

На правах рукописи



**СИЧЕВОЙ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЛОКОН ШЕРСТИ  
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ КАМВОЛЬНОГО ПРЯДЕНИЯ**

Специальность 05.19.01-

«Материаловедение производств текстильной и легкой промышленности»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2022

Работа выполнена на кафедре Текстильных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)».

Научный руководитель:

**Разумеев Константин Эдуардович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Текстильных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)».

Официальные оппоненты:

**Киселев Михаил Владимирович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения института автоматизированных систем и технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет (КГУ)», г. Кострома.

**Павлюченко Елена Вячеславовна**, кандидат технических наук, ведущий специалист Федерального государственного бюджетного учреждения «Агентство по производству и первичной обработке льна и конопли «Лён», г. Москва

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)** (г. Казань)

Защита диссертации состоится «20» сентября 2022 г. в 10 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.144.06 в ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» по адресу: 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и на сайте <https://kosygin-rgu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.144.06  
доктор технических наук, профессор



Елена Александровна Кирсанова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Распознавание сырьевого состава в готовом изделии является основой для идентификации при проведении процедуры обязательного подтверждения соответствия. Существующие методы позволяют определить процентное соотношение натуральных и химических волокон. Однако стандартизованные методы идентификации не дают возможность исключить фальсификацию при заявленном на маркировке дорогостоящем сырье при его замене на более дешевое.

В условиях цифровизации возникла необходимость разработки более точных методов идентификации с использованием современных методик и оборудования.

Одним из таких методов является использование генетических характеристик животных для распознавания вида волокон, используемых для получения пряжи.

В связи с вышесказанным разработка метода более точной идентификации дорогостоящего волокнистого сырья является актуальной задачей, так как в отличие от существующих позволяют определить наличие шерстяных волокон конкретной видовой принадлежности, что существенно повышает качество готовых изделий и соответственно оценку продукции.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка методов идентификации волокон шерсти для объективной оценки волокнистого состава готовой продукции и сырья.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- изучить современную классификацию волокон шерсти;
- изучить стандартные методы распознавания шерстяных волокон;
- проанализировать различные методы секвенирования и проведена оценка возможности их применения для идентификации волокон шерсти;
- разработать методику идентификации волокон шерсти на основе метода секвенирования молекул ДНК;
- провести спектральный анализ окрашенных волокон различной видовой принадлежности для идентификации волокнистого состава и видовой принадлежности шерсти;
- исследовать влияние применения разработанной методики на выбор параметров математической модели для прогнозирования свойств пряжи;
- разработать математические модели для прогнозирования прочности шерстяной пряжи;
- провести оптимизацию линейной плотности и разрывной нагрузки пряжи.

## **Методы исследования**

Экспериментальные исследования проводились с использованием разработанных методов в лабораторных условиях. Для обработки результатов эксперимента в исследованиях использовались методы математической статистики. В качестве теоретической основы применялись теория подобия и анализа размерностей, а также теория планирования эксперимента. Построение функциональных зависимостей осуществлялось на ЭВМ с помощью программы Microsoft Excel. Для обработки фотографий объектов исследований применялась программа Adobe Photoshop, National Center for Biotechnology Information.

## **Научная новизна работы**

При проведении теоретических и экспериментальных исследований автором впервые:

- разработан метод секвенирования для идентификации волокон шерсти по видовым признакам;
- предложена технологическая цепочка переработки шерстяных волокон с учетом их видовой принадлежности;
- проведен спектральный анализ для получения информации о влиянии колористического оформления и интенсивности окрашивания на процедуру идентификации прошедших заключительную отделку волокон и определения их видовой принадлежности;
- разработаны математические модели для прогнозирования прочности шерстяной пряжи с учетом характеристик параметров и строения пряжи после проведенной по разработанной методике идентификации.

## **Практическая значимость работы** заключается в том, что

- разработан метод секвенирования, который позволяет исключить фальсификацию шерстяного сырья;
- разработанный метод идентификации с помощью спектрального анализа не окрашенных и окрашенных волокон позволяет создать базу для сравнения спектров различных видов волокон в целях идентификации сырьевого состава готового изделия;
- разработанные математические модели позволяют проектировать пряжу по разрывной нагрузке в зависимости от процессов идентификации сырья;
- при выборе параметров настройки технологического оборудования предложено использовать полученные параметры оптимизации линейной плотности и разрывной нагрузки.

