

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна

На правах рукописи



Кофнов Олег Владимирович

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент

Пименов В.И.

Санкт-Петербург – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ и формальная постановка задачи определения геометрических параметров периодической структуры материалов.....	13
1.1 Анализ параметров материалов с периодической структурой	13
1.2 Основные геометрические параметры структуры материалов.....	16
1.3 Современные промышленные методы определения геометрических параметров текстильных материалов.....	23
1.3.1 Современные бесконтактные методы определения геометрических параметров структуры материала.....	27
1.3.2 Оптические методы оценивания величин параметров структуры текстильных материалов	30
1.4 Методы, основанные на анализе изображений материалов и распознавании образов.....	32
1.4.1 Дифракционные методы анализа структуры текстильных материалов	35
1.4.2 Явление дифракции. Формулы для расчета дифракционных картин	37
1.5 Формальная постановка задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой	40
Выводы к главе 1	41
2 Модель процесса обработки цифровых изображений для определения геометрических параметров материалов с периодической структурой.....	43
2.1 Анализ процесса автоматизированного определения геометрических параметров микроструктуры.....	43
2.2 Дифракция света на материалах с периодической структурой	45
2.2.1 Дифракция света на моноволокнах и крученых нитях.....	52
2.2.2 Дифракция света на нитях утка и основы ткани	58
2.2.3 Дифракция на трикотажных материалах.....	62
2.2.4 Получение дифракционных картин материалов, не пропускающих свет. Дифракционные картины от изображений.....	65

2.3 Модель обработки цифрового изображения на основе анализа дифракционных картин для оценивания геометрических параметров структур материалов	69
Выводы к главе 2	75
3 Алгоритмическое обеспечение системы бесконтактного определения геометрических параметров структуры материалов	77
3.1 Алгоритм построения дифракционной картины по микроизображению материала с помощью быстрого Фурье-преобразования.....	77
3.2 Алгоритмы оценивания геометрических параметров структур материалов по распределению интенсивности в расчетных дифракционных картинах.....	87
3.2.1 Алгоритм подготовки изображения нити.....	87
3.2.2 Распределение интенсивности по квадрантам изображения и определение направления крутки.....	89
3.2.3 Диаграмма распределения интенсивностей в полярных координатах. Алгоритмы определения угла кручения нити и перекося уточной нити в ткани...	91
3.3 Алгоритм использования способа двойного Фурье-преобразования для определения периодических расстояний.....	97
Выводы к главе 3	105
4 Разработка экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой.....	107
4.1 Архитектура экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой.....	107
4.2 Программное обеспечение экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой.....	110
4.2.1 Программа моделирования изображения крученой нити	115
4.2.2 Программа моделирования изображения ткани	118

4.3 Практическое использование экспериментального образца системы для определения геометрических параметров структуры материалов	123
4.3.1 Практическое определение расстояний между периодическими элементами в структуре текстильного материала.....	123
4.3.2 Практическое определение направлений крутки нитей.....	132
4.3.3 Практическое определение угла кручения нитей.....	135
4.3.4 Практическое определение перекоса	140
4.3.5 Демонстрация практического применения метода «двойного» Фурье-преобразования.....	144
4.3.6 Определение точности измерения угла кручения нити при использовании диаграммы распределения интенсивности.....	149
Выводы к главе 4	150
Заключение	152
Список литературы	157
Приложение А Копии патентов на изобретения и свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.....	168

Введение

Преобладающее большинство материалов представляет собой объекты со структурой, состоящей из повторяющихся элементов. Периодической может быть как внутренняя структура материала, так и наблюдаемая поверхностная структура готового изделия. В качестве примера можно привести композиционные материалы и метаматериалы, катушки индуктивности с намотанной витками проволокой, повторяющуюся последовательность шероховатостей на поверхности деталей машин и, конечно, полуфабрикаты и изделия текстильной промышленности, представляющие собой упорядоченное переплетение волокон и нитей.

Производство текстильных материалов является одной из старейших отраслей промышленности. Ставшая ещё в XVIII-ом веке уже не ремеслом, а видом индустрии, текстильная промышленность потребовала как совершенных методов производства изделий, так и промышленных методов контроля выпускаемой продукции на всех этапах производства. Богатая история и высокая конкуренция, обусловленная высокой потребностью в данном виде товаров и наличием огромного количества независимых производителей, привели к использованию в этой области самых передовых и современных технологий. Казалось бы, невозможно предложить что-либо новое в такой области. Однако и здесь при нынешнем развитии науки и техники есть достаточно возможностей для инноваций, о чем свидетельствует значительное количество издаваемых периодических журналов и публикаций в них не только в России, но и во всём мире, в первую очередь в таких активно промышленно и научно развивающихся странах, как Индия и Китай.

И это связано не только с использованием в данной области новых видов материалов, таких как углеволокно, графен и пр., но и с совершенствованием уже существующих методов, а также привлечением в данную область методов и технологий из других областей знаний, в том числе самых отдалённых. Данная работа посвящена использованию компьютерного моделирования явления дифракции света для определения величин различных геометрических параметров

периодических структур материалов (на примере текстильных материалов). Практичность дифракционных методов подробно рассмотрена в [1]. Кроме того существует ряд изобретений и запатентованных приборов на их основе, использующих явление дифракции для измерения и контроля тех или иных геометрических параметров.

Отличие данной работы прежде всего в том, что основной упор делается не на получении дифракционных картин путём освещения образцов пучком монохромного света в специальных установках, а производится построение и последующий анализ математической модели дифракционной картины. Разработаны способы определения величин геометрических параметров структур материалов с использованием таких моделей, а также алгоритмы их реализации. Эти алгоритмы реализованы в экспериментальном образце разработанной бесконтактной системы оценивания параметров текстильных материалов. Очевидно, что такая система намного эффективней, дешевле и практичней для применения в промышленном производстве, чем использование специальной установки с лазером для получения дифракционных картин.

Необходимо подчеркнуть, что важным отличием дифракционных способов, описываемых в данной работе, является то, что все они не требуют для проведения измерения разрушения образца контролируемого материала, в отличие от большинства традиционных методов, применяющихся для тех же целей. Таким образом, исключается расход производимого материала на цели контроля качества.

Актуальность темы исследования. Определение величин геометрических параметров материалов с периодической структурой выполняется с целью обеспечения надлежащего качества изделий. Применяемые в настоящее время способы либо используют ручной труд и требуют разрушения образца исследуемого материала, либо связаны с применением дорогостоящих оптико-электронных установок. Поэтому актуальной является задача разработки методов и алгоритмов бесконтактной автоматизированной оценки геометрических

параметров по цифровым фотографиям материала с периодической структурой с использованием общедоступных устройств.

Степень теоретической разработанности темы исследования.

Дифракционные методы оценивания параметров структуры материалов ранее рассматривались в работах Парамонова А. В., Радзивильчук Л. И., Durand В. и др. В СПбГУПТД методы, основанные на явлении оптической дифракции, разрабатывались Труевцевым Н.Н., Рудиным А.Е., Шляхтенко П.Г. и Сухаревым П.А.

Цель исследования заключается в повышении оперативности и сокращении затрат на определение величин параметров структуры материала в процессе контроля его качества на основе разработки модели, алгоритмов и способов измерения, расчета и анализа соответствующих компьютерных изображений при оценивании геометрических параметров периодических структур материалов.

Задачи исследования

1. Анализ существующих методов определения геометрических параметров материалов с периодической структурой (на примере текстильных материалов).
2. Разработка модели обработки цифровых изображений материалов с периодической структурой и алгоритма моделирования процесса дифракции монохроматического света на этой структуре.
3. Разработка алгоритмов нахождения величин основных геометрических параметров структур материалов на основе математических моделей дифракционных картин.
4. Разработка и исследование экспериментального образца программно-аппаратного комплекса, реализующего бесконтактные способы и алгоритмы оценивания основных геометрических параметров материалов с периодической структурой (на примерах образцов текстильных материалов).

Научная новизна работы

1. Аналитическая модель обработки цифровых изображений материалов с периодической структурой и алгоритм моделирования дифракции

монохроматического света с использованием быстрого преобразования Фурье для расчета интеграла Френеля-Кирхгофа (дифракция Фраунгофера), использование которых сокращает время численного интегрирования для функции интенсивности поля световых сигналов, заданного на двумерной поверхности, что позволяет повысить оперативность и снизить затраты дифракционных методов за счет замены аппаратных оптических устройств компьютерными моделями.

2. Алгоритмы определения геометрических параметров структуры текстильной нити и ткани, отличающиеся применением угловой диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов в построенной модели процесса дифракции и позволяющие повысить оперативность автоматического измерения угловых величин в периодических структурах материалов.

3. Алгоритм, реализующий способ двойного преобразования Фурье, отличающийся определением линейных геометрических параметров структуры материалов с точностью до значения, определяемого коэффициентом увеличения при фотосъемке. Компьютерное моделирование процесса формирования дифракционных картин повышает оперативность оценивания величин параметров материала и снижает затраты на использование аппаратных средств.

4. Разработан экспериментальный образец программно-аппаратной системы бесконтактного определения основных геометрических параметров повторяющихся структур с использованием алгоритмов построения и анализа моделей дифракционных картин. Предлагаемая система (в отличие от ранее разработанных) позволяет осуществлять контроль качества разных видов материалов с периодической структурой и не зависит от способа получения их изображений.

Теоретическая и практическая значимость выражены в разработке аналитической модели и алгоритмов обработки изображений материалов с периодической структурой для оценивания угловых и линейных геометрических параметров структур таких материалов и в создании на основе разработанных алгоритмов экспериментального образца системы бесконтактного оценивания

геометрических параметров структуры материалов по микроизображениям их поверхности. Система автоматически анализирует моделируемые изображения дифракционных картин, что ставит её в ряд программного обеспечения систем машинного видения и распознавания образов. Система позволяет производить измерения как полностью автоматически, так и с участием пользователя, для чего имеется широкий набор настроек и вспомогательных сервисных функций дополнительной обработки изображений.

Методы исследования. Методы проведённого научного исследования базировались на теории дифракции, принципах Фурье-оптики, теории текстильного материаловедения, методах математического и компьютерного моделирования, цифровой обработки изображений, постановки численных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель изображения дифракционной картины и алгоритм её реализации в приближении Фраунгофера обеспечивают определение величин параметров материала, имеющего периодическую структуру.
2. Алгоритмы построения и анализа угловой диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов позволяют определить угловые геометрические параметры: направление и величину угла кручения нитей, а также дефект перекося нитей в ткани.
3. Алгоритм определения линейных геометрических параметров позволяет увеличить точность измерения периодических расстояний между элементами структур материалов с использованием способа двойного Фурье-преобразования.
4. Экспериментальный образец программно-аппаратной системы бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой с использованием разработанных алгоритмов обеспечивает повышение оперативности и сокращение затрат на анализ параметров структуры материала.

Степень достоверности и апробация результатов выносимых на защиту научных положений обеспечены: обстоятельным и сравнительным анализом

ранее предлагавшихся дифракционных методов определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой; преемственностью основных научных положений, сформулированных автором; разработкой теоретических положений теории дифракции и Фурье-оптики; анализом и сравнением существующих способов определения параметров структур материалов с предлагаемыми способами; практическими результатами определения геометрических параметров структур материалов с использованием разработанных алгоритмов; патентами Российской Федерации на способы измерений, полученные автором. Основные научно-практические положения работы апробированы в печатных трудах и докладах как на всероссийских, так и на международных конференциях. Программное обеспечение экспериментального образца системы бесконтактного оценивания геометрических параметров структуры текстильных материалов реализовано на языке программирования *MS Visual C++* с использованием платформы *.Net 3.5*. Программное обеспечение экспериментального образца может быть использовано на любом типе ЭВМ под управлением *MS Windows* версии *XP* и более новых операционных систем, включая *Windows 8*. Указанный экспериментальный образец может служить прототипом промышленных систем контроля, используемых в реальном производственном процессе.

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике» (г. Димитровград, 2012 г.); веб-конференции *Second Frontiers of Microscopy Virtual Conference (Materials Today, 2013)*; Всероссийской научной конференции молодых ученых «Инновации молодежной науки» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); 2-й международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития математических и естественных наук» (г. Омск, 2015 г.).

По материалам исследований опубликовано 16 статей, в том числе 10 в журналах из Перечня ВАК; получено 2 патента на изобретения и зарегистрировано 4 компьютерные программы.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, общего заключения по всей работе, библиографического списка и приложений, содержит 167 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 13 таблиц, 4 графика. Библиография включает 96 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена ее цель и сформулированы задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации результатов.

В первой главе представлены результаты патентного поиска, анализа научно–технической информации, в том числе зарубежной, посвященной методам определения геометрических параметров различных текстильных материалов. Проанализированы методы, изложенные в соответствующих государственных и международных стандартах. Указаны основные недостатки этих методов и обрисованы в общих чертах преимущества оптических (дифракционных) методов. Дифракционные методы определения геометрических параметров структуры текстильных материалов ранее рассматривались в работах Корнюхиной Т.А., Борзунова И.Г., Парамонова А.В., Радзивильчук Л.И., Дружининой Н.Г., Труевцева Н.Н., Шляхтенко П.Г., Ветровой Ю.Н. и Сухарева П.А.

Во второй главе подробно рассмотрена модель процесса обработки цифровых изображений периодических структур материалов для оценивания величин их геометрических параметров с использованием алгоритма моделирования изображения дифракционной картины. Рассмотрены особенности дифракции света на различных периодических структурах.

Выявлены основные закономерности распределения дифракционных максимумов, образуемых на удаленном экране при освещении образцов тканей, крученых нитей и трикотажа пучком монохромного света.

Предложена структурная схема программно-аппаратной системы, позволяющей осуществлять математическое моделирование явления дифракции на структурах материалов и автоматизированный анализ смоделированных

дифракционных картин. Изображения дифракционных картин, полученные при моделировании, идентичны дифракционным картинам текстильных материалов, полученным на оптических установках.

В третьей главе изложены алгоритмы реализации модели изображения дифракционной картины и измерения угловых и линейных геометрических параметров материалов с периодической структурой. Описан предлагаемый алгоритм быстрого двумерного дискретного преобразования Фурье для вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа. Этот алгоритм позволяет оперативно рассчитывать дифракционные картины по изображениям материалов с периодической структурой. Предложены алгоритмы обработки получаемых дифракционных картин на основе анализа распределения интенсивности пикселей компьютерного изображения. Изложен разработанный алгоритм двойного преобразования Фурье и обоснованы его преимущества перед обычными дифракционными способами. Предложена архитектура системы оценивания геометрических параметров по цифровым изображениям структуры материалов.

В четвертой главе описан экспериментальный образец программно-аппаратной системы оценивания геометрических параметров структуры материалов. Продемонстрировано использование разработанного экспериментального комплекса для исследования структуры различных видов текстильных материалов. Приведены результаты измерений как параметров моделей материалов, так и образцов реальных нитей и полотен, выпускаемых промышленностью.

В заключении подведён итог проделанной работе и обосновано достижение заданного критерия совершенствования и перспективы дальнейших исследований в данной области.

1 Анализ и формальная постановка задачи определения геометрических параметров периодической структуры материалов

В целях обеспечения надлежащего качества производимых материалов необходимо осуществлять автоматическое и полуавтоматическое (с частичным участием пользователя) определение величин угловых и линейных геометрических параметров структур материалов. Применительно к рассматриваемым в качестве примера текстильным материалам это – углы кручения нитей, расстояния между нитями в переплетении, угол перекоса нитей и так далее.

1.1 Анализ параметров материалов с периодической структурой

Существуют различные виды классификации текстильных материалов [2-4]. Очевидно, что различные виды классификации выбираются в зависимости от задач анализа свойств материалов для тех или иных целей.

В [1] классификация текстильных материалов построена в соответствии с их геометрической микроструктурой. Известно, что текстильные материалы представляют собой структуры, образованные переплетением волокон и нитей. Нити, в свою очередь, также представляют собой в общем случае переплетения волокон. Геометрия таких переплетений и обусловленное ею взаимодействие волокон в материале определяет ряд основных характеристик материала: разрывную прочность, жесткость, плотность, воздухопроницаемость и пр.

Текстильные волокна представляют собой протяженные гибкие и прочные тела ограниченной длины, с очень малыми поперечными размерами, пригодные для изготовления текстильных материалов [3]. Характеристики совокупности волокон существенно отличаются от характеристик отдельных волокон, хотя и зависят от них. Например, разрывная прочность отдельного волокна весьма низкая, однако переплетённые волокна образуют весьма прочный материал.

По геометрической структуре текстильные материалы можно разделить на две основные группы:

- материалы, не имеющие периода повторения геометрических параметров макроструктуры;
- материалы, обладающие такой периодичностью.

К первой группе можно отнести монопилы, полуфабрикаты прядильного производства, нетканые текстильные материалы. Волокна в этих материалах либо не упорядочены вовсе, либо имеют относительно невысокую степень упорядоченности. Сказанное не относится к монопилам, которые представляют собой сформованные из расплава затвердевшие струйки [2]. В любом случае, в микроструктуре материалов первой группы невозможно выделить какие-либо повторяющиеся с некоторым шагом по измерению материала (длине, ширине, глубине) геометрические элементы.

Ко второй группе относятся нити, скрученные из четного или нечетного числа стренг механическим способом, тканые материалы, трикотаж, вязаные материалы, микроструктура которых может быть в первом приближении построена периодической трансляцией одного выделенного в геометрической структуре материала участка. Например, в тканях такой участок (элементарная система переплетения нитей) называется раппортом переплетения. Сами текстильные волокна в таких материалах имеют более высокую степень упорядоченности и собраны в укрупненные элементы (нити, пряжу), которые в свою очередь образуют собой упорядоченную периодическую систему. Монопилы из первой группы, используемые в качестве стренг крученых нитей, в качестве нитей ткани или трикотажа также образуют в этом случае периодические структуры (хотя сами из периодических структур не состоят).

Текстильная нить – это гибкое, прочное тело с малыми поперечными размерами, но значительной длины, используемое для изготовления текстильных изделий [4]. Подвидом нитей является пряжа – нить, состоящая из волокон, соединенных скручиванием или склеиванием. Скручивание – весьма эффективный способ получения из волокон или нитей более прочных нитей. В

ткачестве и трикотажном производстве помимо пряжи применяют крученые нити, имеющие значительно большую разрывную нагрузку по сравнению с одиночными нитями с такой же линейной плотностью и меньшую неровноту по линейной плотности и другим свойствам [3].

Ткань – это текстильное полотно, образованное переплетением двух и более взаимно перпендикулярных систем нитей. Ткань образуется переплетением продольных (идущих вдоль ткани) нитей (основа) и поперечных (утка). К структурным характеристикам ткани относятся: линейная плотность ткани; поверхностная плотность ткани; средняя плотность ткани; линейное заполнение ткани по основе и утку (каков процент расстояния между осями соседних нитей составляет расчетный диаметр нити основы и утка); линейное наполнение ткани (какой процент длины прямолинейного отрезка вдоль основы или утка составляет сумма поперечников нити двух систем без учета их сплющивания и наклонного расположения); поверхностное заполнение ткани (отношение площади проекции обеих систем нитей в минимальном элементе ткани к площади всего этого элемента); объемное заполнение ткани (отношение объема нити в ткани ко всему объему ткани); заполнение массы ткани (отношение массы нитей в ткани к её максимальной плотности, рассчитанной при условии полного заполнения объема ткани веществом, составляющим волокна и нити); поверхностная пористость (отношение площади всех сквозных пор к площади всей ткани); объемная пористость (доля воздушных промежутков между нитями); общая пористость (доля всех промежутков между нитями, а также внутри них и внутри волокон).

Переплетением ткани называется определённый порядок чередования перекрытий нитей одной системы нитями другой.

Раппортом переплетения называется наименьшее число нитей, после которого последовательность основных и уточных перекрытий повторяется. Раппорт – это элементарный законченный рисунок ткани. Различают раппорт по основе и раппорт по утку.

Трикотаж – изделия или полотна, получаемые из одной нити или системы нитей путем образования петель и их взаимного переплетения. В геометрической

структуре трикотажа выделяют петельные ряды и петельные столбики. Основные геометрические параметры: длина в петле; петельный шаг; высота петельного ряда.

