нити в ткани [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018. - № 3 (375). – С. 163-166.

189. Севостьянов, П. А. Моделирование неравномерности распределения деформации основных нитей в тканых полотнах методом конечных элементов [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Химические волокна. – 2018. - № 5. – С. 93-96.

190. Sevostyanov, P. A. Finite-Element Modeling of Nonuniformity in the Strain Distribution for Warp Yarns in Fabrics [Текст] / P. A. Sevostyanov, T. A. Samoiloa, V. V. Monakhov // *Fibre Chemistry*. – 2019. - 50(5). - pp. 473-476.

191. Монахов, В. В. Особенности и методы моделирования деформации и разрыва тканых полотен [Текст] / В. В. Монахов, Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сб. материалов всероссийской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2019.– Часть 1. – 364 с. – С. 32-35.

192. Sevost'yanov, P. A. Model and energy aspects for propagation of strain and mechanical stresses in textile fabrics [Текст] / P. A. Sevostyanov, T. A. Samoiloa // *Fibre Chemistry*, 2018. - 50(2). - pp. 108–110.

193. Sevost'yanov, P. A. Model and energy aspects for propagation of strain and mechanical stresses in textile fabrics [Текст] / P. A. Sevostyanov, T. A. Samoiloa // *Fibre Chemistry*, 2018. - 50(2). - pp. 108–110.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица А.1 Список разработанных алгоритмов

Номер	Название	Страница
Алгоритм 1	Модель динамики истирания	77
Алгоритм 2	Имитационная модель процессов износа и старения волокнистых материалов при нормальных условиях эксплуатации	96
Алгоритм 3	Имитационная модель износа и старения одномерного материала в нестационарных условиях внешних воздействий	106
Алгоритм 4	Модель динамики старения и износа одномерного полимерного материала	111
Алгоритм 5	Оценка времени, суммарная интенсивность дефектов достигнет в некоторой точке нити предельного уровня	116
Алгоритм 6	Модель полуцикловых деформаций	137