

*На правах рукописи*



**Сухарев Павел Андреевич**

**РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ  
ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.19.01 – Материаловедение производств  
текстильной и легкой промышленности

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна».

Научный руководитель: **Шляхтенко Павел Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна», профессор кафедры механической технологии волокнистых материалов

Официальные оппоненты: **Жуков Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Костромской государственный технологический университет», заведующий кафедрой механических технологий волокнистых материалов

**Оренбах Семен Борисович**,  
кандидат технических наук,  
директор ООО Межотраслевой научно-технический центр «Текма», г. Москва

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный политехнический университет»

Защита состоится 9 июня 2015 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. № 241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна», [www.sutd.ru](http://www.sutd.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Витковская Раиса Федоровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** выполненной работы обусловлена необходимостью совершенствования методов оценки параметров структуры полуфабрикатов прядильного производства и нитей, определяющих качество продукции текстильной промышленности. В условиях высокой конкуренции на рынке текстильной продукции производители постоянно сталкиваются с необходимостью повышения качества продукции при максимальном сокращении затрат на её производство. Для решения этой проблемы необходимо использовать эффективные методы определения, контроля и регулирования параметров текстильных материалов путем осуществления измерений непосредственно в процессе производства продукции, повышения их быстродействия и обеспечения возможности использования в системах автоматического регулирования технологических процессов.

**Целью работы** является разработка и исследование неразрушающих методов определения параметров структуры текстильных материалов как основы для создания систем автоматического регулирования качества продукции.

**Основными задачами** исследования являются:

- анализ опыта применения существующих методов определения и контроля параметров структуры текстильных материалов;
- изучение возможности использования явления дифракции света и расчета дифракционных картин по изображению поверхности материала при разработке неразрушающих методов оценки параметров структуры текстильных материалов;
- разработка метода определения распрямленности и ориентации волокон в полуфабрикатах прядильного производства;
- разработка метода определения параметров структуры текстильных нитей;
- разработка алгоритма программного обеспечения для реализации предлагаемых методов;
- производственная апробация разработанных методов оценки параметров структуры текстильных материалов в сравнении с применяемыми и стандартными методами.

**Научная новизна результатов работы:**

1. Предложен метод оценки структурных параметров текстильных материалов путем анализа дифракционных картин, рассчитанных по изображениям их поверхности;
2. Предложен показатель для оценки равномерности структуры волокнистого материала и методика его определения;
3. Разработан неразрушающий способ комплексной оценки структуры полуфабрикатов прядильного производства по изображению их поверхности (Пат. 2463578 РФ);
4. Разработан неразрушающий метод определения величины крутки, диаметра и направления крутки нити по её изображению.

### ***Практическая значимость результатов работы:***

1. Использование разработанных методов позволяет обеспечить оперативный неразрушающий контроль показателей свойств полуфабрикатов прядильного производства, нитей, создает условия для создания систем автоматического регулирования технологических процессов.

2. Предложен алгоритм программного обеспечения для реализации предлагаемых методов, подтвержденный свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ № 2011616181 и № 2012613172 в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

3. Разработанные методики комплексной оценки равномерности структуры полуфабрикатов прядильного производства и определения параметров структуры нитей используются в учебном процессе и при проведении научно-исследовательской работы в СПГУТД и на ООО «Советская звезда».

***Апробация работы.*** Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

- «Современные вопросы науки – XXI век», VII всероссийская научно-техническая конференция (Санкт-Петербург, 2011 г.);
- «Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике» (г. Димитровград, 2012 г.);
- «Инновации молодежной науки», всероссийской научной конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2014 г.)

Общее количество публикаций по теме диссертационной работы – 14, из них 8 статей в журналах, входящих в «Перечень...» ВАК.

***Структура и объем работы.*** Работа состоит из введения, 3 глав с выводами, общих выводов по работе, списка литературы и приложений. Работа изложена на 98 страницах, имеет 38 рисунков, 20 таблиц, 8 приложений, список литературы включает 96 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

***Во введении*** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость. Сформулирована цель и задачи исследования, отражена научная и практическая значимость результатов работы и их производственная апробация и использование.

***Первая глава*** содержит обзор литературных источников, посвященных проблеме определения и контроля параметров полуфабрикатов прядильного производства и крученых нитей. Методам оценки структуры волокнистых материалов и её влиянию на качество продукции посвящены работы В.Е. Зотикова, А.Г. Севостьянова, Н.Н. Труевцева, А.Е. Рудина, И.И. Штута, А.М. Чельшева, И.С. Леонтьевой, П.Г. Шляхтенко, Г.П. Мещеряковой, Н.А. Коробова, Б.Н. Гусева, А.Ю. Матрохина, и других ученых. На основе проведенного анализа установлено, что наиболее эффективным методом обеспечения качества является автоматическое регулирование параметров технологических процессов и свойств полуфабрикатов, использование которого

требует разработки неразрушающих методов контроля параметров волокнистых материалов непосредственно в процессе производства.

Выявлено, что для качества получаемой пряжи и стабильности технологических процессов производства распрямленность и ориентация волокон в полуфабрикатах имеет большое значение. Однако существующие методы оценки этих параметров не обладают достаточной объективностью, имеют существенную погрешность, высокую трудоемкость, являются разрушающими, предусматривающими лабораторные испытания отобранных проб.

На этом основании сделан вывод о целесообразности разработки неразрушающих методов оценки структурных параметров полуфабрикатов прядильного производства и нитей, которые могли бы быть реализованы непосредственно в технологическом процессе.