1.2 Основные геометрические параметры структуры материалов

Основными геометрическими свойствами волокон и нитей являются толщина (диаметр) и длина [4]. Прямое измерение толщины текстильной нити затруднительно в силу её малых размеров. Поэтому предполагают, что любая нить представляет собой цилиндр, наполненный волокнами с круглым сечением в поперечнике, диаметр которого значительно меньше высоты цилиндра. Тогда, зная массу и длину цилиндра, а также плотность составляющих его волокон, можно рассчитать площадь поперечного сечения и диаметр нити. В связи с этим в промышленности используется понятие линейной плотности T :

$$T = m/L, \quad (1.1)$$

где m – масса образца нити (волокон) в граммах; L – длина образца в километрах. Линейная плотность измеряется в тексах (г/км).

В [2,4] приводятся формулы для расчета так называемых «условного» и «расчетного» диаметров нитей. Следует понимать, что о диаметре, как и вообще о толщине нитей здесь действительно можно говорить весьма условно, так как для расчета принимались весьма грубые допущения.

Условный диаметр рассчитывается в предположении, что волокна, составляющие нить, не являются пустотелыми, и внутри самой нити нет воздушных промежутков:

$$d_{yc} = 0,0357\sqrt{T/\gamma}, \quad (1.2)$$

где d_{yc} – условный диаметр нити, мм; T – линейная плотность нити, текс; γ – плотность вещества (волокон), из которых состоит нить, мг/мм³.

Расчетный диаметр вычисляют в предположении, что внутри нити есть пустоты:

$$d_{рас} = 0,0357\sqrt{T/\sigma}, \quad (1.3)$$

где $d_{рас}$ – расчетный диаметр нити, мм; T – линейная плотность нити, текс; σ – средняя плотность нити, мг/мм³. Средняя плотность σ всегда меньше плотности вещества γ . Следовательно, условный диаметр меньше расчетного и истинная средняя толщина нити находится где-то между ними. Очевидно, что при таком подходе невозможно определить точную величину толщины нити в каждой конкретной её точке, а решение такой задачи может быть важно для контроля равномерности выпускаемой нити.

Неравномерность нитей по толщине является важным показателем качества, так как наличие неровноты вызывает полосатость изделий и портит внешний вид. Повышенная неравномерность снижает использование прочности волокон в пряже или элементарных нитей, в результате чего ухудшаются механические свойства нитей и повышенная их обрывность при переработке в ткачестве и вязании [2].

Толщина и длина являются важнейшими характеристиками всех без исключения нитей. Однако многие нити, применяемые для изготовления текстиля, являются кручеными, то есть полученными в результате закручивания отдельных коротких волокон, элементарных искусственных нитей (мононитей), нескольких нитей (пряж) и так далее вокруг оси изготавливаемой нити [4]. Для таких нитей важными геометрическими характеристиками являются

- число нитей (стренг), образующих крученую нить;
- число кручений, приходящихся на единицу длины (крутка);
- направление крутки.

В ГОСТ 13784-94 «Волокна и нити текстильные. Термины и определения» определены понятия комплексной нити, однокруточной нити и многокруточной нити.

Комплексная нить – это текстильная нить, состоящая из двух и более элементарных нитей.

Однокруточная нить – это крученая нить из двух или более одиночных нитей, скрученных за одну операцию.

Многокруточная нить – это крученая нить из двух или более текстильных нитей, одна из которых однокруточная, скрученных вместе за одну или более операций.

Как видно из определения, все три этих вида нитей состоят из двух и более стренг.

Согласно ГОСТ 16736-2002 «Нити текстильные. Обозначения структуры» количество этих стренг должно указываться в обозначении нити. Так, например, крученая комплексная нить может обозначаться «13 текс f 40 S 100», где 40 – количество элементарных нитей (стренг) в комплексной нити. Однокруточная нить может обозначаться «42 текс Z 370 X 2 S 450», где 2 – число сложений (стренг). Многокруточная нить может обозначаться «25 текс Z 510 X 2 S 570 X 2 S 350», где результирующая нить скручена из двух нитей, каждая из которых также получена скручиванием двух однокруточных нитей (рисунок 1.1).

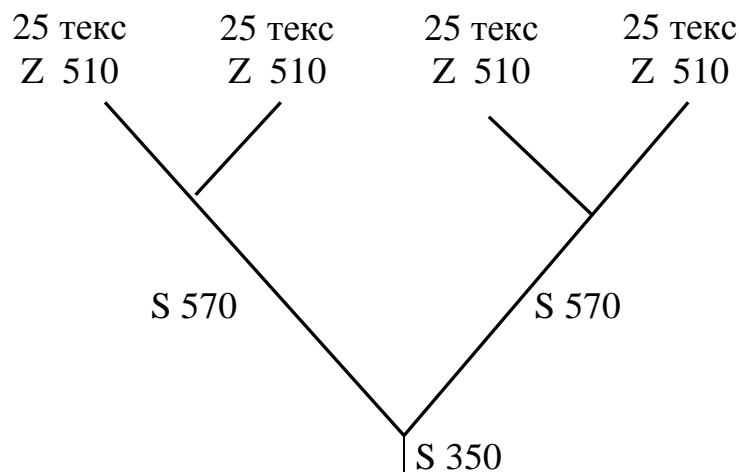


Рисунок 1.1 – Схема строения многокруточной нити 25 текс Z 510 X 2 S 570 X 2 S 350

Таким образом, количество стренг, входящих в состав крученой нити является важным её показателем. Обычно количество стренг известно непосредственно из технологического процесса производства нити, однако задача определения их количества может возникнуть, например, в процессе исследования нити с отсутствующей маркировкой.

Также важным показателем, выносимым в обозначение нити, является направление крутки стренг (рисунок 1.2).

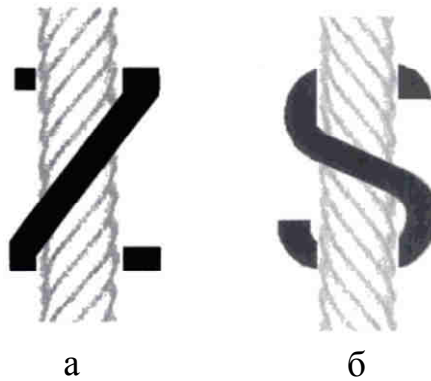


Рисунок 1.2 – Направления крутки: а) Z, б) S

Если витки направлены снизу слева вверх направо, то такую крутку называют правой и обозначают буквой Z и, наоборот, левую крутку обозначают буквой S [4,5].

В процессе производства нить на одном участке своей длины может быть закручена в одну сторону, а на другом – в противоположную. Такое изменение направления крутки называется ложной круткой и является важным при производстве текстурированных синтетических нитей [6].

Крутка нити K – это среднее число кручений (витков) на единицу длины (обычно 1 м). Она характеризует скрученность нитей, обладающих одинаковой объёмной массой и линейной плотностью [4].

Коэффициент крутки служит мерой интенсивности скручивания для нитей различной линейной плотности, но одинаковой объёмной массы:

$$\alpha = 0,01K / \sqrt{T}, \quad (1.4)$$

где T – линейная плотность в тексах. Коэффициент крутки является величиной безразмерной.

Угол кручения β (рисунок 1.3) является универсальной характеристикой скрученности, которая пригодна для нитей различных толщин и объёмной массы.

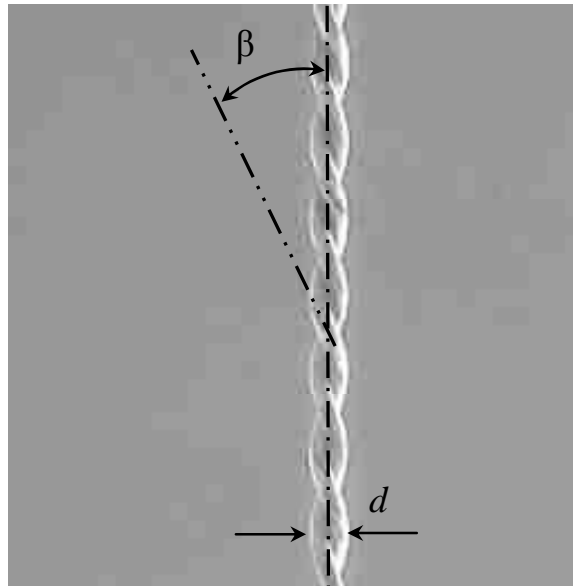


Рисунок 1.3 – Определение угла кручения нити

Он определяется как угол наклона внешних волокон к линии, параллельной оси нити. В учебниках по материаловедению обычно даётся следующая формула для расчета угла кручения [2,4]:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\alpha}{89\sqrt{\delta}}, \quad (1.5)$$

где α – коэффициент крутки, δ – объёмная масса нитей.

Также угол β может быть определён геометрически развёрткой направляющей внешних волокон на плоскость (рисунок 1.4).

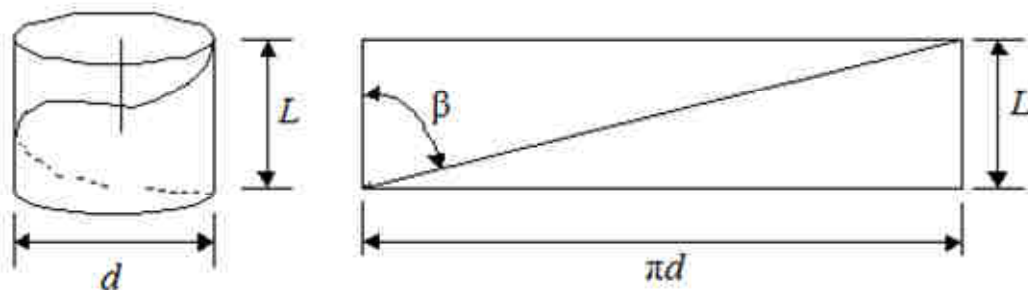


Рисунок 1.4 – Определение угла кручения нити
 $L = 1/K$ – шаг витка стренги

В таком случае связь между углом кручения и величиной крутки нити K может быть выражена формулой:

$$\operatorname{tg}\beta = \pi d K, \quad (1.6)$$

где d – диаметр нити, K – величина крутки нити как количество витков на единицу длины. Крутка нитей является очень важным параметром, так как

определяет прочность и мягкость нитей [7], а, следовательно, и получаемых из них текстильных изделий. С увеличением крутки разрывная нагрузка сначала возрастает до определённого порогового значения, а затем падает.

Микроструктура ткани характеризуется следующими параметрами (рисунок 1.5).

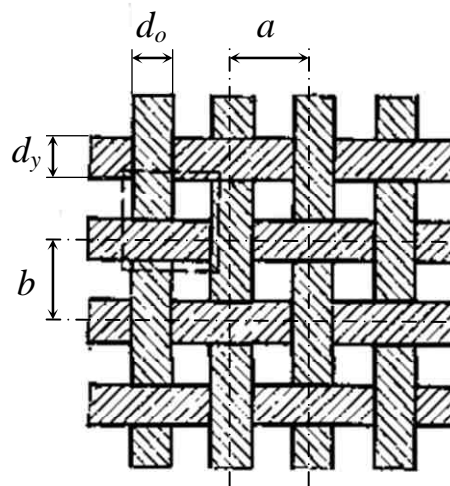


Рисунок 1.5 – Схема микроструктуры ткани:
 d_y – диаметр уточной нити; d_o – диаметр основной нити;
 a – расстояние между осями соседних нитей основы;
 b – расстояние между осями соседних нитей утка

Помимо раппорта и вида переплетения к основным геометрическим характеристикам структуры ткани относятся:

- число нитей по основе Π_o и число нитей по утку Π_y на заданную единицу длины (например, 10 см [3]);

- линейное заполнение по основе E_o и утку E_y в процентах:

$$E_o = 100d_o/a; E_y = 100d_y/b, \quad (1.7)$$

где d_o и d_y – расчетные диаметры основы и утка в мм, a и b – расстояния между осями соседних нитей основы и утка в мм [4];

- линейное наполнение, показывающее, какой процент длины прямолинейного отрезка вдоль основы или утка составляет сумма поперечников нитей без учета сплющивания или наклонного расположения:

$$H_o = 100(d_oR_o + 2d_yt_y)/L_{R_o}; H_y = 100(d_yR_y + 2d_ot_o)/L_{R_y}, \quad (1.8)$$

где H_o и H_y – линейное наполнение по основе и утку соответственно, d_o и d_y – расчетные диаметры основы и утка, R_o и R_y – раппорты переплетения, t_o и t_y –

число перекрытий в раппорте по основе и утку соответственно, L_{Ro} и L_{Ry} – протяженность раппорта ($L_R = 100R/\Pi$) [4];

- поверхностное заполнение E_s , равное отношению в минимальном элементе ткани площади, закрытой нитями, ко всей площади минимального элемента ткани:

$$E_s = E_o + E_y - 0,01E_oE_y, \quad (1.9)$$

где E_o и E_y – рассчитываемые по (1.7) величины линейного заполнения по основе и утку соответственно [3].

- поверхностная пористость A_s показывает отношение площади сквозных пор к площади всей ткани [4]:

$$A_s = 100 - E_s; \quad (1.10)$$

- размеры сквозных пор между нитями основы и утка:

$$a_0 = a - d_o; b_0 = b - d_y \quad (1.11)$$

Размер сквозных пор имеет огромное значение при крашении, придании несминаемости и других видах отделки полотен [3].

Микроструктура трикотажа характеризуется следующими параметрами (рисунок 1.6).

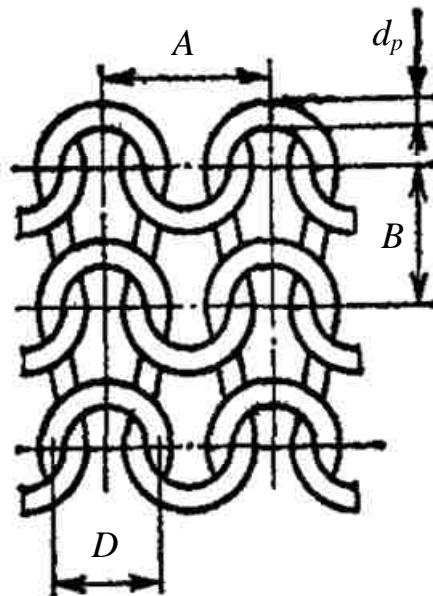


Рисунок 1.6 – Схема микроструктуры трикотажа: d_p – расчетный диаметр нити; D – ширина петли; A – петельный шаг; B – высота петельного ряда

В основу анализа структуры трикотажа положен метод геометрического моделирования, при котором реализуется геометрическое подобие (метод А.С.

Далидовича [8,9]). К основным геометрическим параметрам трикотажа относятся длина нити в петле l , петельный шаг A и высота петельного ряда B [10].

Длина нити в петле:

$$l = \pi D + 2B. \quad (1.12)$$

Аналогично тому, как в ткани подсчитывалось число основных и уточных нитей на единицу длины (10 см), в трикотаже подсчитывается число петельных столбиков по горизонтали Π_{Γ} и петельных рядов по вертикали $\Pi_{\text{в}}$ [3]. Зная эти величины, можно найти важные для трикотажа характеристики: петельный шаг A и высоту петельного ряда B :

$$A = 100/\Pi_{\Gamma}; B = 100/\Pi_{\text{в}}. \quad (1.13)$$

Аналогично ткани существуют понятия горизонтального E_{Γ} и вертикального $E_{\text{в}}$ заполнения:

$$E_{\Gamma} = 2d_p(100/A); E_{\text{в}} = d_p(100/B) \quad (1.14)$$

и поверхностного заполнения трикотажа:

$$E_f = (d_p l - 4d_p^2) \frac{100}{AB}. \quad (1.15)$$

Ряд геометрических параметров структуры текстильных материалов может быть рассчитан на основании других геометрических параметров. В любом случае такие параметры, как диаметр нити, направление и угол кручения, расстояние между соседними уточными и основными нитями, петельный шаг и высота петельного ряда, являются основными.

1.3 Современные промышленные методы определения геометрических параметров текстильных материалов

Рассмотрение данных методов целесообразно начать с рассмотрения методов, описанных в государственных и прочих стандартах, регламентирующих процессы изготовления текстильных изделий.

Современные промышленные стандарты, такие как ГОСТ и ISO, определяют широкий набор методов, с помощью которых можно контролировать

качество волокон, нитей, тканей, трикотажа и прочих текстильных материалов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Стандарты определения параметров текстильных материалов

Стандарт	Определяемые параметры	Применяемая аппаратура
ГОСТ 6611.3-2003	Число кручений, укрутка и направление крутки нити	Круткомер
ISO 2061:2010-12	Направление и величина крутки нити	Лупа, круткомер
ГОСТ 3812-72	Плотность нитей на 10 см длины	Оптические увеличительные средства, линейка, пинцет
ГОСТ 8846-87	Число петельных рядов и столбиков в трикотажном полотне	Лупа и линейка
ГОСТ 14067-91	Перекося нитей в тканях	Линейка и прямоугольный треугольник

ГОСТ 6611.3-2003 «Материалы текстильные. Нити. Методы определения числа кручений, укрутки и направления крутки» регламентирует использование следующих приборов:

- круткомер с качающимся или скользящим левым зажимом с погрешностью не более 0,25 оборота;

- грузы предварительной нагрузки;

- игла препарационная;

- лупа увеличительная;

- приспособление для размещения пробы.

ГОСТом предусмотрено два метода определения числа кручений нити:

- метод непосредственного раскручивания до полной параллельности волокон или составляющих нитей;

- метод удвоенного кручения.

Одновременно с определением числа кручений комплексных нитей подсчитывают число элементарных нитей, а в крученой нити число сложений.

Методом удвоенного кручения определяют число кручений одиночной хлопчатобумажной пряжи, смешанной и пряжи из химических волокон линейной плотностью 84 текс и менее.

ISO 2061:2010-12 «Textiles – Determination of twist in yarns – Direct counting method» («Текстиль. Определение крутки пряжи. Метод прямого подсчёта») предлагает определять направление крутки непосредственным наблюдением наклона волокон в вертикально подвешенном образце пряжи (совпадает ли этот наклон со средней частью букв *S* или *Z*). Степень кручения определяется с помощью круткомера.

ГОСТ 3812-72 «Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения плотности нитей и пучков ворса» устанавливает для использования следующие инструменты:

- оптические увеличительные средства (лупа, микроскоп и т.д.);
- линейка с ценой деления 1 мм;
- иглы препарировальные;
- пинцет;
- шаблон.

Количество нитей определяют непосредственным подсчетом либо (если это невозможно) методом удаления нитей (при этом образец разрушается). По количеству нитей определяют плотность ткани.

Укрутку крученой нити определяют одновременно с определением числа кручений нити в момент полной раскрутки нити.

Определение направления крутки производят одновременно с определением числа кручений на круткомере, по направлению вращения подвижного зажима при раскручивании нити.

ГОСТ 8846-87 «Полотна и изделия трикотажные. Методы определения линейных размеров, перекоса, числа петельных рядов и петельных столбиков и длины нити в петле» устанавливает следующие инструменты для определения геометрических параметров трикотажа:

- линейка или рулетка;

- угломер марки УПП-1;
- угольник;
- лупа;
- игла препарировальная;
- металлические рамки;
- ножницы;
- стойка со шкалой;
- грузы предварительного натяжения.

Для определения линейных размеров изделие расправляют на специальном столе и измеряют его размеры линейкой (рулеткой) с точностью до 0,5 см (для перчаточных изделий 0,1 см).

Перекося петельных рядов и петельных столбиков замеряют с помощью угломера, разложив изделие на гладкой поверхности. Для обеспечения надлежащей точности необходимо выполнить не менее 10 замеров. В производственных условиях допускается проведение замеров на браковочной машине. Измерения перекося с помощью угломера производят с точностью 1°. Возможно определение перекося без помощи угломера (складывая полотно и линию сгиба принимая за вертикальную линию), в этом случае погрешность должна быть не более 0,5 см.

Количество петельных рядов и петельных столбиков на единицу длины подсчитывают с помощью лупы, также предварительно разложив материал на гладкой поверхности.

Для определения длины нити в петле из точечной пробы или единицы продукции вырезают элементарную пробу, распускают её и полученную нить распрямляют на линейке или на стойке с измерительной шкалой. Длину нити измеряют с погрешностью до 1 мм.

ГОСТ 14067-91 «Материалы текстильные. Метод определения величины перекося» устанавливает метод определения величины максимального отклонения уточной нити ткани, поперечной линии рисунка, пестротканой и

печатной клетки, поперечной полоски от линии, перпендикулярной кромке. В качестве инструментов используются:

- линейка измерительная или металлическая рулетка;
- прямоугольный треугольник.

Для проведения измерений ткань раскладывают на гладкой горизонтальной поверхности. Измерение проводят с погрешностью до 1 мм.

Все вышеуказанные методы приводят к разрушению исследуемой пробы, а также требуют непосредственного участия в них человека, что делает эти методы субъективными.