Результаты работы внедрены на АО «Троицкая камвольная фабрика» и ООО «Русская шерстяная компания».

Результаты исследований могут быть использованы на текстильных предприятиях при проектировании пряжи, что позволит значительно улучшить показатели качества готовой продукции, а также таможенные, испытательные лаборатории и учебном процессе.

### **Апробация работы**

Основные результаты научных исследований докладывались и получили положительную оценку на:

Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (23-27 мая 2016, XIX Международный научно-практический форум (SMARTEX – 2016), Иваново). – 2016

Международный салон изобретений "Инвентика 2018". (Яссы, Румыния, Золотая медаль) - 2018

Международный салон изобретений и инноваций "Гран-при Эйфель". (Париж, Франция, Золотая медаль) - 2018

Заседания кафедры Текстильных технологий РГУ им. А.Н. Косыгина.

АО «Троицкая камвольная фабрика»

ООО «Русская шерстяная компания»

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в международную базу цитирования и 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Работа выполнена на 200 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 132 наименований, приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена ее направленность, а также отражена практическая значимость исследований.

*В первой главе* дан анализ существующих методов идентификации шерстяных волокон, классификация шерсти и влияние видов шерсти на технологию выработки изделий.

Вопросами классификации шерсти и технологии выработки изделий занимались проф. Разумеев К.Э., проф. Капитанов А.Ф., проф. Скуланова Н.С. и др.

Вопросы проектирования пряжи были освещены в работах Корицкого К.И., Рыклина Д.Б., Когана А.Г. и др.

Для классификации волокон шерсти используются различные признаки, такие как вид животного, геометрические размеры волокна, параметры его строения. Также существует торговая сельскохозяйственно-промышленная классификация и классификация по различным кодам (ОКП, ТН ВЭД, ОК ВЭД 2). Однако в классификациях по различным кодам практически не выделены группы по видам животных

Во всех видах классификации учитываются геометрические размеры самого волокна, но не предусмотрены такие классификационные признаки, как, например, размеры чешуек и другие параметры внутреннего строения, что

осложняет работу при входном контроле на предприятии, так как априори предполагается, что известен вид животного, но не всегда указана порода.

Качество шерсти оценивается по национальным стандартам вида технических условий. В требованиях стандартов учтены только требования к геометрическим размерам волокон, а также к цвету и засоренности, но не учитываются более детальные параметры внешнего вида волокна, такие как, например, размеры чешуек, что также определяет породу животных.

Идентифицировать волокна шерсти можно по внешнему виду, характеру горения и растворимости в различных реактивах. Также существуют регламентированные методы качественного анализа текстильных материалов. Они зафиксированы в форме национальных и международных стандартов. Среди распространенных методов идентификации не существует общепризнанной методики, позволяющей по внешнему виду или по растворимости в различных реагентах определить не только принадлежность волокна к белковым, но и определить вид животного, с которого эти волокна были получены. В связи с этим возникает необходимость в применении методов для более детальной идентификации.

Работы по применению методов секвенирования для идентификации волокон шерсти проводились за рубежом. В отечественной науке и практике методы секвенирования для идентификации волокон шерсти различных животных практически не применяются.

Волокна шерсти различных животных имеют различные геометрические характеристики, а также механические свойства, соответственно, это будет оказывать влияние на качество пряжи и, как следствие, на качество готового изделия. Для шерсти, не прошедшей процедуру идентификации, может быть неправильно подобрана система прядения, что приведет к изготовлению некачественной пряжи. Также процедура детальной идентификации позволяет исключить фальсификацию при изготовлении изделий. Точно зная вид и породу животных, с которых получена шерсть, можно более рационально выбрать параметры оборудования и заправок.

***Во второй главе*** рассмотрено применение методов секвенирования и сравнение их с традиционными методами распознавания волокон.

Традиционные методы определения волокнистого состава текстильных материалов, основанные на микроскопии и химических методах, не позволяют точно определить вид и породу животного, шерсть которого использовалась.