*Вторая глава* посвящена разработке неразрушающего метода оценки распрямленности и ориентации волокон в полуфабрикатах прядильного производства. В качестве основы для разработки был взят дифракционный лазерный метод анализа строения материала. Данный метод является перспективным при изучении периодических структур, так как позволяет по измеренным значениям расстояний между максимумами в дифракционной картине рассчитывать периодические параметры исследуемой структуры независимо от природы исследуемого материала и его цвета. В полуфабрикатах прядильного производства периодичность в расположении волокон отсутствует. Потому сам факт использование лазерной дифракции для исследования углового распределения волокон в таком материале является принципиально новым.

Основная идея предлагаемого метода основана на том, что текстильное волокно рассеивает свет только в направлении, перпендикулярном его образующей. Из этого следует, что при освещении материала с хаотически расположенными волокнами рассеяние света от материала в любом направлении в горизонтальной плоскости будет приблизительно одинаковым. В противном же случае, по мере распрямления и ориентации волокон вдоль оси продукта рассеяние света в направлении, перпендикулярном его оси, будет увеличиваться, в то время как рассеяние света в направлении параллельном оси продукта будет пропорционально уменьшаться. Таким образом, по изменению светового потока  $\Phi$ , рассеянного волокнистым материалом во всех направлениях, можно судить о характере расположения волокон в исследуемом продукте. Для определения степени изменения светового потока  $\Phi$ , в зависимости от угла рассеяния  $\varphi$  была составлена программа расчета диаграммы распределения освещенности в изображении образца по дифракционной картине. Программа строит в полярных координатах угловую диаграмму распределения освещенности в дифракционной картине, измеренного в секторе площадью  $\Delta S$ , задаваемого значением угла  $\Delta\varphi$  и окружностями с радиусами  $R_1$ ,  $R_2$ , проведенными из центра дифракционной картины.

При хаотической ориентации волокон, рассчитываемая диаграмма приобретает форму, близкую к форме окружности, центр которой совпадает с центром дифракционной картины.

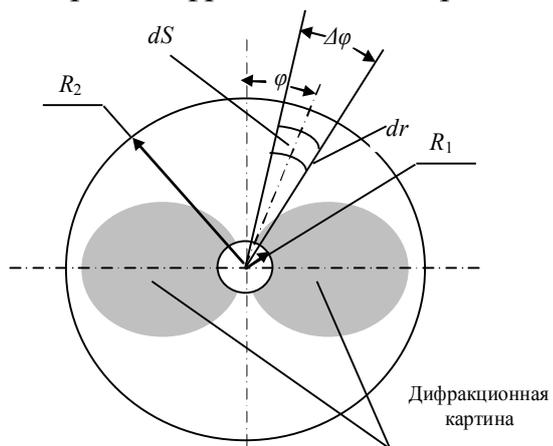


Рисунок 1 – Алгоритм обработки дифракционной картины

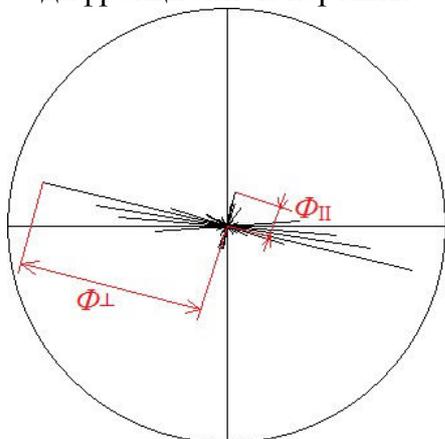


Рисунок 2 – Угловая диаграмма распределения освещенности

В ходе разработки предлагаемого метода для первоначального получения дифракционных картин от поверхностей исследуемых образцов использовалась лабораторная установка, испускающая одномодовый луч гелий-неонового лазера с рабочей длиной волны 632,8 нм.

Данное оборудование является дорогостоящим и нуждается в квалифицированном обслуживании, поэтому с целью упрощения способа получения дифракционной картины было проведено дополнительное исследование возможности использования расчетного метода для построения дифракционной картины на компьютере путем обработки полученного на микроскопе изображения образца.

При наблюдении и получении изображения на микроскопе использовалось освещение исследуемого объекта галогенной лампой накаливания мощностью 20 ватт и с величиной цветовой температуры 2000 кельвин. Для расчета дифракционной картины использовались следующие программы: графический редактор IrfanView; программа компьютерной имитации пятна света на заданном рисунке; программа обработки исходного

В случае же наличия преимущественной ориентации волокон в исследуемом материале вдоль оси продукта диаграмма будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

Зависимость светового потока  $\Phi$  от угла рассеяния  $\varphi$ , испускаемого участком дифракционной картины, ограниченным в полярных координатах углом  $\Delta\varphi$ , и радиусами  $R_1$ ,  $R_2$  (рис. 1), дается формулой (1).

$$\Phi(\varphi) = F(\varphi) \int_{R_1}^{R_2} \frac{I_0 \sin^2\left(\frac{\pi ar}{\lambda L}\right) (\Delta\varphi)^2 r dr}{\left(\frac{\pi ar}{\lambda L}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $F(\varphi) = \Delta N / \Delta\varphi$  – среднее угловое распределение волокон в материале;  $\Delta N$  – число волокон, ориентированных в диапазоне углов от  $\varphi + \pi/2 - \Delta\varphi/2$  до  $\varphi + \pi/2 + \Delta\varphi/2$ ;  $a$  – диаметр волокна;  $\lambda$  – длина световой волны.