1.3.1 Современные бесконтактные методы определения геометрических параметров структуры материала

Очевидны два направления развития методов определения величин геометрических параметров структуры текстильных материалов: измерение этих параметров без разрушения исследуемого образца и проведение измерений в автоматическом режиме без участия человека. Идеальный метод должен сочетать в себе обе эти возможности.

К настоящему времени было предложено достаточно большое количество методов, не требующих разрушения образца материала в процессе исследования. Здесь будут приведены лишь некоторые из этих методов.

Основной принцип разработки подобных устройств сводится к косвенному определению требуемых геометрических параметров. Например, диаметр нити может быть определен на основе её линейной плотности по формулам (1.2)-(1.3). В [11] приводятся эмпирические формулы, учитывающие процесс производства нити, что позволяет определять диаметр более точно. Очевидно, что данный метод всё равно обладает крайне низкой точностью и не позволяет измерять изменение диаметра вдоль длины нити.

В [12] предложен способ измерения переменного диаметра нити с помощью специального электромеханического тестера, где нить воздействует на

подвижный ролик, соединенный с датчиком, изменяющим величину электрического сигнала. По этому изменению (после обязательной калибровки прибора) можно судить о диаметре нити. К недостатку данного метода следует отнести дороговизну тестера, возможность его использования для достаточно толстых нитей и необходимость как первоначальной, так и периодической калибровки в процессе использования. Сложно представить правильную работу такого тестера в заводских условиях при наличии пыли и вибрации.

Направление крутки нити может быть определено непосредственно из технологического процесса кручения. Однако, как уже было сказано, бывают ситуации, когда необходимо определять направление крутки нити с утерянной маркировкой. Кроме того, в текстильном производстве используются нити с ложной круткой [6], где направление крутки на разных участках нити разное. В этом случае единственным неразрушающим методом до последнего времени было непосредственное определение направления под микроскопом или с помощью лупы. Очевидно, что такой способ требует участия человека и не может быть автоматизирован.

Величина крутки нити в неразрушающих методах также может быть измерена только косвенно. Для этого необходимо либо подсчитать количество витков на единицу длины нити, либо измерить угол кручения нити. После этого по формуле (1.5), зная диаметр нити, можно определить величину крутки.

Одним из способов определения величины угла крутки является непосредственное его измерение при наблюдении нити под микроскопом [13]. Другим способом является использование приборов [14,15], где датчики непосредственно контактируют с исследуемой нитью. Необходимость такого контакта можно считать главным недостатком такого метода, ибо как сама нить, так и чувствительные органы приборов истираются при подобном взаимодействии, что хоть и позволяет использовать измерители такого рода в лабораторных условиях, но вызывает определённые проблемы на производстве.

Для измерения плотности ткани по утку и основе предлагаются электромеханические и электронные счетчики нитей, например, [16].

Преимуществом данного устройства и ему подобных следует считать возможность его использования непосредственно на ткацком станке во время производства ткани. Недостатками являются относительная сложность устройства и необходимость контакта его деталей с тканью.

Как видно из вышеприведённых примеров, методы и приборы, используемые для определения величин геометрических параметров микроструктуры текстильных материалов, должны оперировать элементами весьма малых размеров, что накладывает требования к точности их изготовления и повышает цену измерительных устройств. Поэтому иногда прибегают к измерению некоторых интегральных характеристик, относящихся к образцу текстильного материала в целом, а затем на их основе вычисляют характеристики микроструктуры. Примером такого подхода может служить метод определения поверхностной плотности трикотажного полотна по показателям массы и влажности образца, находящимся под циклическим натяжением вдоль петельных столбиков [17]. Недостатком данного метода следует считать невозможность определения неравномерности определяемой поверхностной плотности в пределах исследуемого образца. Кроме того очевидно, что циклическое вытягивание в процессе испытаний ухудшит качество исследуемого материала.

Размеры сквозных пор в ткани и трикотаже обычно определяют через замер воздухопроницаемости материала. Одно из последних усовершенствований данного метода изложено в [18]. Однако в этом случае приходится определять микроразмеры по косвенным характеристикам. В частности, приходится замерять перепад давления в камерах, разделенных образцом. Точно измерить давление достаточно сложно. Затем погрешность появится при математических расчетах, необходимых для получения истинных размеров пор на основании измеренных косвенных величин. Наконец, метод невозможно применять непосредственно в процессе производства: образец должен быть отправлен в лабораторию и помещен в специальную установку. В случае исследования полотна, получаемого на ткацком станке, этот образец придётся вырезать, а после исследования – выбросить.

Таким образом, в современных условиях необходимы иные методы: бесконтактные и не разрушающие исследуемый образец. В качестве таковых могут выступать оптические методы.

1.3.2 Оптические методы оценивания величин параметров структуры текстильных материалов

Очевидно, что самый простой способ измерить геометрические размеры элементов в структуре текстильного материала – это непосредственно измерить их либо на самом образце, либо на его фотоизображении.

Однако трудность, во-первых, заключается в том, что размеры этих элементов крайне малы (доли миллиметров и меньше), следовательно, без микроскопа не обойтись, а во-вторых, если человеку относительно легко определить и измерить границы такого элемента, то прибору необходимо иметь опцию распознавания образов для различения элементов структуры (нитей в переплетении, петель трикотажа и т.п.).

Несмотря на это, уже достаточно давно появились оптические системы анализа геометрической структуры текстильных материалов, основанные в первую очередь на использовании оптических датчиков, тем или иным образом реагирующих на пропущенный либо отраженный текстильным материалом свет [19-21]. Основные компоненты таких устройств – фотоэлемент, осциллограф, интегратор сигнала. Оптический сигнал преобразуется в электрический, по величине электрического сигнала после калибровки прибора определяются величины геометрических параметров текстильного образца. Устройства чисто аналоговые, и правильнее было бы говорить не об измерении микровеличин, а о контроле, что эти величины не выходят за некоторые установленные пределы. В середине прошлого века на производстве такие устройства были бы весьма кстати, но в настоящее время требуются более точные и универсальные устройства.

Для определения диаметра текстильной нити предлагается следующее оптическое устройство [22]. Два параллельных пучка света освещают нить с двух сторон (рисунок 1.7). Исследуемая нить движется в их оптическом поле. Угол между лучами, исходящими из источников света 1 и 2 составляет 90° . Чувствительными элементами прибора являются приемники света 1 и 2. Прибор может измерять нити с диаметром от 0,3 до 8 мм.

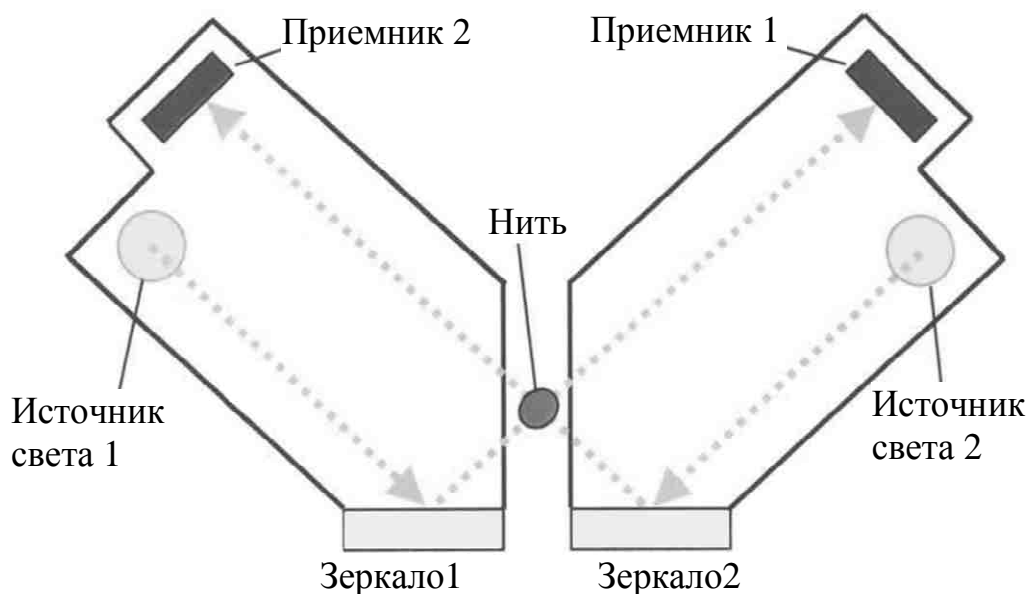


Рисунок 1.7 – Схема прибора Uster© Tester 5-S800

Прибор имеет достаточно высокую цену – от 15 до 85 тысяч долларов США в зависимости от комплектации.

Для определения поверхностной плотности ткани и трикотажа может быть применен способ, основанный на измерении изменения интенсивности света, отраженного от насыщенного сорбатом образца текстильного материала [23]. К недостатку данного способа можно отнести необходимость осуществления определённых предварительных действий с образцом: высушивание и насыщение сорбатом.

Ряд методов [24-32] основывается на анализе анизотропии светорассеяния текстильных волокон в направлении падения света на исследуемый образец. Однако предлагаемые методы достаточно трудоемки и могут быть применены

только к текстильным материалам с определённой оптической плотностью и только в лабораторных условиях.

1.4 Методы, основанные на анализе изображений материалов и распознавании образов

Развитие компьютерных технологий подсказало идею попытаться определить геометрические характеристики структуры текстильных материалов автоматически по цифровому изображению материала, снятому с достаточным увеличением.

Действительно, повторяющаяся структура текстильного материала может быть смоделирована простыми геометрическими фигурами, расстояния в которых могут быть легко измерены. Трудность заключается в нахождении адекватной модели исходного изображения. Очевидно, что в данном случае задача определения формы и геометрических размеров повторяющихся структур материала сводится к задаче распознавания образов.

В [33] предлагается способ определения линейной плотности, основанный на получении двух цифровых изображений ткани, сделанных с разных ракурсов. Каждая точка-пиксель дискретного компьютерного изображения обладает определённой яркостью в зависимости от интенсивности света, отраженного от соответствующего участка образца и попавшего в объектив камеры. Дальнейшее сопоставление двух изображений как двумерных матриц интенсивностей и их анализ позволяет определить расположение нитей в переплетении. Достоинством данного метода является простота получения исходных данных для анализа, недостатком – ограничение в ассортименте исследуемых тканей [34].

В [35] предлагается программно-аппаратный комплекс для определения поверхностного заполнения и пористости трикотажа. Установка включает в себя проектор, сканер, персональный компьютер со специальным программным обеспечением и электронный блок вспомогательной логики, обеспечивающий интерфейс между компьютером и сканером. В качестве исследуемого образца

используется полоска 50x50 мм, вырезанная из трикотажного полотна. Изображение образца сканируется и передаётся в специальную программу, запущенную на компьютере. Программа анализирует изображение в заданной оператором области. Также оператор управляет процессом анализа, задавая коэффициент чувствительности. Фактически, программа с учетом заданных настроек определяет соотношение в исследуемой области пикселей с нулевой и ненулевой интенсивностью (рисунок 1.8).

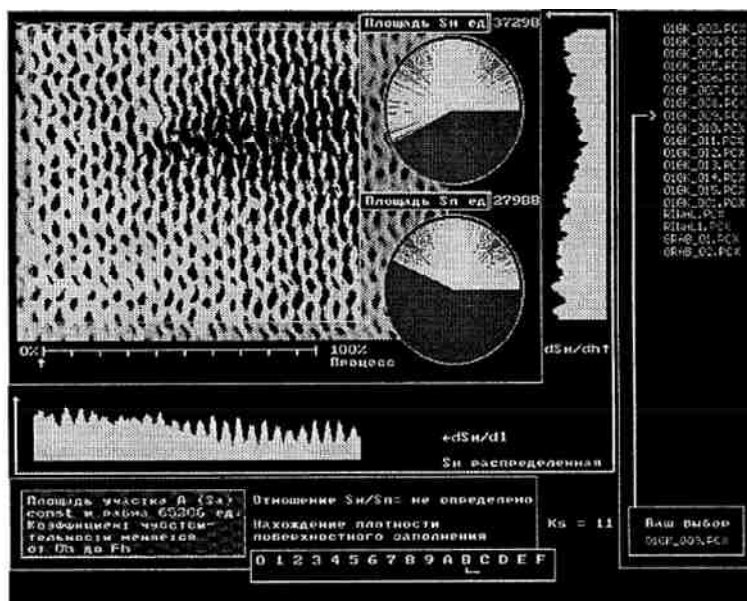


Рисунок 1.8 – Вид экрана программы определения поверхностного заполнения и пористости трикотажа

К недостатку данного метода можно отнести необходимость участия в процессе анализа человека – оператора. Кроме того сканер должен обладать достаточно высоким разрешением либо метод можно применять только к трикотажу с крупными порами. Также, судя по рисунку 1.8, программное обеспечение написано на базе старых технологий, без учета возможностей современных компьютеров и операционных систем.

В [36] автоматическое определение плотности такни по утку и основе, а также определение перекоса между уточной и основной нитями осуществляется через алгоритм распознавания образов, основанный на преобразовании Хафа.

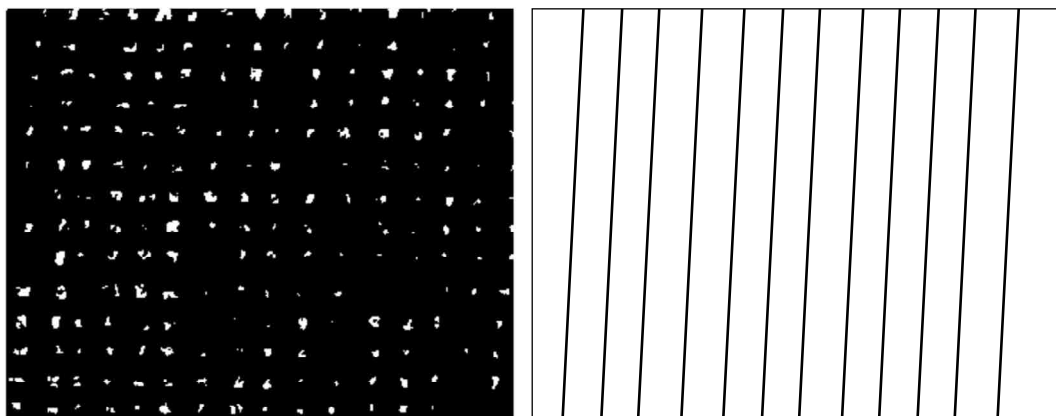
Преобразование Хафа позволяет идентифицировать в изображении различные геометрические объекты. Первоначально он позволял осуществлять

находить только прямые линии, но в настоящее время расширен до поиска кривых, эллипсов и окружностей. Идея преобразования Хафа состоит в поиске линий, которые проходят через достаточное количество точек интереса [37]. Для семейства кривых на плоскости, заданного параметрическим уравнением:

$$F(a_1, a_2, \dots, a_n, x, y) = 0, \quad (1.16)$$

где F – некоторая функция, a_1, a_2, \dots, a_n – параметры семейства кривых, x, y – координаты на плоскости, параметры семейства образуют фазовое пространство, каждая точка которого (конкретные значения параметров a_1, a_2, \dots, a_n) соответствует некоторой кривой. Для перевода непрерывного фазового пространства в дискретное в фазовом пространстве вводится сетка, разбивающая его на ячейки, каждая из которых соответствует набору кривых с близкими значениями параметров. Каждой ячейке фазового пространства можно поставить в соответствие счетчик, указывающий количество точек интереса на изображении, принадлежащих хотя бы одной из кривых, соответствующих данной ячейке. Анализ этих счетчиков и позволяет найти на изображении кривые.

В [36] преобразование Хафа используется для того, чтобы определить перекося – отклонение угла между нитью основы и утка от 90° . Именно перекося в данном исследовании препятствовал правильному определению линейных плотностей ткани. После отсечки в изображении части пикселей по некоторому заданному порогу интенсивности изображение ткани становится таким, как показано на рисунке 1.9а, то есть состоящим из упорядоченных точек яркости.



а

б

Рисунок 1.9 – Определение перекося в ткани

Применив к этим точкам преобразование Хафа, можно получить систему прямых линий (рисунок 1.9б), соответствующих осям нитей в переплетении. Если компьютерной программе удастся автоматически определить эти линии, то далее ей не составляет труда по количеству линий определить линейную плотность по горизонтали и вертикали изображения.

К достоинствам этого метода можно отнести то, что распознавание изображения и подсчет количественных характеристик производится полностью автоматически. Из недостатков можно указать вычислительную сложность существующих алгоритмов преобразования Хафа.

1.4.1 Дифракционные методы анализа структуры текстильных материалов

Особый интерес представляют методы исследования структуры, основанные на явлении дифракции. Несомненным достоинством таких методов исследования, благодаря которому они получили широкое применение при изучении периодических структур, является то обстоятельство, что по измеренным значениям расстояний между максимумами в дифракционной картине можно рассчитать периодические параметры исследуемой структуры независимо от природы исследуемого материала и цвета.

Дополнительным преимуществом является практическая независимость основных параметров дифракционной картины от скорости параллельного перемещения исследуемого объекта, что делает дифракционный метод незаменимым при разработке устройств контроля параметров материала в процессе его производства. Интерес к изучению дифракции особенно возрос с появлением монохроматических источников света – фотодиодов и лазеров, а также электронных «камер машинного видения», соединенных с компьютером, что резко упростило получение четких фраунгоферовых дифракционных картин большой интенсивности и расширило возможности их автоматического анализа с использованием соответствующих компьютерных программ [1].

В США был запатентован метод и установка для оптического определения угла крутки текстильной нити [38], в котором, в том числе, используется эффект дифракции. Схема установки приведена на рисунке 1.10.

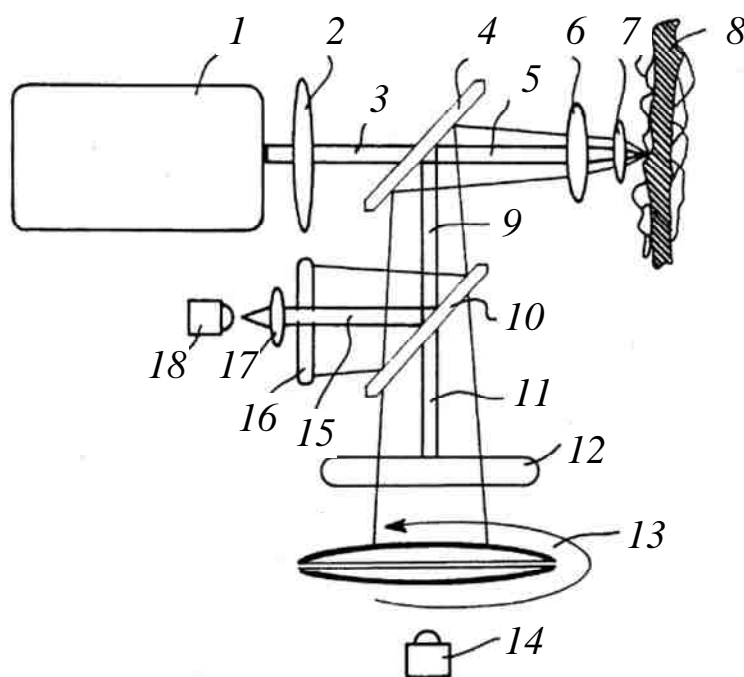


Рисунок 1.10 – Установка для определения величины кручения нити

Установка состоит из источника когерентного света *1*, линзы *2*, *6* и *7*, полупрозрачных зеркал *4* и *10*, световых фильтров *12* и *16*, поворотного анализатора *13*, датчиков *14* и *18*, окуляра *17*. Цифрой *8* обозначен исследуемый образец крученой нити или пряжи, цифрой *3* – луч света от источника *1*, цифрой *5* – луч, отраженный от образца и отраженный полупрозрачным зеркалом *4*. Отраженный от зеркала *4* луч *9* в свою очередь делится полупрозрачным зеркалом *10* на лучи *11* и *15*, поступающие к оптическим датчикам. Боковая поверхность нити *8* освещается параллельным пучком когерентного света с круговым сечением, диаметр которого меньше диаметра нити. Свет дифрагирует на поверхностных волокнах нити, что даёт вытянутую дифракционную картину с ярко выраженными большой и малой осями. Большая ось перпендикулярна продольной направляющей волокон. Измерив угол между большой осью и продольной осью нити, можно рассчитать угол кручения нити.

Аппарат для измерения оптическим способом угла кручения волокон текстильной нити включает:

а) устройство для освещения боковой поверхности нити параллельным пучком монохроматического когерентного света;

б) сенсор для считывания света от пучка после дифракции на поверхностных волокнах нити, дающей вытянутую структуру дифрагировавшего света с выраженными большой и малой осями, где большая ось перпендикулярна продольной направляющей волокон; большая ось составляет с осью нити угол, который есть добавочный к углу кручения;

в) средство для измерения угла большой оси к продольной оси нити, что обеспечивает измерение угла кручения.