В качестве объектов исследования были выбраны 10 образцов волокон шерсти различных животных (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика объектов исследования

Номер образца	Название шерсти	Вид	Содержание волокон, %	Замасливатель, %
1	Шерсть альпаки «бейби»	волокно	100	0,13
2	Шерсть альпаки «светло-коричневая»	топс	100	0,27
3	Шерсть альпаки «Перуанская»	волокно	100	0,09
4	Верблюжья шерсть	волокно	100	0,15
5	Козий пух	волокно	100	0,29
6	Козья шерсть	волокно	100	0,47
7	Овечья шерсть (меринос)	волокно (топс)	100	0,49
8	Овечья шерсть «Смеска №1»	пряжа	80 имп. 20 отеч.	0,55
9	Овечья шерсть «Смеска №2»	пряжа	70 (80 имп. 20 отеч.) 30 вискоза	0,34
10	Шерсть яка	пряжа	100	0,21

Для каждого образца волокон по стандартным и общепринятым методикам были определены показатели физико-механических свойств. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты определения физико-механических свойств исследуемых шерстяных волокон

Наименование показателя	Обр. №1 Шерсть альпаки «бейби»	Обр. №2 Шерсть альпаки «светло-коричневая»	Обр. №3 Шерсть альпаки «Перуанская»	Обр. №4 Верблюжья шерсть	Обр. №5 Козий пух	Обр. №6 Козья шерсть	Обр. №7 Овечья шерсть (меринос)	Обр. №8 Овечья шерсть «Смеска №1»	Обр. №9 Овечья шерсть «Смеска №2»	Обр. №10 Шерсть яка
Диаметр, мкм	20,8	24,4	25,7	22,8	26,3	21,0	23,4	21,6	24,8	20,7
Неровнота по диаметру, Сг %	22,0	29,0	28,9	44,4	35,4	41,6	24,7	28,7	25,4	31,2
Линейная плотность, текс (пересчет)	0,448	0,598	0,684	0,539	0,818	0,457	0,548	0,514	0,525	0,429
Линейная плотность, текс	0,442	0,692	0,679	0,559	-	0,511	0,554	0,520	0,531	0,516

Разрывная нагрузка одиночного волокна, сН	9,54	11,24	11,3	20,36	15,12	7,73	7,2	7,8	7,5	12,9
Разрывное удлинение, %	43,5	40,2	40,9	45,4	43,2	39,9	38,1	36,8	39,4	37,9
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	21,6	18,8	16,6	37,8	21,1	16,9	13,1	12,8	13,4	30,1
Извитость, извитков на 30мм	5,4	3,3	3,3	3,1	2,1	1,7	7,3	7,8	7,1	-
Коэффициент трения волокна/волокну волокна/металлу	0,23	0,22	0,24	0,31	0,23	0,24	0,32	0,33	0,33	-
	0,21	0,17	0,20	0,20	0,19	0,19	0,23	0,23	0,24	-

Можно отметить, что наибольшим диаметром обладает козий пух, а наиболее тонкими являются волокна шерсти яка и альпаки «бейби». Наибольшую неравномерность по диаметру имеет верблюжья шерсть, наиболее равномерными по тонине являются волокна шерсти альпаки «бейби». Наибольшей прочностью обладают волокна верблюжьей шерсти, они также наиболее вытягиваются в момент разрыва. Наименьшую прочность имеют волокна козьей шерсти и мериноса. Наименьшее относительное удлинение наблюдается у волокон шерсти яка. Наименьшая относительная разрывная нагрузка отмечается у волокон мериноса, так как данные волокна имеют низкую прочность при относительно большом диаметре.

Оптимальное соотношение прочности и диаметра наблюдается у волокон шерсти верблюда, поэтому данное волокно имеет наибольшую относительную разрывную нагрузку.

Наиболее извитыми являются волокна шерсти альпаки «бейби», в то время как шерсть яка не имеет извитости.

Коэффициент трения волокна по волокну имеет более высокие значения, чем при трении волокна по металлу; это связано с наличием чешуек у волокон, которые при скольжении могут сцепляться, и создается дополнительное усилие, чтобы преодолеть возникшее сопротивление. Также чешуйки волокон шерсти имеют разную форму и размеры, что приводит к разнице в величине коэффициента трения. Металл имеет более гладкую поверхность, поэтому ко-



эффицент трения волокна по нему достаточно низкий. Наибольшим коэффициентом трения волокна по волокну обладает шерсть мериноса, а наименьшие значения имеют волокна шерсти альпаки светло-коричневой и козьего пуха. Шерсть мериноса также имеет наибольшее значение коэффициента трения волокна по металлу, а наименьшей величиной обладает шерсть альпаки светло-коричневой.