Отсюда следует, что функция светового потока пропорциональна угловой плотности волокон в исследуемом продукте.

изображения с целью устранения постоянного светового фона; программа Image-Pro Plus версии 3.0.

На рисунке 3 представлены изображения трикотажного полотна (3-а), а также изображения дифракционных картин, одна из которых наблюдается при лазерном освещении (3-в) участка полотна, представленного на (3-а), а другая рассчитана по изображению этого же участка (3-б).

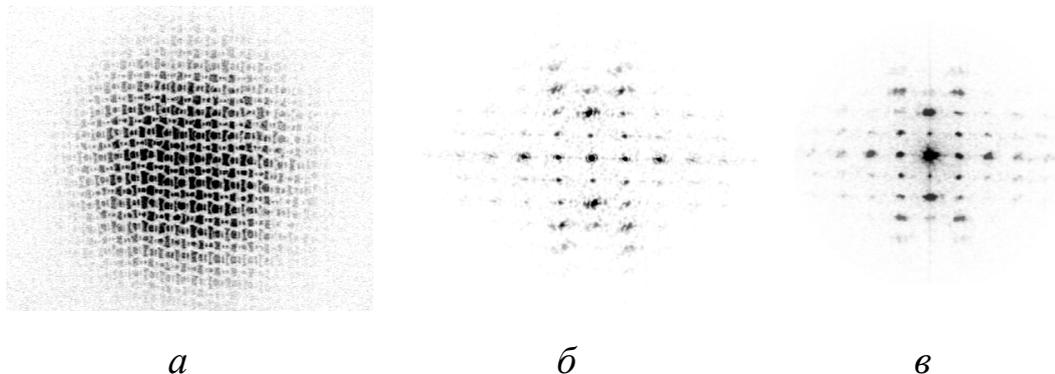


Рисунок 3 – Изображения трикотажного полотна (а) и дифракционных картин: экспериментальной (б) и расчетной (в)

Сравнение основных параметров экспериментальных и расчетных дифракционных картин путем измерения отношения расстояний между горизонтальными и вертикальными рядами дифракционных максимумов показало, что эти отношения совпадают в рамках экспериментальной погрешности, то есть расчетный метод позволяет получать такие же результаты, как и в случае использования He-Ne лазера на установке.

В качестве объектов исследования при разработке метода были отобраны образцы полуфабрикатов из средневолокнистого хлопка на следующих стадиях обработки: лента после кардочесальной машины, ленты с первого и второго переходов ленточной машины прядильной линии “SHIRLEY” (Registered Trademark for the Cotton, Silk and Man-made Fibres Research Association); Oldham, England LTD.

Для оценки равномерности структуры волокнистого материала предлагается использовать показатель, названный коэффициентом упорядоченности структуры волокнистого продукта, величина которого определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_{\parallel}}{\Phi_{\perp}}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{\perp}$  - световой поток, испускаемый участком дифракционной картины в направлении, перпендикулярном направлению движения продукта;

$\Phi_{\parallel}$  - световой поток, испускаемый участком дифракционной картины в направлении, совпадающем с направлением продольной оси материала.

Световой поток определялся по угловой зависимости светового рассеяния (рис. 2), полученной путем обработки изображения дифракционной картины в программе построения круговой диаграммы распределения освещенности заданного рисунка относительно выбранного центра.

Коэффициент упорядоченности структуры продукта является комплексным показателем, так как позволяет одновременно оценить степень распрямленности и ориентации волокон вдоль оси продукта.

Для определения коэффициента упорядоченности структуры полуфабрикатов хлопкопрядильного производства проводилось 30 испытаний. Данный объем обеспечивает доверительную вероятность оцениваемой величины 0,95. По результатам был проведен статистический анализ, включающий расчет средних арифметических значений коэффициента, среднего квадратического отклонения  $S\{\bar{\eta}\}$ , абсолютной доверительной ошибки при определении среднего  $\varepsilon\{\bar{\eta}\}$ , коэффициент вариации  $C\{\bar{\eta}\}$ , относительной доверительной ошибки среднего значения  $\delta\{\bar{\eta}\}$ .

Таблица 1 – Статистическая обработка результатов оценки упорядоченности структуры для полуфабрикатов прядильного производства из средневолокнистого хлопка

Вид полуфабриката	Среднее арифметическое значение $\bar{\eta}$	$\varepsilon\{\bar{\eta}\}$	$\delta\{\bar{\eta}\}, \%$
Лента с кардочесальной машины	0,67	0,01	1,37
Лента с первого перехода ленточной машины	0,71	0,01	1,12
Лента со второго перехода ленточной машины	0,75	0,01	0,67

В связи с отсутствием стандартного метода комплексной оценки структуры волокнистого продукта, в качестве базы для сравнения был принят метод, основанный на определении работы разрыва волокнистого продукта, широко применяемый в практике научных исследований структуры полуфабрикатов прядильного производства. Результаты сравнительных испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки структуры волокнистых продуктов

Вид полуфабриката	Коэффициент упорядоченности, $\bar{\eta}$	Относительная работа разрыва, дж/текс, $A_{Somn.}$
Лента с кардочесальной машины	0,67	$87,2 \cdot 10^{-4}$
Лента с первого перехода ленточной машины	0,71	$52,5 \cdot 10^{-4}$
Лента со второго перехода ленточной машины	0,75	$31,1 \cdot 10^{-4}$

Из данных таблицы видно, что результаты, полученные обоими методами коррелируют между собой и соответствуют изменениям структуры полуфабрикатов прядения, подтвержденным производственной практикой – по мере подготовки полуфабриката к прядению происходит повышение распрямленности и степени ориентации волокон.