Однако стоит отметить, что, во-первых, этот метод является аппаратным, а во-вторых, он распространён лишь на один класс материалов, а именно, только на нити. При этом нить не может быть в составе изделия, т.к. она должна протягиваться через установку. Сомнительна также возможность применения этого метода непосредственно в процессе производства.

1.4.2 Явление дифракции. Формулы для расчета дифракционных картин

В оптике разработана теория, дающая аналитические зависимости для расчета дифракционных картин. Таким образом, возможно построение математических моделей процесса для исследования структуры образца текстильного материала. Несомненным достоинством таких методов исследования является возможность отказа от использования дорогостоящих оптических установок.

Дифракцией в широком смысле слова называется любое отклонение в распространении света от законов геометрической оптики [39].

В большинстве случаев, представляющих практический интерес, вполне достаточным оказывается приближенный метод решения задачи о распределении

света вблизи границы между светом и тенью, основанный на принципе Гюйгенса-Френеля [40], особенно для дифракции Фраунгофера. Дифракция Фраунгофера – это дифракция в параллельных лучах, которая экспериментально обычно наблюдается в фокальной плоскости объектива в области вблизи его главного фокуса.

Амплитуда светового сигнала во Фраунгоферовой дифракционной картине на экране U в точке с координатами (x,y) , наблюдаемой от плоского непрозрачного объекта с отверстиями, освещаемого плоской монохроматической волной постоянной интенсивности длиной λ перпендикулярно его поверхности, в скалярном приближении (без учета поляризации светового вектора E) даётся интегралом Френеля-Кирхгофа [41]:

$$U(x, y) = C \iint_{\sigma} \exp[-ik(p\xi + q\eta)] d\xi d\eta. \quad (1.17)$$

В (1.17) величина C есть величина, зависящая от положения источника света и точки наблюдения. Величины p и q – относительные координаты точки наблюдения дифракции на экране, удаленном от источника света на расстояние L . В случае дифракции Фраунгофера эти величины определяются соотношениями [42]:

$$p = x/L; q = y/L, \quad (1.18)$$

где x и y – координаты точки наблюдения в системе координат экрана. При этом должно соблюдаться условие, что L значительно больше x и y .

Сам объект находится в системе координат (ξ, η) , причем ось координаты ξ параллельна оси координат x экрана, а η – соответственно y . Точки отсчета обеих систем координат лежат на одной оси с источником света. Интегрирование ведётся по общей площади отверстий в объекте σ [39]. Буквой k обозначена циклическая частота света: $k = 2\pi/\lambda$. Буквой i обозначена мнимая единица.

Амплитуда U является комплексной величиной. На практике проще измерить интенсивность света I в точке экрана, которая связана с амплитудой формулой [41]:

$$I(x, y) = U(x, y) U^*(x, y), \quad (1.19)$$

где U^* - функция, комплексно сопряженная функции U .

В случае дифракции Фраунгофера на периодической структуре с периодом T вдоль координаты ξ формула для зависимости интенсивности света на экране дается формулой [41]:

$$I(x, y) = I_1(x, y) \left(\frac{\sin NX}{\sin X} \right)^2, \quad (1.20)$$

где N – число освещенных периодических структур, $X = \pi T x / (\lambda L)$, $I_1(x, y)$ – интенсивность света в дифракционной картине, даваемая одним периодическим звеном.

В [43] исследовалась дифракция света *He-Ne* лазера на нити. Авторы обнаружили в дифракционной картине две световые линии, пересекающиеся под определенным углом друг к другу и симметричные относительно направления нити. Этот угол был тем больше, чем больше была величина крутки исследуемой нити.

В [44,45] исследовалась дифракция света лазера на текстильном полотне и показана связь его геометрических структурных параметров с параметрами дифракционной картины. В [44] тканое полотно рассматривалось как суперпозиция двух плоских дифракционных решеток, развернутых на угол 90° относительно друг друга, что и нашло свое отражение в уравнении для амплитуды световой волны на экране, приведенном в этой работе.

В работе [45] было экспериментально показано, что по измеренной величине угла между рядами максимумов, соответствующих нитям утка и основы, можно судить о величине перекоса уточных нитей.

К недостатку этих работ можно отнести то, что авторы не предлагают путей анализа дифракционных изображений от более сложных переплетений типа саржи, сатина, репса и т. д.

В [46] сделана попытка теоретического рассмотрения светопропускания плоского ворсового материала, полученного методом электрофлокирования, при облучении его светом лазера по схеме устройства, приведенного в [47].

В своей модели авторы [46] априори считают, что светопропускание ворсового слоя, имеющего Гауссово распределение по углам отклонения от нормали к поверхности, обусловлено только двумя факторами: поглощением света в волокнах и свободными промежутками между волокнами. В [1] даётся критика этих работ, основанная на неправомерности допущений, используемых авторами, в частности, замена волокон при расчёте поглощающей, но не рассеивающей пленкой (что правомочно только для нормально расположенных к поверхности волокон, чего в действительности не бывает).

1.5 Формальная постановка задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой

В общем виде задачу определения геометрических параметров структуры материалов можно сформулировать следующим образом.

Дано: материал, поверхность которого состоит из набора повторяющихся элементов, размеры и расстояния между которыми сопоставимы с длинами волн света в оптическом диапазоне. Существуют апробированные методы [1, 38, 43-47], позволяющие получать дифракционные картины при освещении таких материалов лучом монохроматического света и, используя эти дифракционные картины, определять геометрические параметры поверхностных структур текстильных материалов. Однако эти методы требуют использования соответствующих оптических установок, включающих источник монохроматического света (лазер), удалённый экран для проецирования дифракционной картины, светочувствительные датчики, фиксирующие расположение дифракционных максимумов.

Требуется: разработать способ определения величин геометрических параметров периодических структур поверхности материалов без использования оптических установок, реализующих явление дифракции. Дифракционная картина должна моделироваться и анализироваться в памяти компьютера. В качестве исходных данных выступает цифровая фотография структуры

материала, сделанная с необходимым увеличением. Результатом должно быть выводимое пользователю на экран компьютера изображение дифракционной картины и значения автоматически рассчитанных геометрических параметров. По величинам этих параметров пользователь может оценить, удовлетворяют ли они значениям требуемых показателей качества или нет, и принять решение о качестве исследуемого образца.

Для решения задачи контроля качества диапазоны контролируемых параметров включаются в состав исходных данных наравне с исходным изображением структуры. Тогда, после построения модели дифракционной картины и определения с её помощью искомых величин они могут быть автоматически сопоставлены с требуемыми интервалами, что будет означать автоматический контроль геометрических параметров структуры.

Выводы к главе 1

1. Для определения характеристик текстильных материалов важное значение имеют геометрические параметры их структуры:

- диаметр текстильной нити;
- величина крутки текстильной нити (или связанный с ней угол кручения);
- плотность ткани по основе и утку;
- петельный шаг и высота петельного ряда в трикотаже;
- линейная плотность ткани;
- поверхностная плотность ткани/трикотажа;
- размер сквозных пор.

Анализ используемых в настоящее время методов показал, что они (за исключением метода непосредственного измерения под микроскопом) могут контролировать средние значения геометрических параметров структуры для всего материала. Хотя для решения задач качества требуется также определять значения этих величин на малых участках материала и сравнивать их для разных участков.

2. Было установлено, что применяемые в настоящее время методы определения этих параметров – разрушающие (образец вырезается из материала и сам разрушается в процессе измерений) и субъективные (процесс измерения требует обязательного участия человека). В ходе данной работы требовалось решить задачу разработки бесконтактного способа оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой.

3. Существуют различные неразрушающие методы, однако они требуют использования дорогого оборудования и их затруднительно применять непосредственно на производстве (в цеху). Отсюда вытекает, что необходим способ определения величин геометрических параметров структур материалов, использующий простые и общедоступные устройства, например, персональный компьютер, бытовая цифровая фотокамера и т.д.

4. Анализ, проведённый автором, показал, что для решения задачи определения геометрических параметров материалов с периодической структурой наиболее перспективными являются оптические методы, основанные на явлении дифракции света на элементах периодической структуры материалов. Само явление дифракции достаточно хорошо изучено и имеет точное математическое описание. Таким образом, была сформулирована задача разработки способа определения геометрических параметров структуры материалов по цифровым изображениям на основе компьютерного моделирования дифракции.

2 Модель процесса обработки цифровых изображений для определения геометрических параметров материалов с периодической структурой

На основе предыдущей главы можно сделать вывод, что наибольшей эффективности можно достичь при автоматизации дифракционных методов. Эти методы можно разделить на два основных класса:

- аппаратные: физическая дифракционная картина текстильного материала получается на специальной установке путем освещения образца лучом монохроматического света и проецируется на экране;

- безаппаратные: дифракционная картина рассчитывается по изображению образца текстильного материала [48].

Обзор существующих методов подробно сделан в [1].

2.1 Анализ процесса автоматизированного определения геометрических параметров микроструктуры

Автоматизированное определение геометрических параметров микроструктуры материалов представляет собой сложный процесс, связанный с машинным распознаванием отдельных элементов периодических структур.

Система бесконтактного оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой может быть представлена следующими элементами. **Целью** этой системы является количественное измерение геометрических параметров микроструктур: угла кручения текстильной нити, угла перекоса уточной нити в ткани, величины раппорта переплетения. Для достижения поставленной цели в случае использования бесконтактных неразрушающих способов могут быть использованы следующие **средства**: изображение исследуемой текстильной микроструктуры, полученное с достаточным увеличением и устройство для обработки этого изображения для выявления периодических элементов структуры и определения их размеров. Для

решения задачи определения величин геометрических параметров структуры образец исследуемого материала фотографируется цифровой камерой через микроскоп. Затем полученное цифровое изображение обрабатывается специальной программой на компьютере.

В ходе обработки исходное изображение преобразуется таким образом, чтобы количественный анализ позволил на преобразованном изображении выявить периодические элементы структуры, определить их размеры и взаимное расположение. В качестве такого преобразования может быть использовано **моделирование** процесса дифракции Фраунгофера на периодических микроструктурах. Физическое моделирование дифракции монохроматического света на текстильных образцах при освещении их лучом лазера показало, что полученные на удалённом экране дифракционные картины позволяют определить истинные геометрические размеры периодических элементов микроструктур по взаимному расположению дифракционных максимумов.

Теория дифракции и Фурье-оптика позволяют математически смоделировать явление дифракции Фраунгофера. Для моделирования могут быть использованы выражения (1.17 – 1.19).

Критериями достижения цели данной системы для решения практических задач являются точность и скорость измерения исследуемых параметров по сравнению с существующими методами.

Схематично процесс определения геометрических параметров структуры представлен на рисунке 2.1.

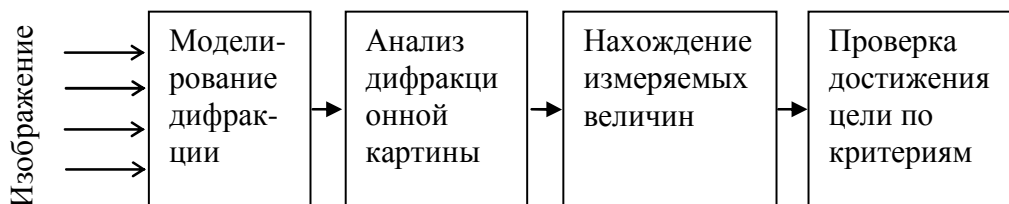


Рисунок 2.1 – Процесс определения геометрических параметров структуры текстильного материала по модели дифракции света

Под моделированием дифракционной картины будем понимать преобразование двумерной матрицы A , величина каждого элемента которой соответствует яркости точки (пикселя) исходного изображения исследуемой микроструктуры, в матрицу B , величина каждого элемента которой соответствует яркости пикселя смоделированной дифракционной картины, которая получилась бы в реальности на удалённом экране при освещении этого же образца микроструктуры пучком монохромного света.

2.2 Дифракция света на материалах с периодической структурой

В [42] приведены примеры дифракционных картин, полученных при освещении объектов простых форм. Для этих случаев существуют аналитические формулы расчета интенсивности светового сигнала.

Наиболее простым является случай прямоугольного отверстия с горизонтальным размером l_x и вертикальным l_y (рисунок 2.2).

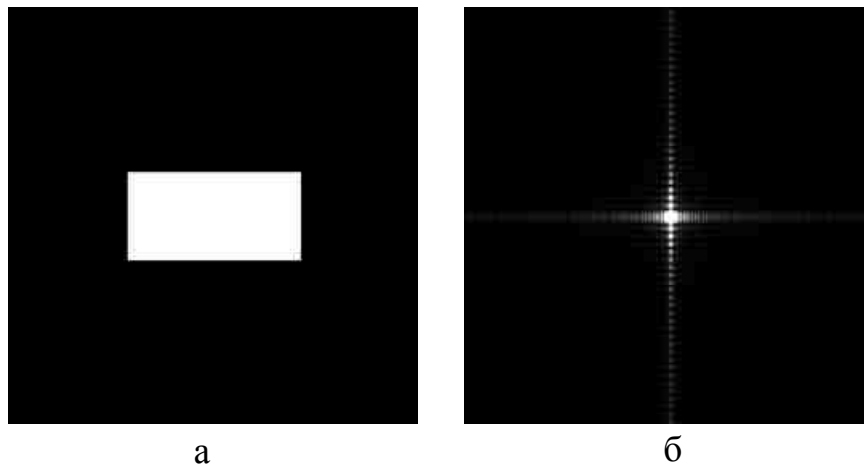


Рисунок 2.2 – Дифракция Фраунгофера на прямоугольном отверстии

Дифракционная картина (рисунок 2.2б) представляет собой два набора убывающих по интенсивности максимумов, располагающихся в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Интенсивность света I на дифракционной картине может быть рассчитана по формуле:

$$I(x, y) = \frac{l_x^2 l_y^2}{\lambda^2 L^2} \text{SINC}^2\left(\frac{l_x x}{\lambda L}\right) \text{SINC}^2\left(\frac{l_y y}{\lambda L}\right), \quad (2.1)$$

где x и y – координаты точки на экране, отображающем дифракционную картину; λ – длина волны монохроматического света, освещающего отверстие; L – расстояние от отверстия до экрана. Функция *SINC* определяется следующим образом:

$$SINC(\gamma) = \frac{\sin \pi\gamma}{\gamma}, \quad (2.2)$$

где γ – безразмерный аргумент функции.

Распределение интенсивности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр дифракционной картины, может быть представлено в виде графика (рисунок 2.3).

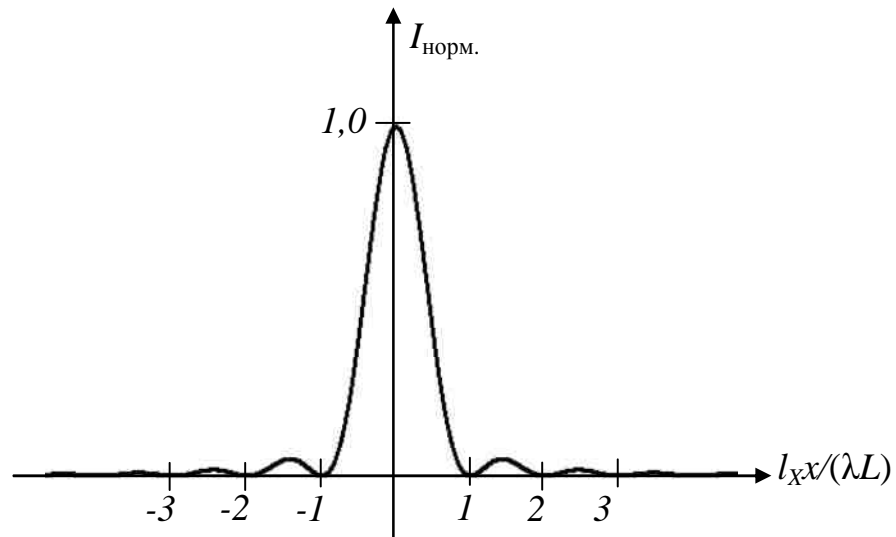


Рисунок 2.3 – Распределение нормированной интенсивности $I_{\text{норм.}}$ в дифракционной картине на прямоугольном отверстии. По горизонтали также откладывается приведённая координата (умноженная на ширину отверстия и разделённая на длину волны и расстояние до экрана)

Из графика видно, что ширина Δx между двумя первыми минимумами («нулями») дифракционной картины, ограничивающими центральный максимум, обратно пропорциональна ширине отверстия по горизонтали l_x :

$$\Delta x = 2\lambda L / l_x \quad (2.3)$$

Другим примером «простой» дифракции, которую можно описать аналитической зависимостью, является синусоидальная амплитудная решетка (рисунок 2.4).

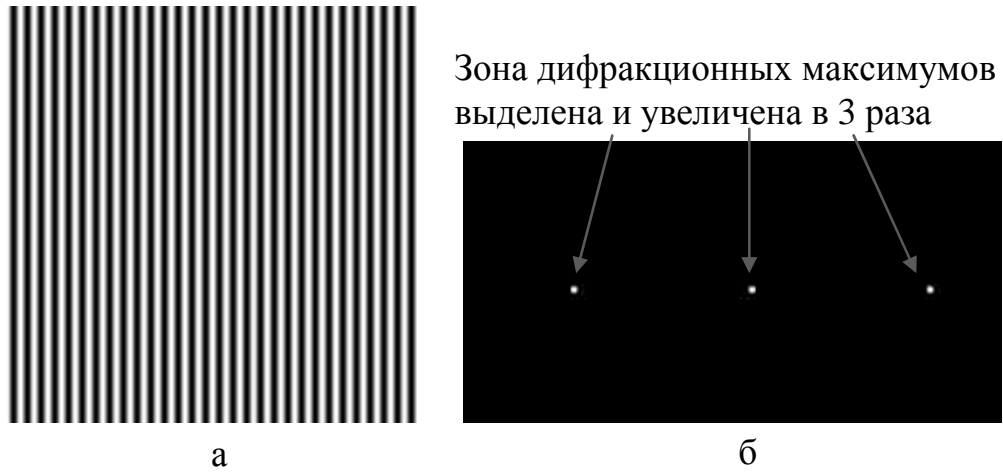


Рисунок 2.4 – Дифракция Фраунгофера на синусоидальной решетке

Коэффициент пропускания такой решетки меняется по синусоидальному закону и может быть представлен графиком (рисунок 2.5).

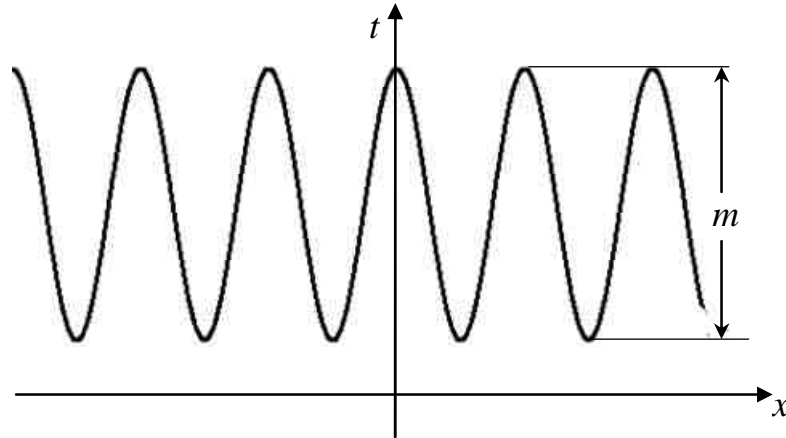


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента пропускания t синусоидальной амплитудной решетки

Интенсивность света I на дифракционной картине для такой решетки может быть рассчитана по формуле:

$$I(x, y) = \left(\frac{l^2}{2\lambda L} \right)^2 \text{SINC}^2 \left(\frac{ly}{\lambda L} \right) \left\{ \text{SINC}^2 \left(\frac{lx}{\lambda L} \right) + \frac{m^2}{4} \text{SINC}^2 \left[\frac{l}{\lambda L} (x + f\lambda L) \right] + \frac{m^2}{4} \text{SINC}^2 \left[\frac{l}{\lambda L} (x - f\lambda L) \right] \right\}, \quad (2.4)$$

где x и y – координаты точки на экране, отображающем дифракционную картину; λ – длина волны монохроматического света, освещающего отверстие; L – расстояние от отверстия до экрана; l – ширина решетки; m – разница между

минимальной и максимальной величиной коэффициента пропускания решетки; f – частота решетки; функция *SINC* определяется формулой (2.2).