В лаборатории ООО «СЕРНИЯ» при помощи микроскопа FEI Inspect S при увеличении 1500-3000 были сделаны снимки волокон шерсти овцы, козы, яка, верблюда и альпаки. На рис. 1 и 2 показано, что отличить по внешним признакам, например, шерсть мериноса и яка затруднительно. Также сложно найти отличия и у шерсти других животных, так как при исследовании внешнего вида под микроскопом видно только наличие чешуек и сердцевинного слоя, что подтверждает принадлежность волокон к натуральным волокнам животного происхождения, т.е. волокна являются шерстью.

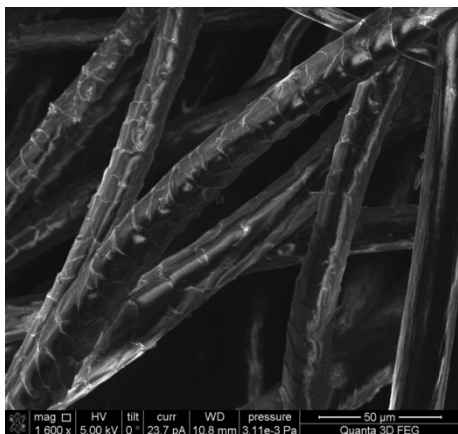


Рисунок 1. Снимок шерсти овцы (меринос) под микроскопом при увеличении 1600

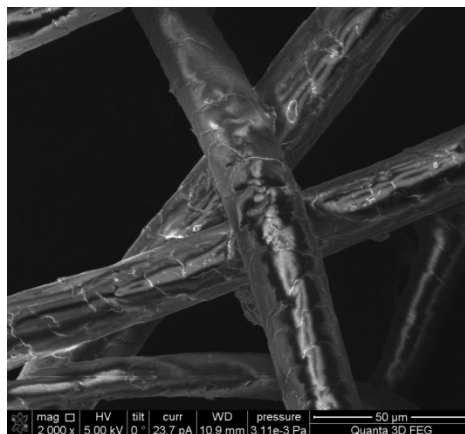


Рисунок 2. Снимок шерсти яка под микроскопом при увеличении 2000

Традиционные методы определения состава текстильных материалов, основанные на световой микроскопии, электронно-лучевой микроскопии, методах растворения, не позволяют в некоторых случаях точно определить, шерсть какого животного использовалась, и практически во всех случаях детерминировать конкретный вид и породу.

Разработан прогрессивный метод идентификации, основанный на секвенировании биоматериалов, индифферентный к технологическому виду продукции (волокно, топс, пряжа, ткани и т.д.), виду обработки (водо-, масло-, грязеотталкивающая, антисминаемая, огнезащитная и т.д.), воздействию красителя и т.д.

Цель указанного метода заключается в получении фрагмента около 500 п.о. с митохондриальной D-петли, используя более универсальный метод, чем описан в известных источниках.

Предлагаемый метод основан на определении первичной последовательности коротких фрагментов митохондриальной ДНК (мтДНК) и дальнейшего

сравнительного анализа. ДНК митохондрий обнаружена у всех прокариотических организмов и представляет собой относительно короткую кольцевую цепь, которая хорошо изучена для многих групп растений, животных и человека. Анализ последовательности мтДНК широко используется в медицине, систематике и популяционной генетике.

Для конструирования праймеров использовали анализ по консенсусной последовательности митохондриальной ДНК составленной в результате сравнительного анализа последовательностей *Ovis aries* (GenBank: KF977846.1), *Bos grunniens* (GenBank: KR011113.1), *Capra hircus* (GenBank: KM233163.1), *Lama pacos* (GenBank: AJ566364.1), *Camelus dromedarius* (GenBank: EU159113.1), *Camelus bactrianus* (GenBank: EF212037.2) в программе ClustalW (приложение 1). Были сконструированы две пары праймеров на консервативных для указанных видов участках мтДНК, MtDf1 GTGCCAGCCACCGCGGTCAATCGA MtDr1 GGTATCTAATCCCAGTTTGG, ограничивающие участок 161 н.п. и Mtdf2 ACGTTAGGTCAAGGTGTAAC MtDr2 GACGGGCGGTGTGTGCGTGCT, ограничивающие участок 150 н.п.