На этом основании можно сделать вывод, что предложенный метод может быть использован для комплексной оценки структуры полуфабрикатов прядильного производства.

По результатам исследования была разработана методика проведения испытаний, которая была опробована на образцах полуфабрикатов прядильного производства, выработанных на ООО «Советская Звезда» из партии 493М/J7811237 полиэфирных волокон высшего сорта, линейной плотности 0,134 текс, средней длины 38,6 мм, поставленной из республики Южная Корея. Результаты испытаний и их статистический анализ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистическая обработка результатов определения коэффициентов упорядоченности структуры полуфабрикатов прядильного производства из полиэфирных волокон

Вид полуфабриката	Фирма-производитель машины, модель	Линейная плотность выработанного полуфабриката, ктекс	Среднее арифметическое значение $\bar{\eta}$	$\varepsilon \{ \bar{\eta} \}$	$\delta \{ \bar{\eta} \}, \%$
Лента с кардочесальной машины	Wirkbau (Germany); 1456	4,0	0,68	0,05	6,65
Лента с первого перехода ленточной машины	Rieter (Switzerland); SB-D	3,6	0,77	0,03	4,28
Лента со второго перехода ленточной машины	Howa (Japan) DY-NO5	3,5	0,83	0,03	3,39
Ровница с ровничной машины	СССР; P-168-3	0,3	0,90	0,02	2,25

С целью дополнительной проверки предложенной методики были испытаны образцы полуфабрикатов прядильного производства из средневолокнистого хлопка пятого типа первого сорта, линейной плотности 181 мтекс и штапельной длины 33,2 мм, выработанные на предприятии ООО «Советская Звезда». Основные характеристики полуфабрикатов, результаты испытаний и их статистический анализ представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистическая обработка результатов определения коэффициентов упорядоченности структуры полуфабрикатов прядильного производства из средневолокнистого хлопка

Вид полуфабриката	Фирма-производитель машины, модель	Линейная плотность выработанного полуфабриката, кТекс	Среднее арифметическое значение $\bar{\eta}$	$\varepsilon \{ \bar{\eta} \}$	$\delta \{ \bar{\eta} \}, \%$
Лента с кардочесальной машины	Wirkbau (Germany); 1456	5,8	0,79	0,04	4,63
Лента с первого перехода ленточной машины	Rieter (Switzerland); SB-D	3,8	0,87	0,02	2,28
Лента со второго перехода ленточной машины	Howa (Japan) DY-NO5	3,9	0,90	0,01	1,66
Ровница с ровничной машины	СССР; P-168-3	0,7	0,92	0,01	1,08

Аналогичные исследования были проведены на полуфабрикатах прядильного производства из тонковолокнистого хлопка высшего сорта гребенной системы прядения, выработанных на ОАО «ПНК им. Кирова».

Основные характеристики полуфабрикатов, результаты испытаний и их статистический анализ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Статистическая обработка результатов определения коэффициентов упорядоченности структуры полуфабрикатов из тонковолокнистого хлопка прядильного производства ОАО «ПНК им. Кирова»

Вид полуфабриката	Фирма-производитель машины, модель	Линейная плотность выработанного полуфабриката, кТекс	Среднее арифметическое значение $\bar{\eta}$	$\varepsilon \{ \bar{\eta} \}$	$\delta \{ \bar{\eta} \}, \%$
Лента с кардной чесальной машины	Румыния; 4С	3,6	0,72	0,03	4,84
Лента с предварительной ленточной машины	Howa (Japan); LX-1	3,6	0,86	0,02	2,90
Лента с гребнечесальной машины	Howa (Japan); КЧХ-1 м.178	4,1	0,91	0,01	1,18
Лента с первого перехода ленточной машины	Howa (Japan); DF-800	4,5	0,92	0,01	1,28
Лента со второго перехода ленточной машины	Howa (Japan); DF-800	4,3	0,94	0,01	0,99
Ровница с ровничной машины	Ташкент; Р-192-3	0,4	0,95	0,01	1,15

По результатам испытаний полуфабрикатов прядильного производства был построен график, характеризующие изменение значений коэффициентов упорядоченности структуры полуфабрикатов в цепочке технологических процессов их переработки, который изображен на рисунке 4.