Распределение интенсивности вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр дифракционной картины, может быть представлено в виде графика (рисунок 2.6).

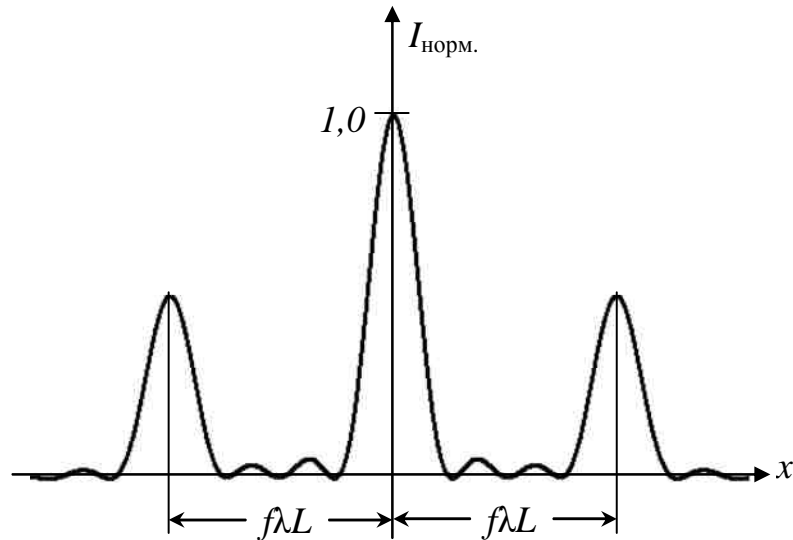


Рисунок 2.6 – Распределение нормированной интенсивности $I_{\text{норм.}}$ в дифракционной картине на синусоидальной амплитудной решетке

Из графика видно, что расстояние между центром нулевого и первого максимумов равно $f\lambda L$. Так как частота решетки есть величина, обратно пропорциональная периоду решетки (иначе говоря, расстоянию между соседними просветами), то:

$$D_X \sim 1/T_\xi, \quad (2.5)$$

где D_X – период повторения дифракционных максимумов вдоль горизонтальной оси дифракционной картины; T_ξ – период повторения периодической структуры вдоль горизонтальной оси решетки.

Если бы решетка была повернута относительно центра изображения на 90° , то дифракционные максимумы располагались бы вдоль вертикальной оси, и можно было бы записать:

$$D_Y \sim 1/T_\eta, \quad (2.6)$$

где D_Y – период повторения дифракционных максимумов вдоль вертикальной оси дифракционной картины; T_η – период повторения периодической структуры вдоль вертикальной оси решетки.

Периодические структуры текстильных материалов представляют собой объекты, несколько более сложные, чем описанные выше, и для расчета их дифракционных картин приходится брать интеграл Френеля-Кирхгофа численно. Однако же и для них соблюдается правило обратной пропорциональности расстояний. Таким образом, получив дифракционную картину от образца текстильного материала с периодической структурой (ткань, трикотаж, крученая нить и пр.) и измерив расстояния между соседними дифракционными максимумами, можно рассчитать истинные размеры периодов в структуре материала:

$$T_\xi = K/D_X; T_\eta = K/D_Y, \quad (2.7)$$

где K – некоторый аппаратный коэффициент, учитывающий параметры установки для наблюдения дифракционной картины, увеличение микроскопа и прочее. Этот коэффициент может быть правильно подобран при настройке системы [1].

Как уже говорилось, дифракционная картина может быть получена либо непосредственно на удалённом экране при освещении образца лучом монохроматического света, либо рассчитана с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа (1.17).

Установка (рисунок 2.7) может быть использована для получения дифракционной картины от таких материалов, как ткань, трикотаж, крученая нить при освещении их «на просвет» [1, 39, 49, 50].

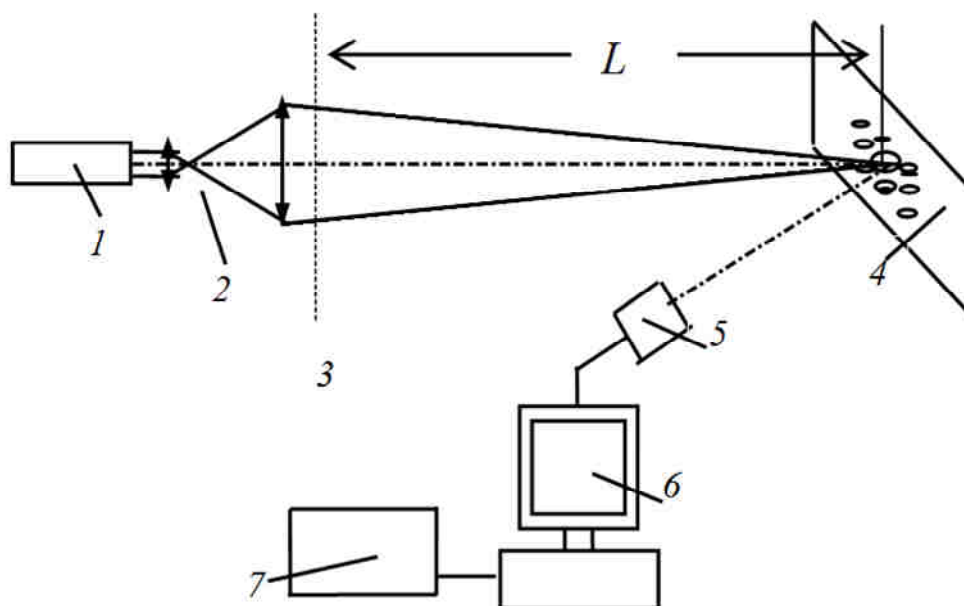


Рисунок 2.7 – Схема установки для наблюдения дифракционной картины
 1 – источник света, 2 – длиннофокусный объектив, 3 – исследуемый объект, 4 – экран, 5 – камера машинного видения, 6 – компьютер, 7 – принтер

Свет от источника 1 (*He-Ne* лазер) через длиннофокусный объектив 2 освещает исследуемый объект 3 и фокусируется на экране 4, установленном перпендикулярно оптической оси. Камера машинного видения 5 переносит изображение наблюдаемой дифракционной картины на экран в компьютер 6 и может быть распечатано на принтере 7.

С помощью указанной установки [50] исследовалась связь между параметрами дифракционной картины и величиной поверхностного заполнения ткани E_s (отношение площади проекции нитей в элементе ткани к общей площади этого элемента). При малом значении этой величины почти вся световая энергия сосредоточена в центральных вертикальных и горизонтальных рядах максимумов и быстро спадает от центра к периферии [1]. По мере роста значения E_s разница в интенсивности соседних максимумов снижается.

На рисунке 2.8 приведены дифракционные картины для материалов с величинами поверхностного заполнения 0,19 и 0,99.

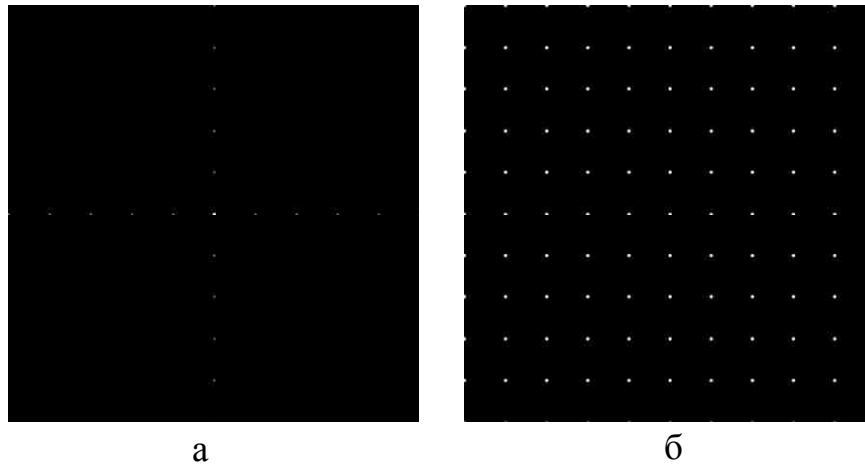


Рисунок 2.8 – Дифракционные картины тканей с разным поверхностным заполнением: а) $E_s = 0,19$; б) $E_s = 0,99$

Распределение нормированных интенсивностей (за единицу принята интенсивность центрального максимума) вдоль горизонтальной оси, проведённой через центр дифракционной картины, сведено в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Распределение нормированных интенсивностей вдоль горизонтальной оси дифракционной картины

Координата x , пиксели	$E_s = 0,19$	$E_s = 0,99$
-256	0,110	1,000
-205	0,110	0,976
-154	0,102	0,910
-102	0,102	0,910
-51	0,110	0,976
0 (центральный максимум)	1,000	1,000
51	0,110	0,976
102	0,102	0,910
154	0,102	0,910
205	0,110	0,976

Из таблицы 2.1 видно, что если для дифракционной картины ткани с $E_s = 0,19$ интенсивность центрального максимума примерно в 10 раз больше интенсивности прочих максимумов, то для ткани с $E_s = 0,99$ величины всех максимумов примерно равны (отклонение не более 9%).

Также из таблицы 2.1 видно, что расстояния между соседними максимумами одинаковы и равны 51+1 пиксель. Расстояния здесь приведены в пикселях потому, что наблюдаемая дифракционная картина была заснята цифровой фотокамерой и преобразована таким образом в компьютерное

изображение, после чего были проведены замеры интенсивности и расстояний между дифракционными максимумами.

2.2.1 Дифракция света на моно волокнах и крученых нитях

На установке (рисунок 2.7) также были выполнены исследования для выяснения, можно ли при анализе дифракционных картин от цилиндрических нитей пользоваться теми же формулами, которые известны для расчета дифракционных картин, полученных от щели [1]. Было установлено, что нить можно рассматривать как дополнительный экран к щели. В соответствии с теоремой Бабине [40] дифракционные картины вне зоны светового пучка на экране, наблюдаемые от такого отверстия и дополнительного к нему экрана, должны быть тождественны.

На рисунке 2.9 приведены дифракционные картины для оптической щели и мононити такой же ширины.

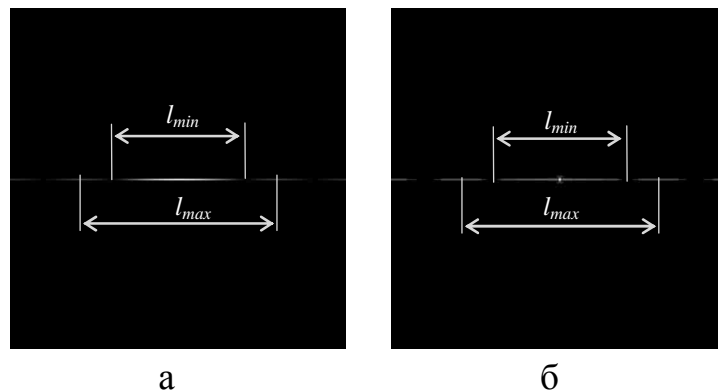


Рисунок 2.9 – Дифракционные картины: а) от оптической щели; б) от мононити той же ширины

Из рисунка 2.9 видно, что в обоих случаях совпадают как расстояния между центрами соседних максимумов, так и между центрами соседних минимумов. Это дает дополнительные экспериментальные основания в пользу правомочности применимости принципа Бабине при выполнении расчетов дифракционных картин от более сложных объектов.

Итак, дифракционная картина от мононити гладкого профиля, так же, как и от щели, представляет собой набор дифракционных максимумов, вытянутых

узкой линией перпендикулярно мононити, проходящей через центр картины. Иной вид имеют дифракционные картины от спиральных нитей [51, 52]. Для плотно намотанной спирали, что соответствует профилю большинства крученых нитей, на дифракционной картине четко выделяются три набора максимумов (рисунок 2.10).

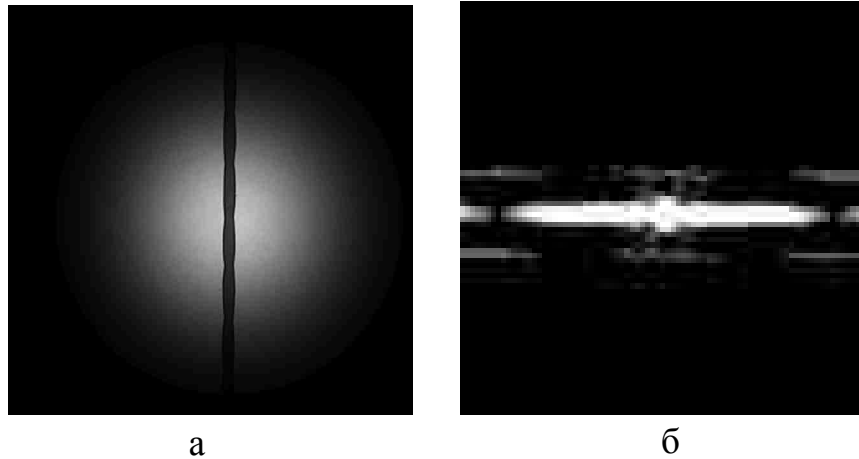


Рисунок 2.10 – Крученая нить (а) и её дифракционная картина (б), полученная при освещении нити «на просвет». Приведён центральный участок дифракционной картины со значительным увеличением для наглядности

Один набор наиболее ярких дифракционных максимумов проходит через центр картины (центральный максимум) в направлении, перпендикулярном оси нити (рисунок 2.10б). Кроме того, параллельно ему и на одинаковых расстояниях от него идут два другие набора менее ярких максимумов. Наличие этих двух наборов можно объяснить тем, что профиль крученой нити не ровный, а представляет собой повторение выпуклостей и впадин, образуемых витками нити.

По взаимному расположению максимумов в этих наборах можно судить, например, о чётности или нечётности числа стренг, из которых скручена нить (рисунок 2.11).

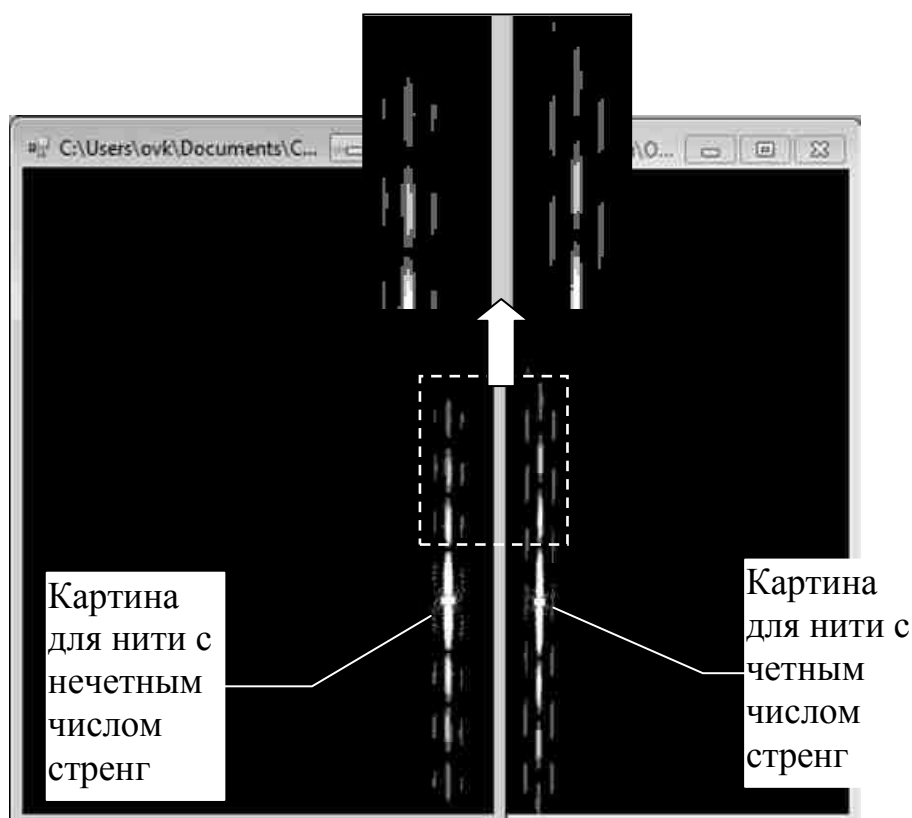


Рисунок 2.11 – Приведенные для сравнения в двух соседних окнах дифракционные картины для нитей с нечётным и чётным числом стренг. Фрагмент с расположением максимумов вынесен и увеличен

Из рисунка 2.11 видно, что в случае нити с нечётным числом стренг центры дифракционных максимумов трех наборов находятся на одной линии друг напротив друга, а для нити с чётным числом стренг положению минимума из центрального набора соответствует максимум из соседнего набора. Данная особенность подтверждается и теоретическими расчетами [53].

В [54] о параметрах нити судят на основании дифракционной картины, наблюдаемой визуально или с помощью фотоприемника на экране, причем о величине крутки судят по измеренной средней величине расстояния между соседними горизонтальными рядами максимумов в тонкой структуре при Фраунгоферовой дифракции, о четном или нечетном числе стренг судят по виду симметрии максимумов в соседних горизонтальных рядах, о величине диаметра нити - по величине среднего расстояния между соседними максимумами в горизонтальных рядах, а о скорости движения нити - по измеренной с помощью соответствующего фотоприемника средней величине частоты основной

гармоники изменения интенсивности света в горизонтальных рядах максимумов. Изобретение повышает точность и расширяет возможности дифракционного метода.

Дифракционная картина от крученой нити может быть получена не только «на просвет», но и в отраженных лучах. В этом случае свет рассеивается на витках нити, наклоненных под углом кручения β к её оси. Нить в этом случае можно рассматривать как узкую дифракционную решетку, щели которой наклонены к оси решетки (рисунок 2.12).

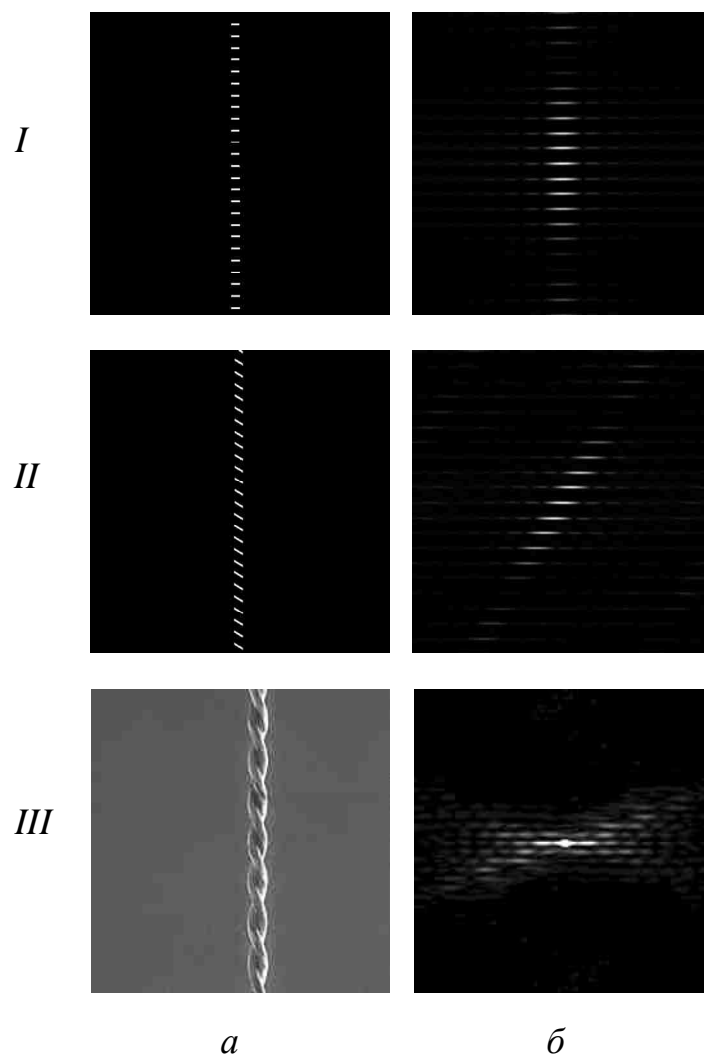


Рисунок 2.12 – Дифракционные картины решеток и нити

На рисунке 2.12 римскими цифрами обозначены:

I – изображение дифракционной решетки (а) и дифракционная картина для неё (б);

II – та же решетка с наклоном щелей 60° (а) и дифракционная картина для неё (б);

III – скрученная из проволоки модель нити (а) и её дифракционная картина (б).