ДНК из образцов выделяли методом нуклеосорбции с помощью набора “СОРБ-ГМО-Б” (Синтол, Россия) с модификацией протокола. Фрагмент измельченного материала размером 0.5 см<sup>3</sup> переносили в 1.5 мл пробирки, затем заливали 700 мкл лизирующего раствора с добавлением дитиотрейтола до концентрации 1мМ и инкубировали 24 часа при 65°C, периодически перемешивая. Нерастворившийся осадок центрифугировали при 10 000 g 5 мин, 300 мкл супернатанта переносили в новые пробирки. Далее проводили сорбцию и отмывку ДНК по протоколу. ДНК элюировали в 30 мкл 1x ТЕ-буфера.

ПЦР проводили в детектирующих амплификаторах АНК-32 (ИАП РАН/Синтол) и CFX-96 (Biorad, США) по программе: 95°C–3 мин, (95°C–10 с, 60°C–40 с) 45 циклов, 72°C–5 мин, с последующим плавлением для исключения ложноположительных результатов, связанных с димеризацией праймеров. Для проведения реакции брали 2.5x реакционную смесь с интеркалирующим красителем EVA Green и ингибированной антителами hot start Taq-ДНК полимеразой (Синтол, Россия), BSA 20 мкг, по 10 пмоль каждого праймера и по 3 мкл выделенной ДНК на реакцию. Накопление продукта фиксировали по возрастанию флуоресценции во время реакции. Для секвенирования отбирали образцы, имеющие температуру плавления в пределах 83-85°C. Также определение можно проводить, используя электрофоретическую детекцию амплификации, отбирая образцы, содержащие ПЦР-продукт соответствующего размера. Ферментативную очистку ампликонов проводили смесью экзонуклеазы I (Thermo) и щелочной фосфатазы (СибЭнзим, Россия), первичную последовательность нуклеотидов получали на генетическом анализаторе ABI 3130xl (Applied Biosystems) по стандартному протоколу для набора BigDye Terminator v3.1. с прямым и обратным праймером.

Количество выделенной ДНК оказалось примерно одинаковым для всех образцов и не зависело от степени технологической обработки материала. От каждого образца получено 30 мкл раствора с концентрацией 10-12 нг/мкл ДНК

и соотношением сигналов флуоресценции A260\A280, равным 1,85. Размеры фрагментов нуклеиновых кислот оценивались путем электрофореза в неденатурирующих условиях, на капиллярном генетическом анализаторе «Нанофор-05М» (рис. 3). Для всех образцов максимум распределения длин детектируемых фрагментов составил 200 н.п., что подтверждает данные о значительной деградации генетического материала уже на первых стадиях промышленной обработки сырья.

Результаты амплификации дополнительно оценивались путем электрофореза в агарозном геле (рис. 2). ПЦР-продукты ожидаемой длины были получены для всех образцов. Концентрации ампликонов составили от 10 до 80 нг/мкл, продукты неспецифической амплификации не обнаруживались. Все образцы признаны пригодными для секвенирования.