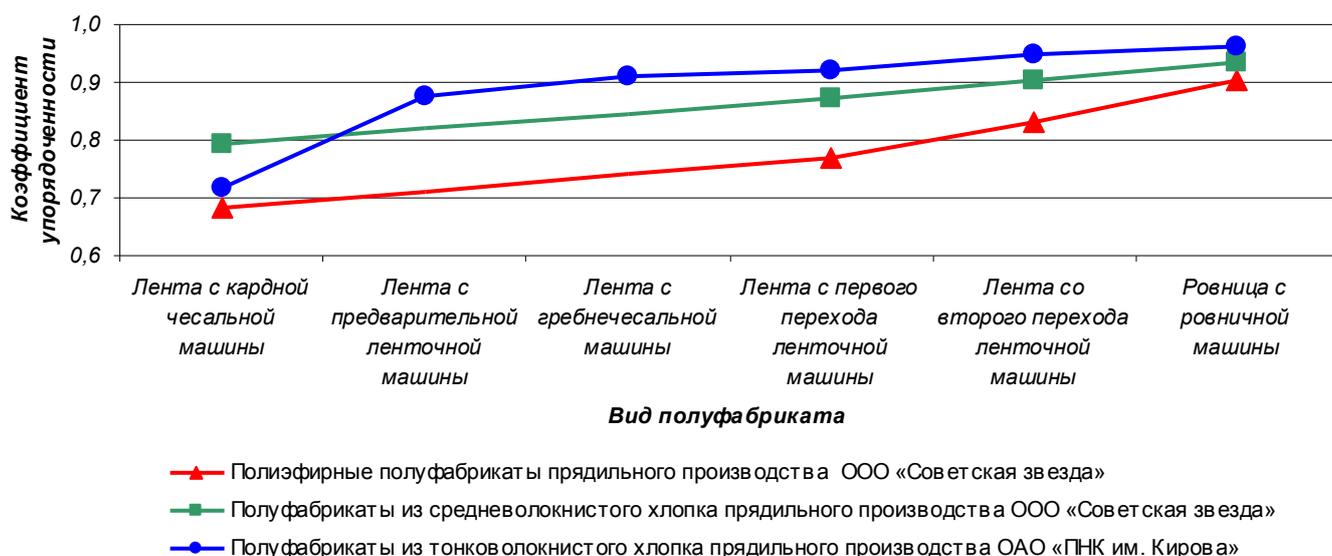


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента  $\eta$  от стадии обработки полуфабриката на прядильном производстве ООО «Советская звезда» и ОАО «ПНК им. Кирова»

Также был построен график, характеризующий изменение значений коэффициентов вариации по показателю коэффициентов упорядоченности, который представлен на рисунке 5.

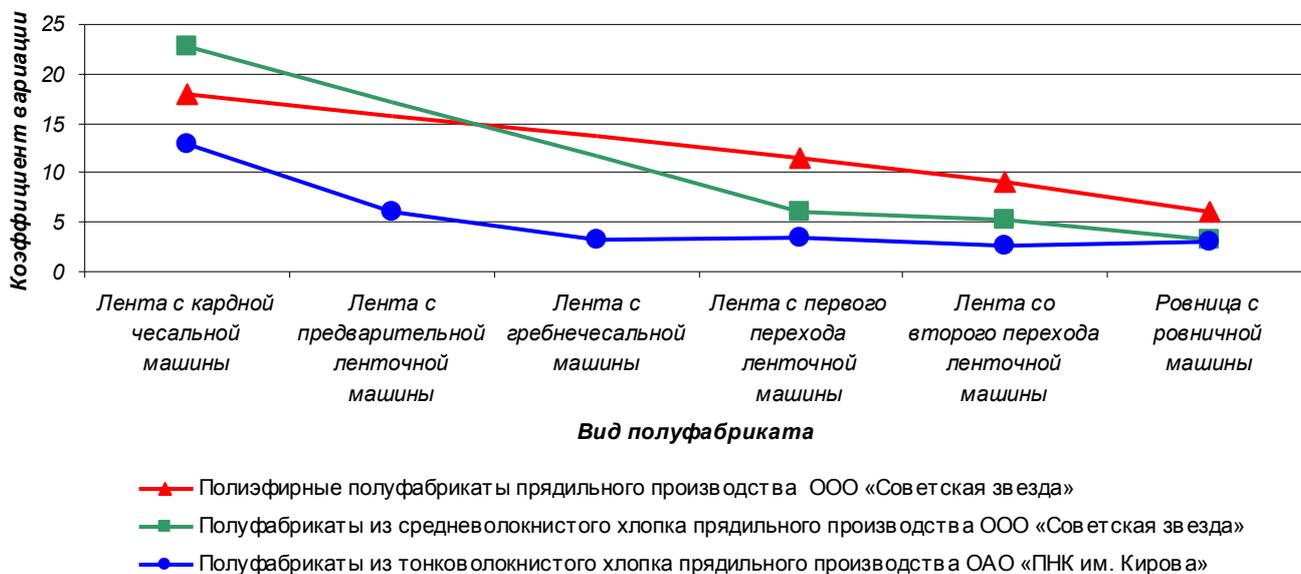


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента вариации коэффициента  $\eta$  от стадии обработки полуфабриката на производстве ООО «Советская звезда» и ОАО «ПНК им. Кирова»

Как видно из графиков, по мере переработки полуфабрикатов равномерность их структуры закономерно возрастает, а разброс исследуемого показателя уменьшается.

Результаты проведенного исследования позволяют рекомендовать разработанный метод для практического использования. С этой целью был разработан стандарт СПГУТД на метод комплексной оценки равномерности структуры волокнистого материала.

**Третья глава** посвящена разработке неразрушающего метода определения величины крутки, направления крутки и диаметра нити, основанного на установлении зависимости величины расстояний между максимумами в дифракционной картине от параметров исследуемой нити.

Так как при наблюдении и получении снимков нити на микроскопе существенное значение имеет направление освещения объекта, то при разработке методики и оценки возможностей метода было проведено исследование трех возможных способов освещения нити.