Сравнивая рисунки 2.12(*Iб*) и 2.12(*IIб*) можно заметить, что при наклоне щелей дифракционной решетки дифракционные максимумы смещаются в сторону наклона. На рисунке 2.12(*IIIб*) эту закономерность также можно заметить и для модели нити, скрученной из проволоки. Таким образом, очевидно, что по виду дифракционной картины можно сделать вывод о направлении и величине крутки нити [55].

На дифракционной картине нити можно выделить два основных набора максимумов: максимумы, получаемые от нити как от щели, и максимумы от витков нити как элементов дифракционной решетки. На рисунке 2.13 приведены дифракционные картины для нитей с разным наклоном витков к оси нити.

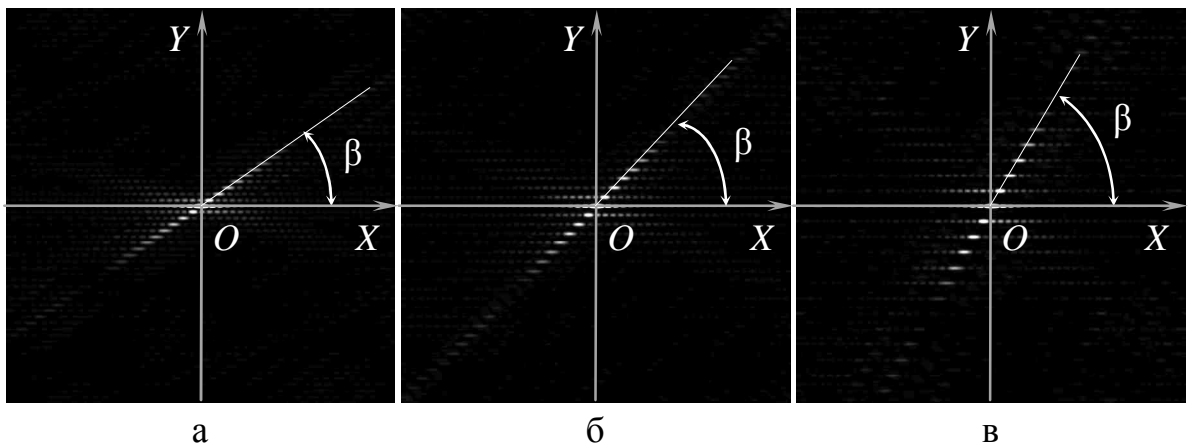


Рисунок 2.13 – Дифракционные картины для нитей с разным углом кручения: а) 36° ; б) 47° ; в) 61°

Через центры дифракционных максимумов проведены наклонные прямые, образующие углы с горизонтальной осью OX .

Как видно из рисунка, угол наклона дифракционных максимумов от витков нити напрямую зависит от величины наклона этих витков к оси нити, что может быть использовано для определения величины угла кручения.

Ранее в [56-59] был предложен метод контроля величины крутки K по величине коэффициента оптической изотропии χ рассеиваемого света. На рисунке 2.14 приведена схема измерительной установки.

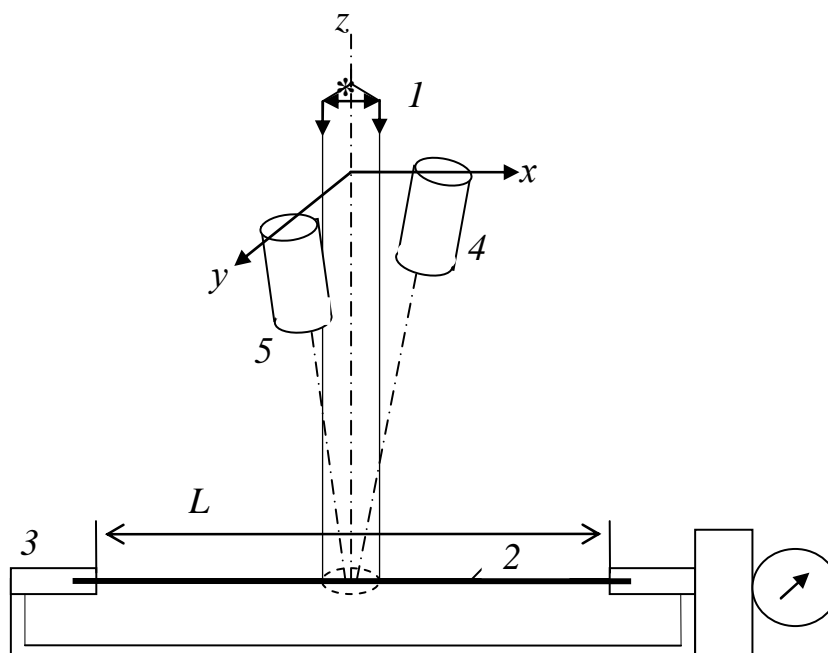


Рисунок 2.14 – Измерительная схема

Параллельный пучок света от источника 1 падает на исследуемый образец нити 2 длиной $L = 250$ мм, закрепленный в зажимах круткомера 3 . Рассеянный нитью свет регистрируется одинаковыми фотоприемниками 4 и 5 , в качестве которых использовались фотодиоды. Эти фотоприемники ориентированы во взаимно перпендикулярных плоскостях под равными углами α к падающему пучку света и принимают рассеянные исследуемым материалом световые потоки в обратном направлении в двух одинаковых телесных углах $\Delta\Omega$. На установке измерялись сигналы U_x и U_y , пропорциональные регистрируемым фотоприемникам световым потокам, соответственно Φ_x и Φ_y , и величину крутки K . В электронном блоке оптического устройства происходит вычисление коэффициента χ по формуле:

$$\chi = \Phi_x / \Phi_y = U_x / U_y . \quad (2.8)$$

Было установлено, что в диапазоне крутки (100-250) 1/м зависимость коэффициента оптической изотропии от величины крутки в пределах 10% близка к линейной. На концах этого интервала кривая изогнута. Это связано с

тем, что при малой крутке комплексной нити основной вклад вносят показатели составляющих ее стренг и направление и величина их крутки. В области больших значений крутки кривизна кривой связана с перекруткой нити [1]. Таким образом, после соответствующей настройки системы по измеренной величине коэффициента χ можно определить величину крутки.

Можно предположить, что в таком случае и угол наклона прямой, проведённой через центры дифракционных максимумов от витков нити, будет в известном диапазоне прямо пропорционален величине крутки нити.

2.2.2 Дифракция света на нитях утка и основы ткани

Участок ткани может быть аппроксимирован структурой, состоящей из светлых прямоугольников, соответствующих отверстиям между нитями, и тёмных участков между ними, соответствующим нитям. Схема расчета упрощенной модели ткани приведена на рисунке 2.15.

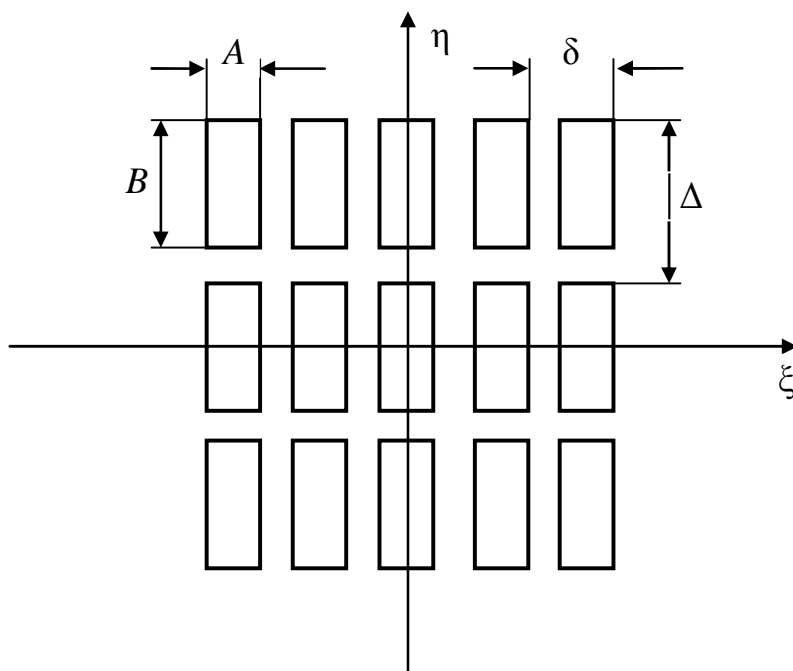


Рисунок 2.15 – Схема упрощенной модели ткани

В приближении интеграла Френеля-Кирхгофа для случая дифракции Фраунгофера интенсивность света в дифракционной картине может быть рассчитана по формуле [1]:

$$I = I_0 \left[\frac{\sin \frac{\pi B y}{\lambda L} \sin \frac{\Delta \pi N_2 y}{\lambda L} \sin \frac{\pi A x}{\lambda L} \sin \frac{\delta \pi N_1 x}{\lambda L}}{\left(\frac{\pi B y}{\lambda L} \right) \left(\frac{\pi A x}{\lambda L} \right) \sin \frac{\delta \pi x}{\lambda L} \sin \frac{\Delta \pi y}{\lambda L}} \right]^2, \quad (2.9)$$

где I_0 – интенсивность света, создаваемая в центре картины одним отверстием шириной A и высотой B ; N_1 – число освещенных отверстий вдоль оси η ; N_2 – число освещенных отверстий вдоль оси ξ ; λ – длина волны лазера, освещающего отверстия; L – расстояние от образца ткани до экрана, на котором проецируется дифракционная картина; π – число Пи.

Распределение интенсивностей дифракционной картины вдоль горизонтальной оси X (параллельной оси ξ) может быть представлено графиком (рисунок 2.16).

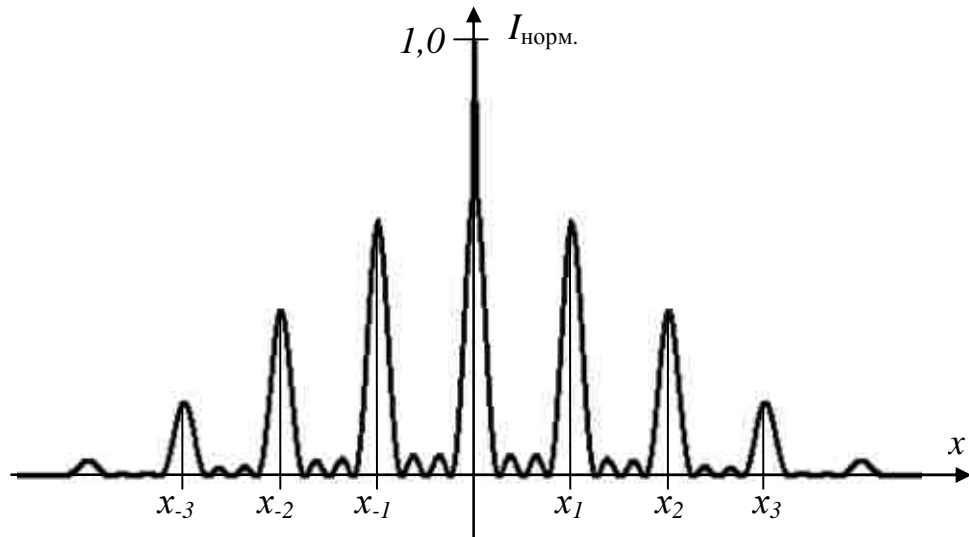


Рисунок 2.16 – Распределение нормированной интенсивности $I_{\text{норм.}}$, рассчитанной по формуле (2.9) для среза вдоль оси X

Положение основных дифракционных максимумов определяется выражениями:

$$x_k = k\lambda L/\delta; y_m = m\lambda L/\Delta, \quad (2.10)$$

где k и m – целые числа $(0, \pm 1, \pm 2, \dots)$.

Из (2.10) получаются формулы для определения периодов структуры ткани вдоль осей ξ и η :

$$\delta = \lambda L/D_x; \Delta = \lambda L/D_y, \quad (2.11)$$

где D_x и D_y – расстояния между соседними основными максимумами вдоль осей x и y дифракционной картины соответственно.

Если предположить, что на схеме (рисунок 2.14) уточные нити располагались горизонтально, а основные – вертикально, то в этом случае $\delta = R_{oc}$ и $\Delta = R_{yt}$, тогда величина раппорта переплетения:

$$R_{oc} = \lambda L / D_x; R_{yt} = \lambda L / D_y, \quad (2.12)$$

где R_{oc} - величина раппорта по основе, а R_{yt} - величина раппорта по утку.

В случае простого полотняного переплетения по аналогичным формулам может быть рассчитана плотность по основе и утку [1]:

$$\Pi_{oc} = D_x / \lambda L; \Pi_{yt} = D_y / \lambda L. \quad (2.13)$$

В случае, когда нити основы и утка строго взаимно перпендикулярны, максимумы на дифракционной картине образуют системы точек, через которые можно провести взаимно перпендикулярные прямые. Однако в случае отклонения угла между уточными и основными нитями от 90° возникнет перекос и взаимного расположения дифракционных максимумов (рисунок 2.17).

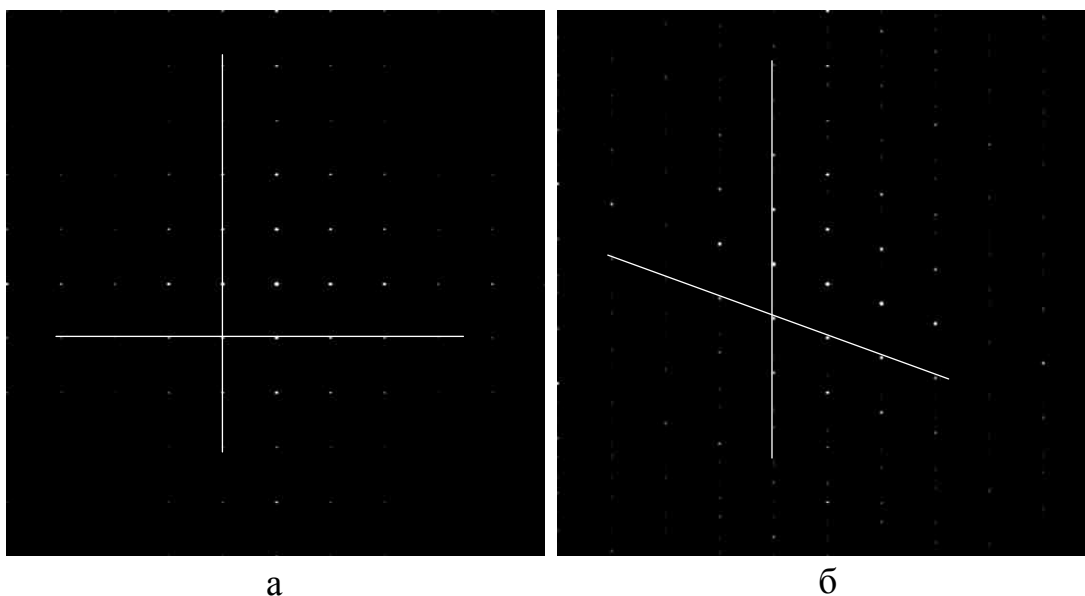


Рисунок 2.17 – Дифракционные картины тканей без перекоса (а) и с перекосом (б)

В реальных тканях перекос нитей утка является важным дефектом, значительно ухудшающим качество готового изделия.

Переко́с ткани – это неправильное расположение уточных нитей, искажающее клетку или рисунок ткани [3]. Переко́с ткани относится к порокам отделки и возникает чаще всего в процессе ширения и сушки ткани.

ГОСТ 14067-91 «Материалы текстильные. Метод определения величины переко́са» определяет следующие основные виды переко́са (рисунок 2.18).

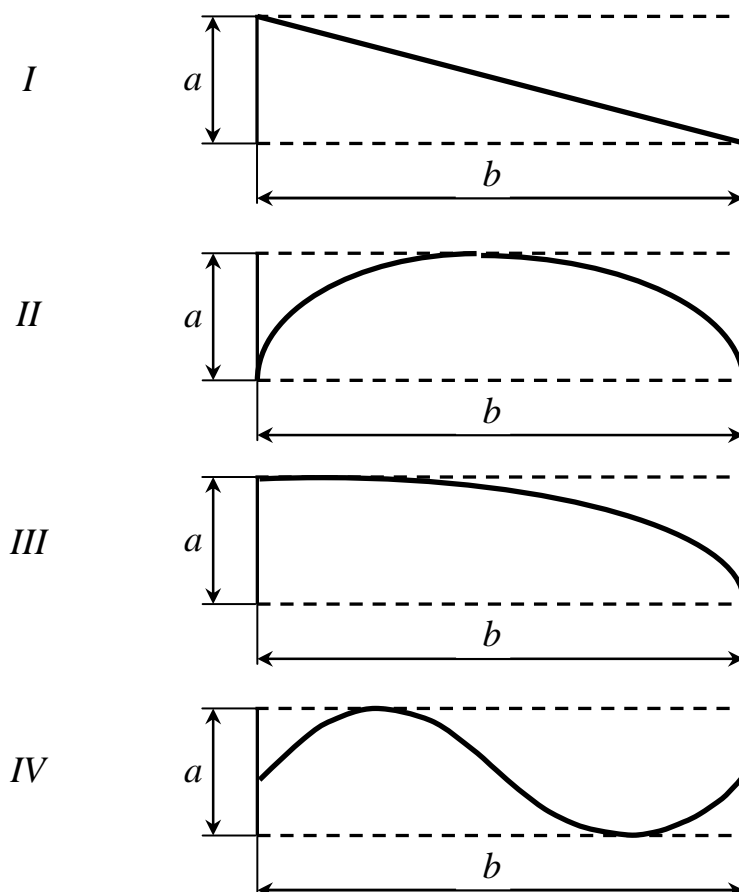


Рисунок 2.18 – Основные виды переко́са:

I – диагональный переко́с; *II* – дуговой переко́с;
III – полудуговой переко́с; *IV* – синусоидальный переко́с

Ширение тканей осуществляется на специальных ширильных машинах путем захвата кромок и растягивания полотна по ширине [60]. Влажные ткани при обработке вытягиваются по длине и усаживаются по ширине, при этом плотность по утку снижается, по основе – растёт. Ширение как раз применяется для исправления этих изменений длины и ширины, и хотя именно в процессе ширения и могут возникать переко́сы утка (из-за небрежностей при работе станка), именно в этом же процессе они и могут быть исправлены. Достигается это с помощью специальных устройств, входящих в конструкцию станка.

Перекося уточных нитей затрудняет дальнейший раскрой ткани, портит её внешний вид, искажает рисунок (особенно в клетчатых тканях) [2]. Цепные (или клуппные) ширильные машины захватывают кромки ткани специальными устройствами (клубпами) и удерживают их при ширении. Ширильная машина имеет две клуппные цепи, которые движутся по направляющим рамам [60]. Исправление диагональных перекосов достигается ускорением или замедлением движения одной из цепей.

Если цепные ширильные машины с дифференциальным приводом (допускающим различную скорость движения цепей) позволяют устранять только диагональные перекосы, то специальные установки и механизмы для исправления перекосов позволяют исправлять все виды перекосов. Исправление диагональных перекосов осуществляется на установке с перекосными роликами. Исправление дугового перекося возможно с помощью дуговых тканерасправителей с поворачивающейся осью.

В работе [45] исследовалась дифракция света лазера на тканом полотне и показано, что по измеренной величине угла между рядами максимумов, соответствующих нитям утка и основы, можно судить о величине перекося уточных нитей.

2.2.3 Дифракция на трикотажных материалах

Под трикотажным материалом будем понимать как трикотажные полотна, производимые методами кулирного либо основного вязания, так и готовые вязанные изделия, например, дамские чулки. В любом случае структура трикотажа представляет собой систему периодически повторяющихся петель. В петле образуется сквозное отверстие, размеры и форма которого зависят как от вида петлеобразования, так и от растяжения либо влагосодержания материала. Очевидно, что если структура трикотажа образует упорядоченную систему отверстий, то по её дифракционной картине, как и по дифракционной картине

ткани, можно судить как о качественных, так и количественных параметрах структуры исследуемого образца.

На рисунке 2.19 приведён образец чулочного трикотажа и его дифракционная картина.