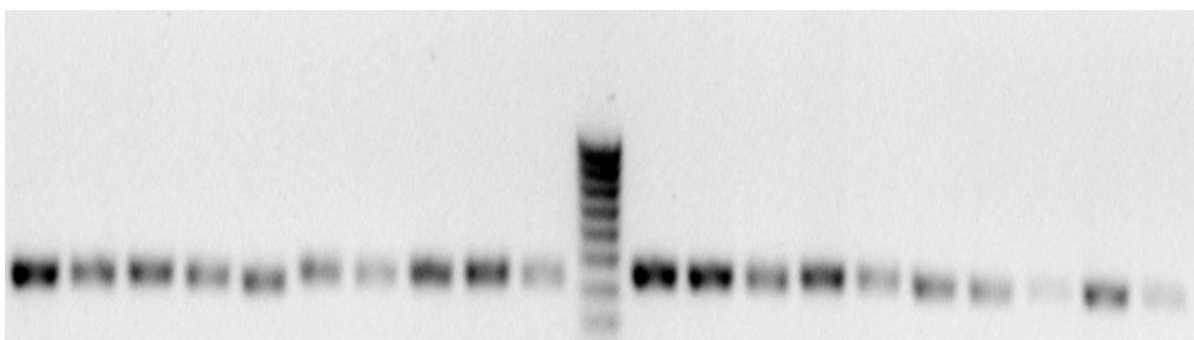


Рисунок 3 - Результат электрофореза в агарозном геле. Дорожки 1-10 ПЦР-продукт «1». Дорожки 12-21 ПЦР-продукт «2». Дорожка 11 – маркер молекулярного веса M100 (Синтол)

Достоверность идентификации видовой принадлежности материала составила 100%. Разработанный протокол можно рекомендовать для выполнения подобных исследований в молекулярно-биологической лаборатории.

Разрабатываемая методика идентификации шерстяного сырья, основанная на ДНК секвенировании, позволяет довольно точно выявлять принадлежность продукта тому или иному виду даже после применения технологических процессов, включая крашение и отделку, как известно, приводящих к значительной деградации последовательности ДНК. Суть уникальности разработанного метода заключается в выборе определенных праймеров для секвенирования, что значительно ускоряет процесс идентификации с сохранением точности определения видовой принадлежности животного.

С помощью разработанного метода решается задача идентификации шерстяного волокна, полученного из продукции, подверженной технологическим процессам производства.

Уникальность разработанного метода заключается в выборе определенных праймеров для секвенирования, что значительно ускоряет процесс идентификации с сохранением точности определения видовой принадлежности животного.

Разработанный метод достаточно прост биохимически и позволяет легко выщепить фрагмент из молекулы ДНК.

Метод полезен основным потребителям шерстяного волокна, а также конечному покупателю, так как исключает возможность фальсификации продукта.

**В третьей главе** проведено исследование влияния применения разработанной методики на выбор технологической цепочки переработки.

Процесс идентификации шерстяных волокон является важной процедурой перед выбором системы прядения, так как от этого напрямую зависит качество полученной пряжи и возможность ее переработки в готовое изделие.

Наибольшее количество операций необходимо провести при переработке чистошерстяной мериносовой пряжи, независимо от того, окрашенное волокно или суровое.

В работе проводилась окраска идентифицированных волокон для последующей спектрометрии.

Измерение цвета проводилось на спектрофотометре X-Rite Premier 8200.

Так как методы спектрометрии основаны на измерении степени поглощения (отражения) монохроматического светового потока, то можно отметить, что происходит потемнение окраски. Также форма и размеры чешуек оказывают влияние на поглощение светового потока. Чем больше размеры пластины чешуйки, тем больше отражение.

Процесс идентификации методом секвенирования позволяет более точно установить переходы технологической цепочки в зависимости от вида волокон, так как за счет дополнительной информации о геометрических размерах волокон, форме и размерах чешуек появляется возможность получить пряжу с улучшенными характеристиками без изменения параметров технологического оборудования и даже исключить некоторые переходы производственной цепочки, что положительно скажется на трудоемкости и временных затратах при производстве пряжи.

Априорная информация о виде и породе животного позволяет выбрать тип и концентрацию красителя, а также режим крашения.

**В четвертой главе** приведены расчеты для прогнозирования свойств пряжи.

С помощью теории размерности можно получить особенно ценные выводы при рассмотрении таких явлений, которые зависят от большого количества параметров, но при этом некоторые из этих параметров в известных случаях становятся несущественными. Иногда в начальной стадии изучения некоторых сложных явлений теория размерности является единственно возможным теоретическим методом.

Принципиальной особенностью исследований на основе теории подобия является установление условия подобия физических процессов, происходящих в модели и натурном объекте, и приведение результатов испытаний модели к условиям натурального объекта.

Рассмотрим влияние параметров строения на разрывную нагрузку шерстяной гребенной пряжи, предназначенную для трикотажного производства. Для этого используем следующую функциональную зависимость:

$$P_p = f(v, D, \alpha, T)$$

где  $P_p$  – разрывная нагрузка пряжи, Н;

$\alpha$  – коэффициент крутки;

$D$  – количество сложений;

$T$  – линейная плотность пряжи, текс;

$v$  – скорость растяжения, м/с.