На рисунке 6 представлена схема установки, состоящей из предметного столика 2, микроскопа 3 и подключенного к микроскопу компьютера 4. На этом рисунке показаны три использованных способа освещения образца нити 1 и дифракционные картины для каждого способа освещения: *а* – боковое освещение параллельным пучком света направленным под углом в  $45^{\circ}$  к горизонтальной плоскости, проходящей через продольную ось нити; *б* – освещение вдоль продольной оси нити под углом  $\alpha = 45^{\circ}$  к горизонтальной плоскости расположения нити; *в* – освещение «напросвет», т.е. снизу, перпендикулярно оси нити.

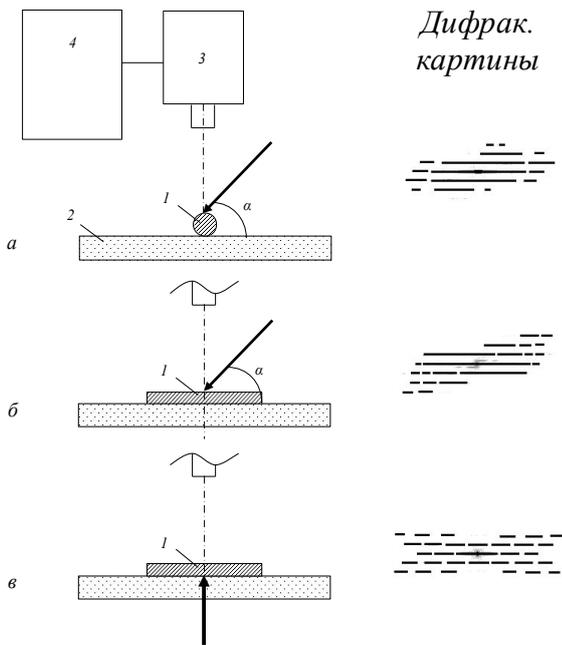


Рисунок 6 - Схема установки

картина обладает симметрией и необходимой четкостью.

Для проверки связи асимметрии дифракционной картины с направлением крутки нити, были проведены испытания для образцов нити, отличающихся направлением крутки. В качестве модельного образца использовалась металлическая нить, скрученная из двух стренг диаметром 0,15 мм. На рисунке 6 представлены дифракционные картины для металлической нити, скрученной из двух стренг с разными направлениями крутки:  $s$  (а) и  $z$  (б).

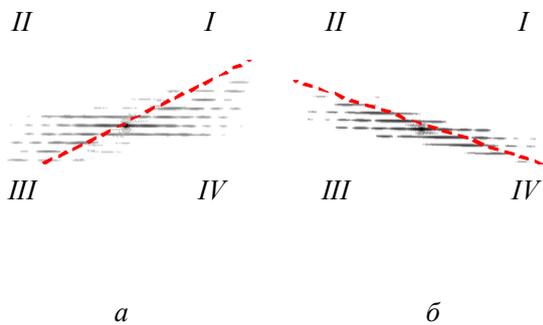
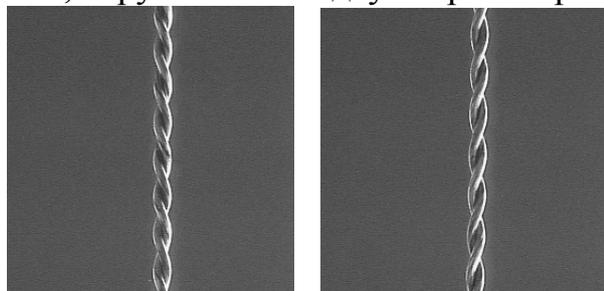


Рисунок 7 - Сравнительные дифракционные картины от металлической нити, скрученной из двух стренг

При боковом освещении нити (рис. 6-а) расстояние между горизонтальными рядами максимумов такое же, как и в иных случаях освещения, но в горизонтальных рядах эти максимумы перекрываются. В то же время в случае освещения в плоскости нити (рис. 6-б) в рассчитанной дифракционной картине наблюдается характерная асимметрия дифракционных максимумов относительно направления нити, которую можно связать с направлением крутки нити. Освещение снизу (рис. 6-в) целесообразно использовать при определении таких параметров как крутка и диаметр нити, так как соответствующая дифракционная

Аналогичное было сделано для нити скрученной из трех стренг. На рисунке 7 диагональю на дифракционной картине показано направление наибольшего рассеяния света от крученой нити. Видно, что для нити с  $z$ -круткой характерно наибольшее рассеяние света в направлении второй и четвертой четверти от центра (рис. 7-б). В то время как для нити с  $s$ -крутки (рис. 7-а) максимум рассеяния света приходится на первую и третью четверть. Таким образом, определив направление наибольшего рассеяния по дифракционной картине можно определить направление крутки нити. Определение направления крутки данным методом может быть автоматизировано после разработки соответствующей программы.

В работе П.Г. Шляхтенко в дифракционной картине расстояние между соседними минимумами в горизонтальных рядах  $\Delta x$  связывалось с величиной максимального видимого диаметра при боковом наблюдении нити  $d$  (рис. 8), а расстояние по вертикали между горизонтальными соседними рядами дифракционных максимумов  $\Delta y$  - с шагом крутки нити  $t$  формулами:

$$d = C / \Delta x, \quad (3)$$

$$t = C / \Delta y, \quad (4)$$

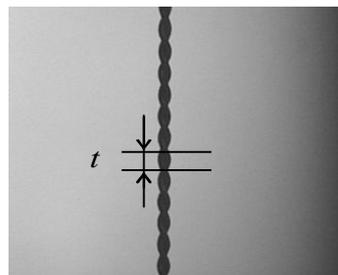


Рисунок 8 – Изображение металлической нити и соотв. дифракционная картина

где  $C$  – константа, связанная с увеличением изображения и параметрами, заложенными в программу построения дифракционной картины. Она определяется независимым методом по измерениям на известном эталоне.