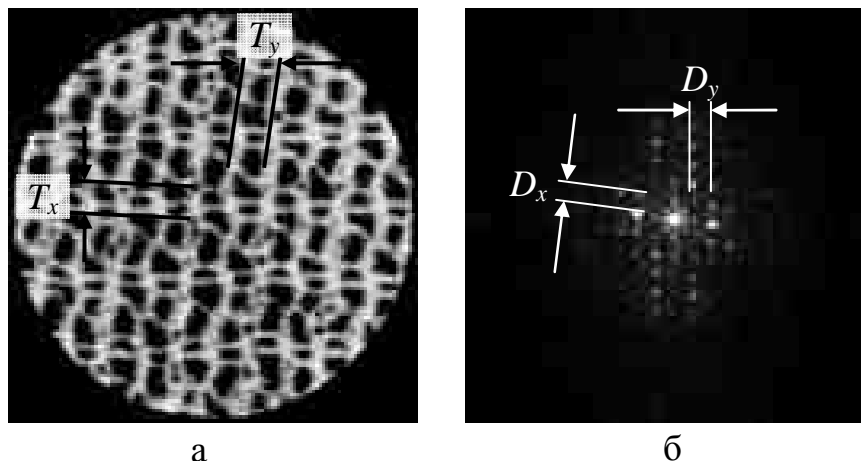


Рисунок 2.19 – Образец трикотажного материала (а) и полученная от него дифракционная картина (б)

Исследования дифракционных картин трикотажа на установке, аналогичной изображенной на рисунке 2.7, но с возможностью осуществлять поворот образца на заданный угол относительно оси, перпендикулярной лучу, проводились в [61-64].

Так же, как и в случае с тканью, участок трикотажа может быть аппроксимирован системой светлых прямоугольников (рисунок 2.20). Необходимо отметить, что в силу особенностей трикотажа, в том числе и его растяжения, ряды прямоугольников, в отличие от аналогичной модели ткани, могут быть смещены друг относительно друга.

Таким образом, периодическое звено состоит из четырёх прямоугольников, выделенных на рисунке 2.20.

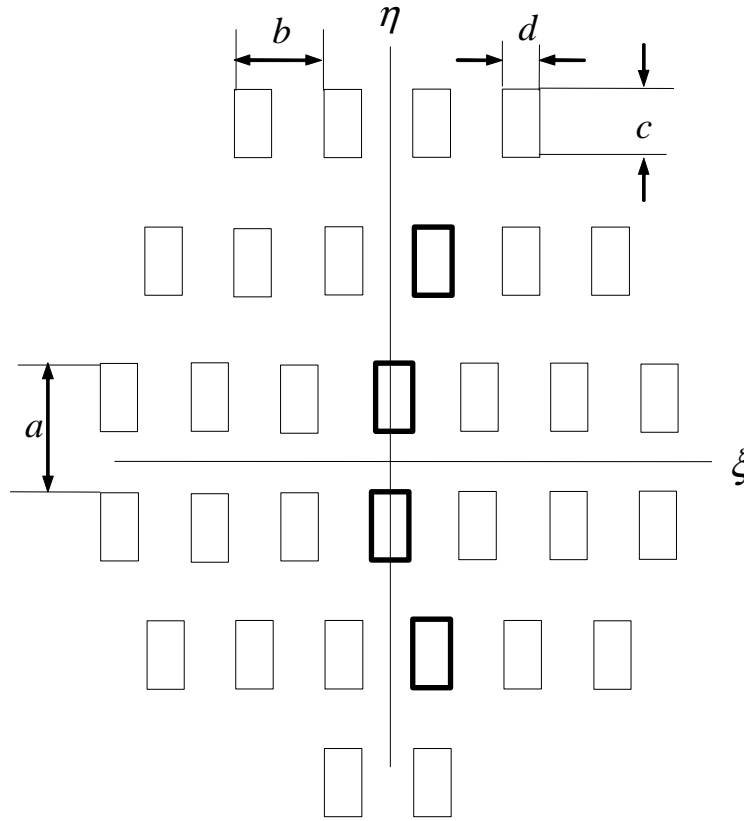


Рисунок 2.20 – Моделирование структуры трикотажа

Зависимость интенсивности в дифракционной картине для такой модели может быть выражена формулой [50]:

$$I = \frac{4a^2b^2}{c^2d^2} I_0 \left[\frac{\sin(N_1 X) \sin(N_2 Y) \sin(Xd/b) \sin(Yc/(4a))}{XY \sin X \sin Y} \right]^2 \times, \quad (2.14)$$

$$\times \left[\cos^2(Y/4) + 2 \cos(Y/4) \cos(3Y/4) \cos X + \cos^2(3Y/4) \right]$$

где $X = \pi x T_x / (\lambda L)$, $Y = \pi y T_y / (\lambda L)$; периоды структуры трикотажа $T_x = b$, $T_y = 4a$; a и b – шаг между отверстиями; c и d – размеры отверстий; N_1 – число освещенных отверстий вдоль оси η ; N_2 – число освещенных отверстий вдоль оси ξ ; λ – длина волны лазера, освещающего отверстия; L – расстояние от образца ткани до экрана, на котором проецируется дифракционная картина.

Из формулы (2.14) следует, что условиями дифракционных максимумов в этом случае являются:

$$\sin X = 0; \sin Y = 0, \quad (2.15)$$

откуда следуют выражения, связывающие расстояния между соседними основными дифракционными максимумами с периодами структуры материала, аналогичные (2.11):

$$\Delta x = \lambda L/T_x = \lambda L/b ; \Delta y = \lambda L/T_y = \lambda L/(4a), \quad (2.16)$$

которые можно использовать для экспериментального определения величин T_x и T_y по измеренным значениям Δx и Δy .

Таким образом, для любых периодических структур текстильных материалов справедлива обратная пропорция между периодами микроструктуры материала и расстояний между соседними основными максимумами на дифракционной картине.

2.2.4 Получение дифракционных картин материалов, не пропускающих свет. Дифракционные картины от изображений

Плотные тканые материалы не имеют сквозных отверстий. Поэтому они не могут непосредственно контролироваться дифракционным методом, когда проводится исследование когерентного света, прошедшего сквозь эти отверстия.

С другой стороны, внешний вид поверхности любых однослойных текстильных материалов, наблюдаемой в отраженном свете, содержит всю необходимую информацию об основных параметрах материала, которая может быть найдена при анализе изображения исследуемой поверхности, например, под микроскопом.

В [65-67] было предложено в таком случае использовать фотоснимки (диапозитивы) поверхности таких материалов, выполненные на прозрачной основе.

В качестве исследуемого образца, который освещают параллельным пучком монохроматического света с длиной волны λ , перпендикулярно его поверхности, используют негативное или позитивное фронтальное изображение исследуемого материала, полученное при прямом или обратном его освещении на любой прозрачной основе, например, фотопленке, а о величине структурных параметров

исследуемого материала судят по симметрии и взаимному расположению основных максимумов в дифракционной картине, полученной от изображения исследуемого материала на прозрачной основе, при этом о плотности по утку (P_y) судят по величине измеренного расстояния между соседними рядами основных максимумов (ΔX), идущими в направлении уточных нитей в изображении исследуемой ткани, а о плотности по основе (P_o) судят по величине измеренного расстояния между соседними рядами основных максимумов (ΔY), идущими в направлении нитей основы в изображении, причем значения величин P_y , P_o рассчитывают по формулам:

$$P_y = K\Delta X / (L\lambda); P_o = K\Delta Y / (L\lambda), \quad (2.17)$$

где K - коэффициент увеличения изображения исследуемого материала, который равен отношению истинного размера исследуемого материала к размеру его фотоизображения на прозрачной основе, L - расстояние от изображения исследуемого материала до экрана. Техническим результатом является расширение возможностей дифракционного метода применительно к любым видам тканых полотен.

Тот же метод может быть применен и к светопропускающим материалам в случае, когда проще получать на установке дифракционную картину от изображения материала, чем использовать сам образец, например, когда необходимо получить дифракционную картину тканого полотна, которое нежелательно разрезать.

Таким образом, указанный метод может быть применен к изображениям материалов любой периодической структуры, не только тканям, но и трикотажу, крученым нитям и пр.

Данный метод открывает ещё одну возможность применения явления дифракции для измерения параметров структуры материалов.

На рисунке 2.21 приведена схема эксперимента по получению дифракционной картины от изображения дифракционной картины.

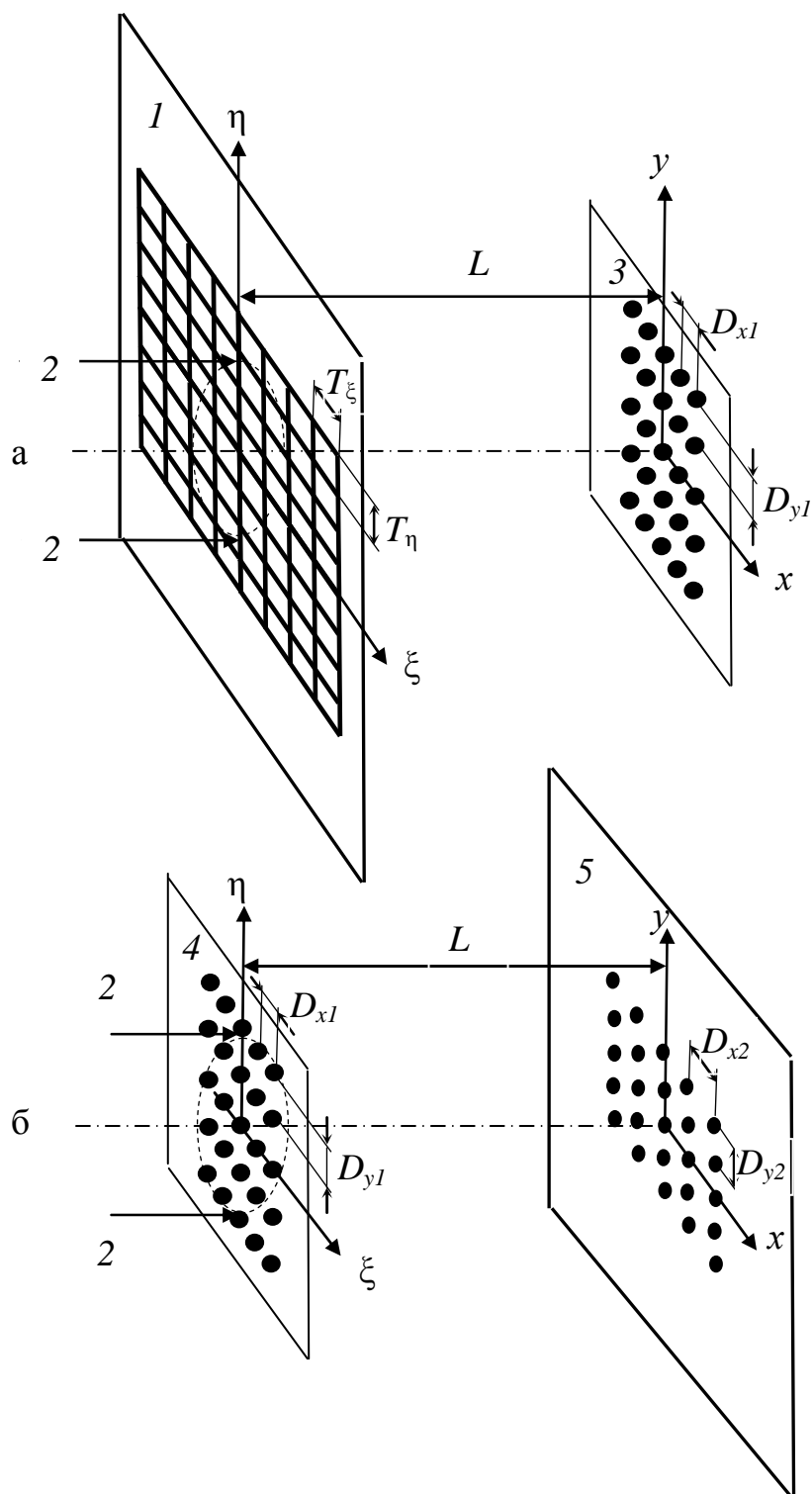


Рисунок 2.21 – Схема установки для получения дифракционной картины от дифракционной картины

На установке, аналогичной показанной на рисунке 2.7 изображение 1 исследуемого текстильного материала с периодической микроструктурой освещается лучом монохроматического света 2 (рисунок 2.21а). В результате на экране получается дифракционная картина 3. Делается снимок этой

дифракционной картины по методу, описанному в [65]. Затем снимок дифракционной картины на прозрачной основе 4 помещается в ту же установку на место 1 и освещается тем же монохроматическим лучом (рисунок 2.21б). В результате получается дифракционная картина 5.

Во всех ранее описанных методах периоды структуры были обратно пропорциональны периодам дифракционных максимумов. В расчетах необходимо было учитывать длину волны луча света лазера λ и расстояние до экрана L . Однако если попытаться получить дифракционную картину от изображения дифракционной картины на такой же установке при тех же условиях, очевидно, что расстояния между максимумами на вторичной дифракционной картине будут обратно пропорциональны расстояниям между максимумами на первичной дифракционной картине и, следовательно, прямо пропорциональны периодам структуры исходного образца.

В формулах (2.10) и (2.16) расстояние между соседними основными дифракционными максимумами зависят от расстояния между отверстиями, но не зависят от размера самих отверстий. Следовательно, для определения расстояний между максимумами на вторичной дифракционной картине можно применить те же формулы.

В допущениях дифракции Фраунгофера и для моделей, рассмотренных в параграфе 2.2, выражения для расстояний между дифракционными максимумами для рисунке 2.21а можно записать:

$$D_{x1} = \lambda L / (KT_{\xi}); \quad D_{y1} = \lambda L / (KT_{\eta}), \quad (2.18)$$

где D_{x1} и D_{y1} – средние расстояния между дифракционных максимумов вдоль осей X и Y ; T_{ξ} и T_{η} – расстояния между элементами в периодической структуре материала; λ - длина волны луча света 2; L – расстояние между объектом и экраном; K - коэффициент увеличения изображения исследуемого материала, который равен отношению истинного размера исследуемого материала к размеру его фотоизображения на прозрачной основе.

В случае если снимок дифракционной картины 4 сделан с таким же увеличением K , как и снимок образца материала, при неизменных параметрах

установки: длины волны света λ и расстояния до экрана L – можем записать по аналогии с (2.18) для вторичной дифракционной картины 5:

$$D_{x2} = \lambda L / (K D_{x1}); \quad D_{y2} = \lambda L / (K D_{y1}), \quad (2.19)$$

где D_{x2} и D_{y2} – расстояния между соседними максимумами на вторичной дифракционной картине.

Если подставить (2.18) в (2.19), то получим:

$$\begin{aligned} D_{x2} &= \frac{\lambda L}{K(\lambda L / (K T_\xi))} = \frac{\lambda L}{K} \frac{K T_\xi}{\lambda L} = T_\xi; \\ D_{y2} &= \frac{\lambda L}{K(\lambda L / (K T_\eta))} = \frac{\lambda L}{K} \frac{K T_\eta}{\lambda L} = T_\eta. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Таким образом, расстояния между соседними дифракционными максимумами на вторичной дифракционной картине оказались равными расстояниям между периодическими элементами в структуре исследуемого материала.

Однако применение такого метода определения расстояний в периодической структуре по вторичной дифракционной картине достаточно трудоёмко в силу необходимости делать снимки изображений (причем с высоким качеством и точностью), освещать их лазером на специальной установке и пр. Всё меняется, если вместо образцов текстильных материалов и их изображений на прозрачной подложке, мы воспользуемся компьютерными цифровыми изображениями и рассчитанными по ним дифракционными картинками, также представляющими собой компьютерные изображения.

2.3 Модель обработки цифрового изображения на основе анализа дифракционных картин для оценивания геометрических параметров структур материалов

Реализация модели обработки цифрового изображения дифракционной картины для оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой сводится к решению трех задач:

- построения модели дифракционной картины, включая её формальное описание и компьютерную реализацию;
- расчета и анализа угловых геометрических параметров материала с периодической структурой;
- расчета и анализа линейных геометрических параметров материала с периодической структурой.

Исходными данными для решения первой задачи является изображение дифракционной картины, описанное функцией интенсивности светового сигнала $I_0(\xi, \eta)$ в декартовой системе координат. Требуется построить модель дифракционной картины:

$$I = F(I_0(\xi, \eta), x, y), \quad (2.21)$$

где I_0 – интенсивность света в исходном изображении структуры материала, I – интенсивность света в модели дифракционной картины. Компьютерная реализация модели дифракционной картины представляет собой цифровое изображение упорядоченной системы дифракционных максимумов. По взаимному расположению дифракционных максимумов можно судить о структуре исследуемого материала.

С использованием (1.21) решаются задачи расчета и анализа угловых и линейных геометрических параметров. В качестве исходных данных выступает функция интенсивности светового сигнала $I(x, y)$, заданная компьютерным изображением смоделированной дифракционной картины. Для расчета угловых геометрических параметров анализируется распределение светового потока в модели дифракционной картины с помощью диаграммы, построенной в полярных координатах:

$$\Phi = F(I(x, y), \varphi, \alpha, R_1, R_2), \quad (2.22)$$

где Φ – световой поток в угловом секторе изображения дифракционной картины шириной α , ограниченном концентрическими окружностями с радиусами R_1 и R_2 , центры которых совпадают с центром изображения; φ – азимут сектора.

В практическом примере определения угловых параметров структуры материалов на основе анализа диаграммы рассчитываются угол кручения нити и величина перекоса нитей в ткани.

Величина угла кручения текстильной нити:

$$\beta^* = \arg \max_{\varphi \in [0, 2\pi]} \Phi(\varphi), \quad (2.23)$$

где β^* – искомый угол кручения, равный угловой координате максимума светового потока Φ .

Для определения перекоса нитей в ткани требуется найти угловые координаты глобального и следующего за ним по величине локального максимумов светового потока Φ :

$$\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\} = \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{1,2}^* \mid \varphi^* \in \mathop{\text{Arg max}}_{\varphi \in [0, 2\pi]} \Phi(\varphi) \wedge \\ \wedge \forall (\varphi^* \notin \{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}) (\Phi(\varphi^*) < \Phi(\varphi_2^*) < \Phi(\varphi_1^*)) \end{array} \right\}. \quad (2.24)$$

Величина перекоса (нарушения строго перпендикулярного расположения нитей в переплетении) равна:

$$A = \frac{\pi}{2} - |\varphi_2^* - \varphi_1^*|. \quad (2.25)$$

В задаче расчета и анализа линейных геометрических параметров материала с периодической структурой анализируется распределения интенсивности светового сигнала вдоль оси X изображения дифракционной картины $I_y(x) = I(x, y)$ при постоянном значении координаты y и вдоль оси Y изображения дифракционной картины $I_x(y) = I(x, y)$ при постоянном значении координаты x (срезы поля интенсивности вдоль осей координат). Определяются множества координат локальных максимумов интенсивности светового сигнала, соответствующих дифракционным максимумам:

$$D_X = \left\{ x_i^* \mid x^* \in \mathop{\text{Arg max}}_{x \in [0, W]} I_y(x) \wedge x_i^* < x_{i+1}^* \right\}, \quad (2.26)$$

$$D_Y = \left\{ y_j^* \mid y^* \in \mathop{\text{Arg max}}_{y \in [0, H]} I_x(y) \wedge y_j^* < y_{j+1}^* \right\}, \quad (2.27)$$

где W – ширина изображения дифракционной картины, H – высота изображения дифракционной картины. При этом качество структуры исследуемого материала оценивается параметрами, равными средним расстояниям между координатами соседних дифракционных максимумов:

$$\bar{\Delta}x = \frac{\sum_{i=1}^{P-1} (x_{i+1}^* - x_i^*)}{P-1}, \quad (2.28)$$

$$\bar{\Delta}y = \frac{\sum_{j=1}^{Q-1} (y_{j+1}^* - y_j^*)}{Q-1}, \quad (2.29)$$

где $x_i^* \in D_x$, $P = |D_x|$; $y_j^* \in D_y$, $Q = |D_y|$.

Следует отметить, что в данном случае ставится задача определения величин геометрических параметров структуры материала, которые в случае надлежащего качества не должны выходить за пределы некоторых допустимых интервалов. Допустимые интервалы задаются в виде конкретных значений как в требованиях к качеству готовых изделий, так и в требованиях к технологическому процессу предприятия.

В [48] было указано, что относительное расположение интерференционных максимумов в дифракционных картинах, рассчитанных на компьютере для компьютерных изображений полотна и трикотажа, снятых при освещении напросвет, соответствует дифракционным лазерным картинам, наблюдающимся от этих материалов при аппаратных измерениях.

Конечно, для точных расчетов не подойдут те простейшие модели, о которых было сказано в параграфе 2.2 и которые были использованы для выявления зависимости периодов структуры материала и дифракционных максимумов. Однако при современном развитии вычислительной техники не составляет труда брать интеграл Френеля-Кирхгофа численно для любой двумерной картины. В качестве источника данных может выступать компьютерное (цифровое) изображение образца материала, сделанное с помощью цифровой фотокамеры или веб-камеры. Такое компьютерное изображение

представляет собой графический файл, в котором каждой точке изображения соответствует пиксель определённой интенсивности. При высоком разрешении современных графических устройств (фотокамер, видеокамер и веб-камер) такое дискретное изображение практически неотличимо от непрерывного истинного изображения объекта. На рисунке 2.22 приведена схема выполнения фотосъёмки образца текстильного материала при различных условиях.