На основании теории подобия и анализа размерностей вышеуказанную зависимость можно представить в виде комплекса безразмерных показателей:

$$P_p = \eta = f(D \cdot \alpha; v^2 \cdot T)$$

где  $\eta$  – безразмерный показатель, характеризующий изменение прочности в зависимости от параметров строения;

$D \cdot \alpha$  – безразмерный показатель, характеризующий крутку;

$v^2 \cdot T$  – безразмерный показатель, характеризующий параметры испытаний и параметры строения пряжи.

Итоговая формула для расчета разрывной нагрузки пряжи имеет следующий вид:

$$P_p = 0,98 \cdot (0,004 \ln(D \cdot \alpha) - 0,012) \cdot (228,07 \ln(v^2 \cdot T) - 802,25)$$

Формула справедлива для  $36 \leq D \cdot \alpha \leq 65$  и  $0,0015 \leq v^2 \cdot T \leq 0,0038$ . Отклонение фактических значений от расчетных не превышает 4,45%.

Применяя методы планирования эксперимента было получено уравнение множественной регрессии:  $Y = -1.1343 + 0.06138X_1 + 0.000706X_2$ .

По максимальному коэффициенту  $\beta_1=0.735$  делаем вывод, что наибольшее влияние на результат  $Y$  оказывает фактор  $X_1$ .

Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера.

Установлено, что в исследуемой ситуации 96,28% общей вариабельности  $Y$  объясняется изменением факторов  $X_j$ .

Для выбора параметров настройки технологического оборудования была проведена оптимизация линейной плотности и разрывной нагрузки пряжи после идентификации волокон методом секвенирования.

Для расчетов применялась прямая задача линейного программирования симплексным методом, с использованием симплексной таблицы.

Минимальную линейную плотность пряжи 28 текс при заданных ограничениях можно получить при выработке пряжи в одно сложение с коэффициентом крутки 65, линейной плотности волокна 0,429, что соответствует шерсти яка.

Максимальную прочность пряжи 150 Н при заданных ограничениях можно получить при выработке пряжи в три сложения с коэффициентом крутки 18, линейной плотности волокна 0,818, что соответствует козьему пуху.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Условия рынка становятся более требовательными к производителям, тем самым обеспечивая население более новыми и качественными товарами. Более активно стали использоваться шерсть и пух, получаемые от редких видов животных (лама, альпака и диких представителей семейства верблюдовых – гуанако и викунья), независимо от высокого ценового порога. Для классификации волокон шерсти используются различные признаки, такие как вид животного, геометрические размеры волокна, параметры его строения. Также существует торговая сельскохозяйственно-промышленная классификация и классификация по различным кодам (ТН ВЭД, ОК ВЭД 2). Однако в классификациях по различным кодами практически не выделены группы по видам животных.

2. Установлено, что во всех видах классификации учитываются геометрические размеры самого волокна, но не предусмотрены такие классификационные признаки, как, например, размеры чешуек и другие параметры внутреннего строения, что осложняет работу при входном контроле на предприятии, так как априори предполагается, что известен вид животного, но всегда указана порода.

3. Выявлено, что работы по применению методов секвенирования для идентификации волокон шерсти проводились за рубежом. В отечественной науке и практике применение методов секвенирования для идентификации волокон шерсти различных животных практически не применяется.

4. Установлено, что волокна шерсти различных животных имеют различные геометрические характеристики, а также механические свойства, соответственно, это будет оказывать влияние на качество пряжи и, как следствие, на качество готового изделия. Для шерсти, не прошедшей процедуру идентификации, может быть неправильно подобрана система прядения, что приведет к изготовлению некачественной пряжи. Также процедура детальной идентификации позволяет исключить фальсификацию при изготовлении изделий. Точно зная вид и породу животных, с которых получена шерсть, можно более рационально выбрать параметры оборудования и заправок.

5. Традиционные методы определения волокнистого состава текстильных материалов, основанные на микроскопии и химических методах, не позволяют точно определить, вид и породу животного, шерсть которого использовалась.