Было проведено исследование в предположении применимости формул. Расчет показал, что в исследованном диапазоне средний диаметр нити, скрученной из двух стренг составил  $d = (0,30 \pm 0,05)$  мм, а скрученной из трех стренг -  $d = (0,36 \pm 0,02)$  мм, что соответствует прямому измерению величин.

Была исследована зависимость расстояния  $\Delta y$  между рядами дифракционных максимумов от величины крутки нити  $K$ .

Для оценки тесноты и характера связи величин были проведены исследования на образцах металлической нити, скрученной из двух и трех стренг в широком диапазоне значений крутки  $K$ . На рисунке 9 приведена зависимость величины крутки  $K$  от  $\Delta y$  для металлической нити из двух стренг.

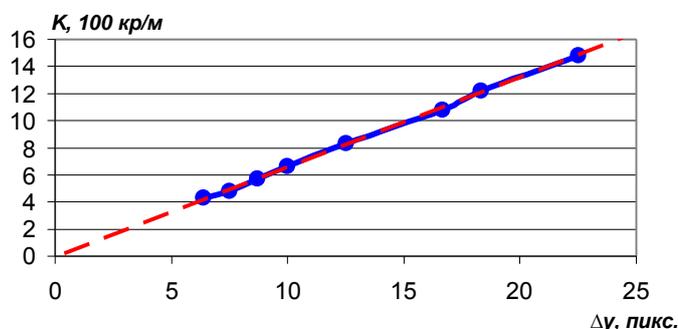


Рисунок 9 – Зависимости  $\Delta y$  от величины крутки  $K$  для металлической нити из двух стренг

Построенная зависимость хорошо аппроксимируется прямой, проходящей через начало координат. Аналогичный результат получен и для скрученной нити из трех стренг с учетом полученных данных.

Для оценки меры качества аппроксимационной модели, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели, был рассчитан коэффициент детерминации. Результаты расчета показали, что для аппроксимационной модели для нити из двух стренг и трех стренг коэффициент детерминации равен  $R^2 = 0,9976$  и  $R^2 = 0,9984$ , соответственно.

Близость значения коэффициентов к единице свидетельствует о правильном предположении о линейной зависимости величин.

Для определения крутки нити по параметрам дифракционной картины с учетом формулы (4) и полученных аппроксимирующих функций была получена следующая формула:

$$K = \frac{\Delta y}{n \cdot C}, \quad (5)$$

где  $K$  – крутка нити, 1/м;  $\Delta y$  - расстояние по вертикали между горизонтальными соседними рядами дифракционных максимумов, пикселей;  $C$  – константа, связанная с увеличением микроскопической установки;  $n$  – число стренг.

Были проведены сравнительные испытания на образцах крученых нитей различной крутки и линейной плотности. Крутка определялась стандартным методом удвоенного кручения на круткомере и предложенным методом. Результаты измерений и статистической обработки представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты сравнительных испытаний крутки нитей стандартным и предложенным методом

Нить	Метод	Лин. пл., текс	Состав	К, кр/м	$S\{K\}$	$\varepsilon\{\bar{K}\}$	$C\{K\}, \%$	$\delta\{\bar{K}\}, \%$
1	Круткомер	45	Вискозное волокно	175	18,73	9,41	5,34	2,68
	Неразруш.			180	7,10	3,56	3,95	1,98
2	Круткомер	30	Вискозное волокно	480	24,28	12,19	4,12	2,07
	Неразруш.			479	11,59	5,82	2,42	1,21
3	Круткомер	37,5	Вискозное волокно	250	5,32	2,67	18,79	9,44
	Неразруш.			255	14,73	7,39	5,78	2,90
4	Круткомер	35	Вискозное волокно	215	8,05	4,04	12,43	6,24
	Неразруш.			212	14,68	7,37	6,92	3,48
5	Круткомер	30	ПЭ	524	14,76	7,41	6,78	3,40
	Неразруш.			522	9,20	4,62	1,76	0,89
6	Круткомер	30	ПЭ	523	36,05	18,09	2,77	1,39
	Неразруш.			512	10,79	5,42	2,11	1,06
7	Круткомер	30	ПЭ	482	26,79	13,41	3,73	1,87
	Неразруш.			478	18,89	9,49	3,95	1,98

Для определения статистической значимости разницы между значениями крутки, полученными разными методами, был использован критерий Стьюдента. При доверительной вероятности  $R_d=0,95$  был сделан вывод о том, что разница в значениях крутки является статистически незначимой. Полученные результаты позволяют рекомендовать предлагаемый метод определения крутки для практического использования. С этой целью был разработан стандарт СПГУТД на метод определения крутки нити.

### **Основные выводы**

1. Установлено, что существующие методы определения свойств текстильных материалов обладают существенными недостатками и наиболее перспективными для разработки являются неразрушающие методы контроля параметром материала непосредственно в процессе производства.
2. Показано, что расчет дифракционной картины на компьютере позволяет получать такие же результаты, как и при использовании лазерной установки, что открывает новые возможности при разработке неразрушающих методов определения параметров структуры волокнистых материалов.

3. Разработан неразрушающий способ комплексной оценки структуры полуфабрикатов прядильного производства, основанный на анализе рассчитанной дифракционной картины от микроизображения поверхности образца (патент РФ № 2463578).
4. Предложен алгоритм программного обеспечения для реализации предлагаемого метода, подтвержденный свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ № 2011616181 и № 2012613172 в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.
5. Предложен показатель для оценки равномерности структуры волокнистого материала и методика его определения.
6. Проведено исследование структуры полуфабрикатов прядильного производства различных систем прядения и сырьевого состава, которое показало эффективность использованного метода и меньшую трудоемкость по сравнению с существующими методами.
7. Разработан неразрушающий метод определения диаметра, крутки и направления крутки нити, основанный на анализе рассчитанной дифракционной картины от изображения поверхности нити.
8. Проведены сравнительные испытания крутки нитей различной линейной плотности и волокнистого состава, результаты которых подтвердили эффективность предложенного метода.

**Автор** выражает глубокую благодарность за помощь при выполнении диссертационной работы сотрудникам кафедры механической технологии волокнистых материалов СПГУТД; ООО «Советская звезда» и ОАО «ПНК им. Кирова».

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

**Статьи в журналах, входящих в «Перечень...» ВАК РФ:**

1. Шляхтенко, П.Г. Безаппаратный метод дифракционного контроля углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала по компьютерным изображениям / П.Г. Шляхтенко, П.А. Сухарев, А.Е. Рудин, В.П. Нефедов, Ю.Н. Ветрова // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2011. – № 4. – С. 62 – 67.
2. Шляхтенко, П.Г. Дифракционный метод контроля углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала / П.Г. Шляхтенко, В.П. Нефедов, Ю.Н. Ветрова, А.Е. Рудин, П.А. Сухарев // Оптический журнал. – 2012. – № 79. – С. 96 – 100.
3. Шляхтенко, П.Г. Дифракционный метод наблюдения углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала / П.Г. Шляхтенко, В.П. Нефедов, Ю.Н. Ветрова, А.Е. Рудин, П.А. Сухарев // Журнал оптической технологии. – СПб, 2012. Том 79; Выпуск 9. – С. 599–602.
4. Сухарев, П.А. Безаппаратный метод дифракционного контроля параметров текстильного материала по компьютерным изображениям его поверхности / П.А. Сухарев, П.Г. Шляхтенко, А.Е. Рудин, О.В. Кофнов // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. – № 1. – С. 23 – 25.
5. Шляхтенко, П.Г. Дифракционный контроль параметров крученой текстильной нити по компьютерному изображению её поверхности / П.Г.

Шляхтенко, П.А. Сухарев // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – Иваново. – 2013. – № 4. – С. 18 – 21.

6. Сухарев, П.А. Зависимость вида дифракционных картин нитей от направления их крутки / П.А. Сухарев, П.Г. Шляхтенко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. – № 2. – С. 97 – 98.

7. Кофнов, О.В. Безаппаратный метод автоматического контроля направления крутки нити по её компьютерному изображению / О.В. Кофнов, П.А. Сухарев, П.Г. Шляхтенко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. – № 2. – С. 79 – 81.

8. Шляхтенко, П.Г. Метод определения перекоса уточной нити в ткани / П.Г. Шляхтенко, О.В. Кофнов, П.А. Сухарев // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2014. – № 2. – С.76 – 79.

**Статьи в научных сборниках, тезисы докладов, патенты РФ и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

9. Сухарев, П.А. Исследование дифракции по изображениям поверхности волоконсодержащего материала на прозрачной подложке / П.А. Сухарев, П.Г. Шляхтенко, А.Е. Рудин // Современные вопросы науки – XXI век: доклад Международной заочной научно-практической конференции. – Тамбов: 2011. – Вып. 7. – Ч. 6. – С. 136 – 137.

10. Сухарев, П.А. Безаппаратный метод компьютерного Фурье анализа изображений поверхности для контроля параметров текстильных материалов / П.А. Сухарев, П.Г. Шляхтенко, А.Е. Рудин, О.В. Кофнов // Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике: доклад всероссийской научно-технической конференции. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 4 – 7.

11. Крылова, П.Б. Исследование применения дифракционного метода для оценки распрямленности и ориентации волокон в продуктах прядения / П.Б. Крылова, Ю.Н. Ветрова, П.А. Сухарев // Инновации молодежной науки: доклад всероссийской научной конференции молодых ученых. – Санкт-Петербург: СПГУТД, 2014. – С. 228.

12. Пат. РФ 2463578, МПК<sup>7</sup> G01 N21/00, 33/34, 33/36. Способ контроля анизотропии углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала. / П.Г. Шляхтенко, В.П. Нефедов, Ю.Н. Ветрова, А.Е. Рудин, П.А. Сухарев; заявитель и патентообладатель СПГУТД. – 2011118708; заявл. 10.05.2011; опубл. 10.10.2012 // БИ № 28.

13. Св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2011616181, РФ. Программа расчета угловой диаграммы распределения освещенности в изображении / П.Г. Шляхтенко, В.П. Нефедов, П.А. Сухарев // Опубл. в бюл. «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем». – № 4. – 2011.

14. Св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2011616181, РФ. Программа исключения постоянной составляющей освещенности на чёрно-белых изображениях при дифракционном анализе / П.Г. Шляхтенко, В.П. Нефедов, П.А. Сухарев // Опубл. в бюл. «Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем». – № 2. – 2012.