6. Разработанный метод решения задачи идентификации шерстяного волокна, полученного из продукции, подверженной всем этапам технологического процесса производства показал уникальность разработанного метода, который заключается в выборе определенных праймеров для секвенирования,

что значительно ускоряет процесс идентификации с сохранением точности определения видовой принадлежности животного.

7. Доказано, что метод идентификации, основанный на секвенировании биоматериалов, индифферентен к технологическому виду продукции (волокно, топс, пряжа, ткани и т.д.), виду обработки (водо-, масло-, грязеотгаливающая, антисминаемая, огнезащитная и т.д.), воздействию красителя и т.д.

8. Разработанный метод идентификации с помощью спектрального анализа позволяет определить волокнистый состав и видовую принадлежность неокрашенных и окрашенных волокон.

9. Априорная информация о виде и породе животного позволяет выбрать тип и концентрацию красителя, а также режим крашения

10. Полученные математические модели позволяют прогнозировать свойства пряжи.

11. Полученные параметры оптимизации линейной плотности и разрывной нагрузки после идентификации волокон методом секвенирования позволяют более точно выбрать параметры настройки технологического оборудования.

12. Показано, что минимальную линейную плотность пряжи 28 текс при заданных ограничениях можно получить при выработке пряжи в одно сложение с коэффициентом крутки 65, линейной плотности волокна 0,429, что соответствует шерсти яка, а максимальную прочность пряжи 150 Н при заданных ограничениях можно получить при выработке пряжи в три сложения с коэффициентом крутки 18, линейной плотности волокна 0,818, что соответствует козьему пуху.

## **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях, входящих в «Перечень ВАК»:**

1. Актуальность применения метода секвенирования ДНК для идентификации шерстяной продукции / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, О.П. Малюченко, И.В. Лусинян // Кожевенно-обувная промышленность – 2015. – №3-4. – С.11-12.

2. Современная информация и динамика производства шерсти редких видов / К.Э. Разумеев, А.В. Зиновьева, Д.В. Сичевой // Швейная промышленность – 2015. – №5-6. – С.15-17

3. Идентификация шерсти стандартными методами / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности – 2021. - №4 (54). – С.15-1

4. Применение теории подобия и анализа размерности для прогнозирования разрывной нагрузки пряжи. / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, Н.Е. Федорова, С.А. Голайдо // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности – 2022. - №1 (397). – С. 139-142. – журнал входит в МБЦ

5. Разработка метода идентификации волокон шерсти путем секвенирования ДНК. / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, Е.П. Лаврентьева // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности – 2022 - №... (...). – С.

### **Статьи, опубликованные в других изданиях (инд. в РИНЦ):**

1. Вопрос об эффективном распознавании сырья натурального происхождения / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, Е.В. Денисова, И.В. Лусинян // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (23-27 мая 2016, XIX Международный научно-практический форум (SMARTEX – 2016), Иваново). – 2016. – Ч. 1. – С. 191-193.

2. Использование современных методов исследования материалов животного происхождения / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, Е.В. Денисова // Швейная промышленность – 2016. – №1-2. – С.24-28 / (Текстильная и легкая промышленность – 2016. – №1. – С.24-28).

### **Участие в конференциях**

1. Вопрос об эффективном распознавании сырья натурального происхождения / Д.В. Сичевой, К.Э. Разумеев, Е.В. Денисова, И.В. Лусинян // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (23-27 мая 2016, XIX Международный научно-практический форум (SMARTEX – 2016), Иваново). – 2016. – Ч. 1. – С. 191-193.

2. Способ молекулярно-генетической идентификации материалов с высокой степенью деградации ДНК / Д.В. Сичевой, И.В. Лусинян, О.П. Малюченко, К.Э. Разумеев, Е.В. Денисова // (27-29 июня 2018, Международный салон изобретений "Инвентика 2018". Яссы, Румыния, Золотая медаль).

3. Способ молекулярно-генетической идентификации материалов с высокой степенью деградации ДНК / Д.В. Сичевой, И.В. Лусинян, О.П. Малюченко, К.Э. Разумеев, Е.В. Денисова // (29 ноября – 1 декабря 2018, Международный салон изобретений и инноваций "Гран-при Эйфель". Париж, Франция, Золотая медаль).