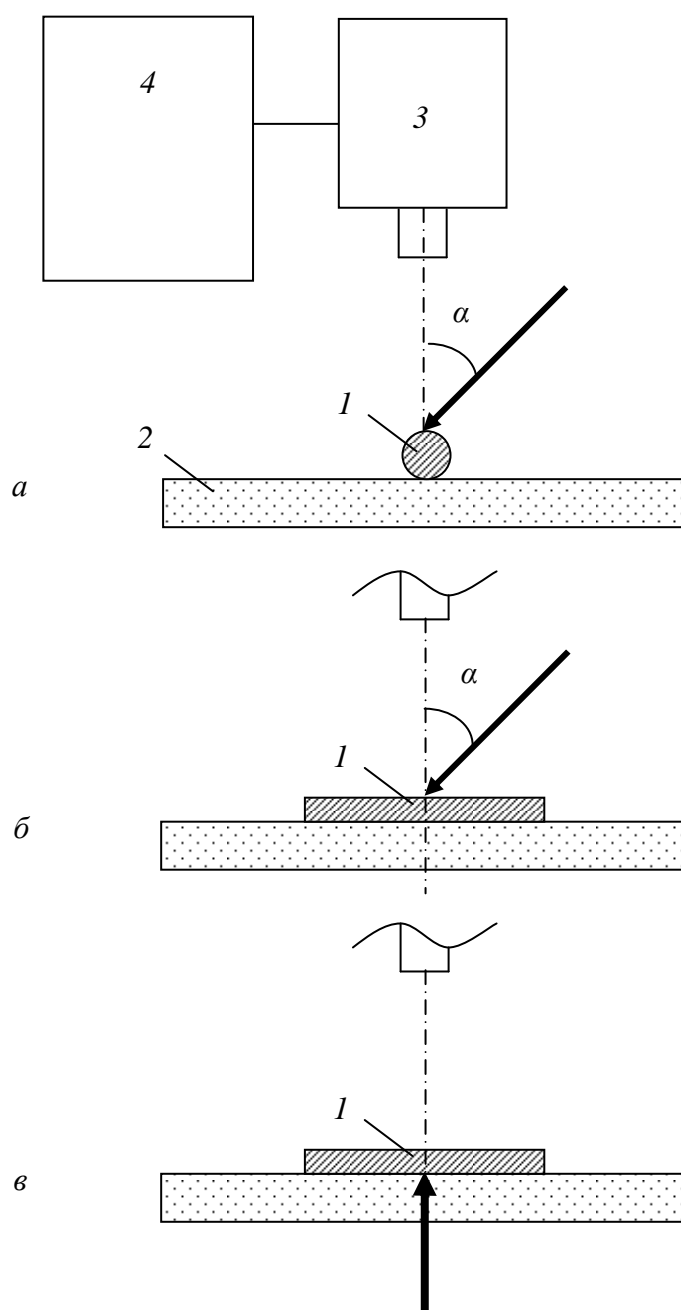


Рисунок 2.22 – Установка для получения компьютерного изображения образца

Исследуемый образец *1* освещается симметричным относительно его центра параллельным пучком монохроматического света, направленным под углом α к поверхности экрана *2*, на котором располагается образец. Снимок делается с помощью компьютерного микроскопа *3*, а снятое изображение записывается в виде файла на компьютере *4*. На рисунке 2.22а показана схема съемки нити, на рисунках 2.22б и 2.22в – ткани либо трикотажа. На рисунках 2.22а и 2.22б показаны схемы наблюдения, когда в камеру *3* попадал отраженный от образца свет, а на рисунке 2.22в – когда снимок делался «на просвет».

Система бесконтактного определения геометрических параметров структуры материалов по микроизображениям их поверхности должна включать, по меньшей мере, три компоненты: подсистему фотосъемки структуры текстильного материала с заданным разрешением, подсистему расчета и анализа дифракционных картин и подсистему вывода результатов. На рисунке 2.23 представлена структурная схема такой системы.

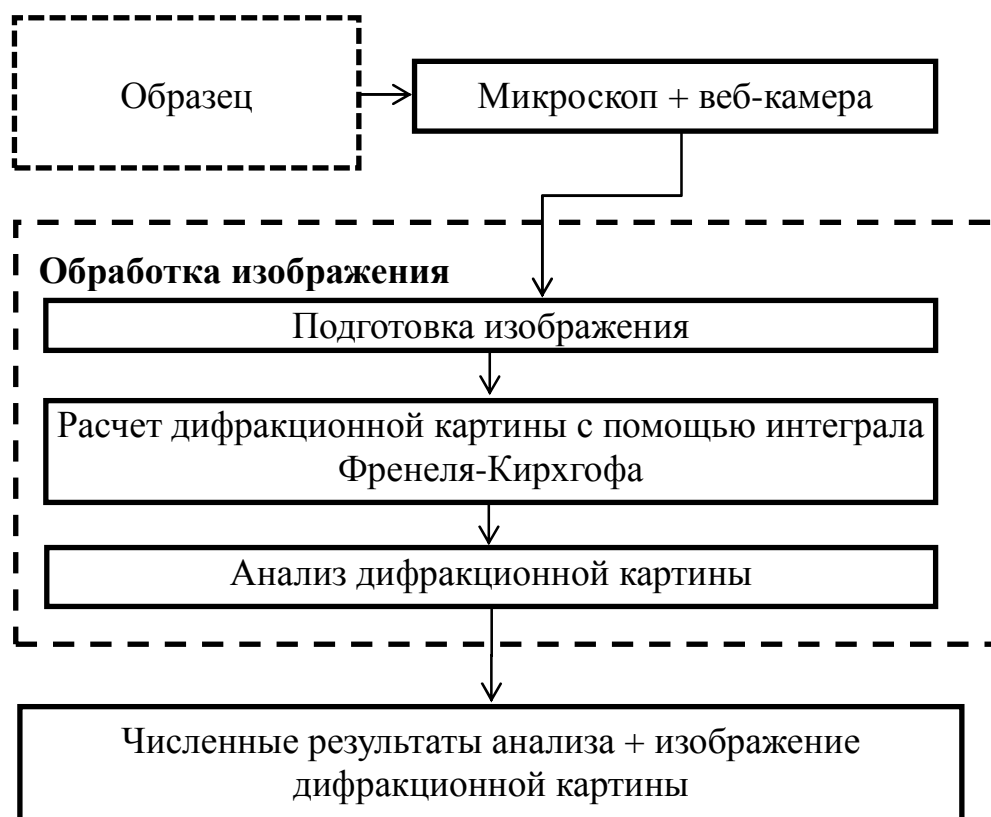


Рисунок 2.23 – Структурная схема системы

С помощью веб-камеры, установленной на микроскопе, делается увеличенный снимок микроструктуры образца, который передаётся на персональный компьютер и сохраняется как графический файл. Формат файла может быть любым поддерживаемым веб-камерой растровым форматом. Обычно это *JPEG*.

Далее изображение передаётся программе, исполняемой на персональном компьютере. Программа может функционировать как на том же компьютере, что подключен к веб-камере, так и на другом компьютере, на который передан файл с изображением образца.

Программа состоит из трех основных блоков:

- блок предварительной обработки изображения;
- блок расчета дифракционной картины во фраунгоферовом приближении численным решением интеграла Френеля-Кирхгофа (1.17);
- блок автоматизированного анализа полученной дифракционной картины с целью определения параметров структуры исследуемого образца.

Полученная дифракционная картина вместе с результатами анализа выводится на монитор пользователя.

Система имеет механизм обратной связи, заключающийся в том, что пользователь, изучив полученные результаты, может скорректировать параметры анализа.

Выводы к главе 2

1. Освещая образец текстильного материала лучом монохроматического света, на удалённом экране можно получить дифракционную картину, анализируя которую можно определить геометрические параметры структуры материала. В данном случае наблюдается дифракция Фраунгофера, которая может быть математически описана интегралом Френеля-Кирхгофа (1.17).

2. Ранее были разработаны методы определения основных геометрических параметров материала (величина крутки нити, плотность ткани по основе и утку,

поверхностная плотность ткани и трикотажа), но они требуют использования дифракционной установки (рисунок 2.7).

3. Развитие информационных технологий, в первую очередь, появление цифровой фотографии и увеличение вычислительной мощности компьютеров, позволяют вместо физически получаемой дифракционной картины использовать расчётную дифракционную картину [48]. Автоматизированный анализ такой дифракционной картины будет проводиться целиком на компьютере.

4. Возможности технологии цифровой фотографии и развитие вычислительной техники позволяют разработать программно-аппаратную систему бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой по микроизображениям их поверхности. Разработана структурная схема такой системы.

3 Алгоритмическое обеспечение системы бесконтактного определения геометрических параметров структуры материалов

3.1 Алгоритм построения дифракционной картины по микроизображению материала с помощью быстрого Фурье-преобразования

В параграфе 1.4.2 приведены формулы для аналитического расчета дифракционных картин, получаемых при освещении образцов текстильных материалов, имеющих периодическую структуру, пучком монохроматического света (дифракция Фраунгофера). Используя эти формулы, можно рассчитать дифракционную картину, имея в качестве источника данных цифровую фотографию образца материала, сделанную под микроскопом с достаточным увеличением. Схема, поясняющая расчет, приводится на рисунке 3.1.

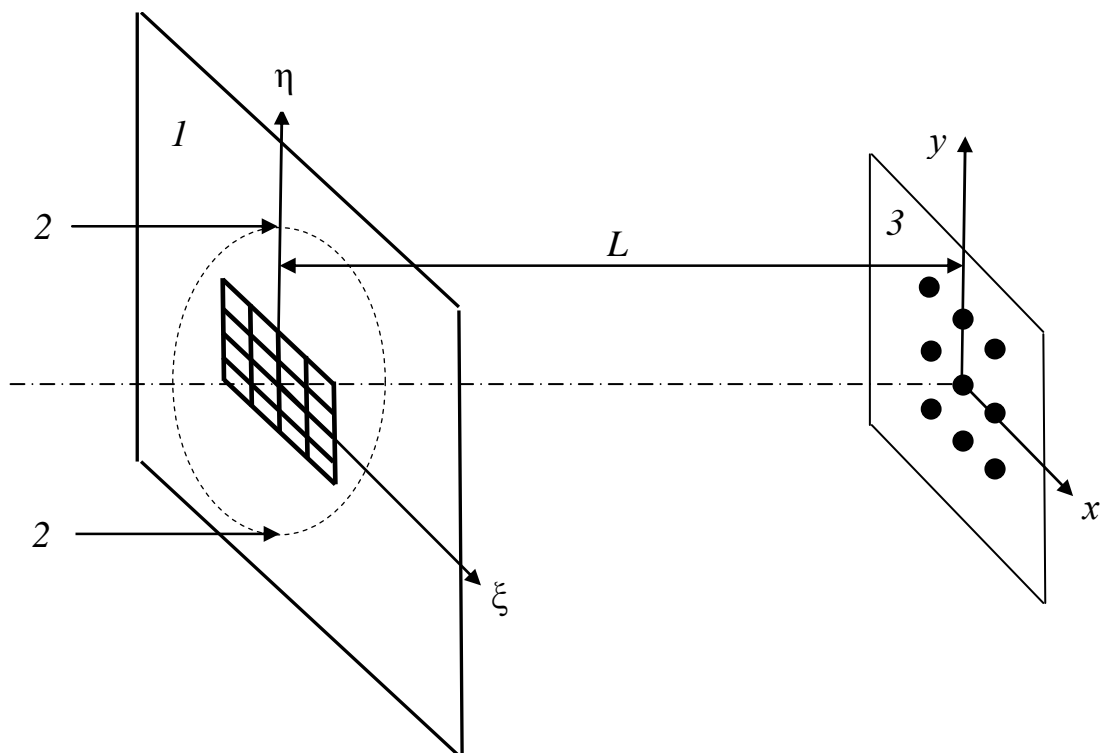


Рисунок 3.1 – Схема, поясняющая расчет:

1 – исследуемый образец текстильного материала;

2 – пучок монохроматического света; 3 - экран

Амплитуда светового сигнала U в дифракционной картине на экране 3 в точке с координатами (x, y) , наблюдаемой от плоского непрозрачного объекта с

отверстиями l , освещаемого плоской монохроматической волной 2 постоянной интенсивности длиной λ перпендикулярно его поверхности, в скалярном приближении (без учёта поляризации светового вектора E) и выполнении приближения Фраунгофера ($L\lambda \gg (\xi^2 + \eta^2)$) с достаточной для практических применений точностью описывается интегралом Френеля–Кирхгофа (1.17), который можно записать в виде конечной суммы:

$$\begin{aligned} U_{k,l} &= C \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi p\xi}{\lambda}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi q\eta}{\lambda}\right] \mu(\xi, \eta) \Delta^2 = \\ &= C \Delta^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi kn\Delta^2}{\lambda L}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} u_{n,m} \exp\left[-\frac{2i\pi lm\Delta^2}{\lambda L}\right] \end{aligned}, \quad (3.1)$$

где $U(x, y)$ – амплитуда светового сигнала в фраунгоферовой дифракционной картине; C – константа; λ – длина плоской монохроматической волны, освещающей объект; p и q – относительные координаты ($p = x/L$ и $q = y/L$); L – расстояние от объекта до экрана ($L \gg x, y$); ξ и η – координаты, определяющие положение точек и находящиеся в плоскости объекта; N, M – размер исходного изображения в пикселях по ширине и высоте; $u_{n,m}$ – амплитуда интенсивности пикселя исходного изображения в точке с номерами n и m .

Предполагается, исходное изображение образца материала и результирующая расчетная дифракционная картина будут представлять собой двумерные компьютерные дискретные изображения, состоящие из одинакового количества пикселей (по ширине и высоте). Каждый из пикселей характеризуется определённой яркостью (интенсивностью), величина которой записывается целым положительным числом от 0 до 255.

Связь между координатами ξ и η в плоскости изображения образца и координатами x и y в плоскости рассчитываемой дифракционной картины описывается следующими соотношениями. Так как исходное изображение дискретно, состоит из отдельных пикселей, равноудалённых друг от друга, то обозначим расстояние между соседними пикселями как Δ . Тогда для координат каждого пикселя в изображении и рассчитываемой дифракционной картине, выводимой на экран того же компьютера можно выразить соотношениями:

$$\xi = n\Delta; \eta = m\Delta; x = k\Delta; y = l\Delta, \quad (3.2)$$

где n, m, k , и l – номера пикселей вдоль координат, соответственно ξ, η, x и y ;

$$n = -N/2, -N/2+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2-1;$$

$$m = -M/2, -M/2+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M/2-1.$$

Сумма в выражении (2.5) с точностью до константы ($C\Delta^2$) совпадает с известной формулой для дискретного двумерного преобразования Фурье, используемого в задачах обработки изображений [68]:

$$Z_{k,l} = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp[-2i\pi kn / N] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \exp[-2i\pi lm / M] z_{n,m}, \quad (3.3)$$

где ряд $\{Z_{k,l}\}$ есть прямое преобразование Фурье для ряда $\{z_{n,m}\}$ при выполнении условия

$$N\Delta^2/(\lambda L) = 1. \quad (3.4)$$

Мы имеем право выбрать величины длины световой волны λ и расстояние между образцом и экраном L в нашем численном эксперименте таким образом, чтобы условие (3.4) выполнялось. В результате из расчетной формулы исчезают конкретные значения параметров дифракционной установки.

Рассматривая набор исходных сигналов $z_{n,m}$ как матрицу со строками и столбцами, можно отметить, что двумерное преобразование Фурье для такой матрицы есть последовательность обычного линейного преобразования Фурье по строкам и затем линейного преобразования Фурье полученных значений по столбцам.

Таким образом, задача вычисления интеграла Френеля-Кирхгофа для дискретного двумерного набора значений амплитуды сигнала сведена к задаче одномерного дискретного преобразования Фурье.

Прямое вычисление конечной суммы (3.3) является достаточно ресурсоёмким даже для современных компьютеров, поскольку связано с большим количеством повторяющихся суммирований, вычислений синусов и косинусов.

Для ускорения расчета можно применить оптимизирующие алгоритмы, известные для преобразования Фурье. Для этого случая существует классический

алгоритм быстрого преобразования Фурье [68], позволяющий выполнить как прямое, так и обратное преобразования с минимумом выполняемых операций и расходом памяти компьютера.

Рассмотрим формулы прямого и обратного дискретного преобразования Фурье для ряда $\{z_k\}$, где $k = 0, 1, 2, \dots, N$.

Прямое дискретное преобразование Фурье [68]:

$$Z_k = \sum_{n=0}^N z_n \exp[-2i\pi kn / N] \quad (3.5)$$

Обратное дискретное преобразование Фурье:

$$z_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N Z_k \exp[2i\pi kn / N] \quad (3.6)$$

Сравнивая выражения (3.5) и (3.6) с выражением (3.3), можно заметить, что индексация в (3.3) начинается с отрицательных чисел, а точка начала отсчёта находится в центре изображения.

Представим (3.3) в виде комбинации формул (3.5) и (3.6), для которых существует быстрый алгоритм преобразования.

Исходный набор величин, над которыми необходимо выполнить преобразование, является матрицей, где сигналы расположены по строкам и столбцам. Сначала выполним преобразование для каждой строки (3.7), затем – по столбцам (3.8):

$$Z'_{k,l} = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} z_{n,l} \exp[-2i\pi kn / N] \quad (3.7)$$

$$Z_{k,l} = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} Z'_{k,m} \exp[-2i\pi lm / M] \quad (3.8)$$

Таким образом, двумерное преобразование Фурье свелось к последовательности одномерных преобразований.

Рассмотрим одномерное преобразование Фурье для ряда $\{g_b\}$

$$G_b = \sum_{j=-J/2}^{J/2-1} g_j \exp[-2i\pi jb / J], \quad (3.9)$$

где J – количество элементов в ряду, $b = -J/2, -J/2+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, J/2-1$. Чтобы можно было воспользоваться алгоритмом быстрого преобразования Фурье,

данный ряд необходимо представить в виде комбинации рядов с индексацией, начинающейся с нуля.

Для этого введём следующие вспомогательные ряды:

$$1. G_b^I = \sum_{j=0}^{J/2-1} g_j \exp[-2i\pi j b / J] = \sum_{j=0}^J g_j \exp[-2i\pi j b / J], \text{ где } g_j=0 \text{ при } j > (J/2-1),$$

$$b = 0, 1, \dots, J$$

$$2. G_b^{II} = \sum_{j=-J/2}^0 g_j \exp[-2i\pi j b / J] = \sum_{h=0}^J g_{-h} \exp[2i\pi h b / J], \text{ где } h = -j, g_{-h}=0 \text{ при } h=0 \text{ и}$$

$$\text{при } h > J/2, b = -J, \dots, -1, 0$$

$$3. \{G_b^{III}\} = \{G_b^I\}$$

$$4. \{G_b^{IV}\} = \{G_b^{II}\}.$$

Ряд 1 – это прямое преобразование Фурье, которое мы можем заменить алгоритмом прямого быстрого преобразования Фурье. Ряд 2 основан на обратном преобразовании Фурье (только без деления на J), которое можно заменить алгоритмом обратного быстрого преобразования Фурье с последующим умножением результата на J .

Для каждого из этих четырех рядов может быть использован алгоритм быстрого прямого или обратного преобразования Фурье:

$$G_b = \sum_{j=-J/2}^{J/2-1} g_j \exp[-2i\pi j b / J] = G_b^I + G_b^{II} + G_b^{III} + G_b^{IV} = \text{БПФ}(G_b^I) + \text{ОБПФ}(G_b^{II}) * J + \text{ОБПФ}(G_b^{III}) * J + \text{БПФ}(G_b^{IV}) \quad (3.10)$$

где $\text{БПФ}()$ и $\text{ОБПФ}()$ – соответственно функции прямого и обратного быстрого преобразования Фурье для рядов.

Если для каждого фиксированного l мы приравняем $k = b$, $Z'_{k,l} = G_b$, $N = J$, $z_{n,l} = g_j$, $n = j$, то мы можем использовать выражение (3.10) для выполнения преобразования Фурье по строкам (3.7). После этого мы можем приравнять $l = b$, $Z_{k,l} = G_b$, $Z'_{k,m} = g_j$, $M = J$, $m = j$ и использовать выражение (3.10) для вычисления (3.8).

Найдя таким образом амплитуду светового сигнала в каждой точке дифракционной картины, мы по формуле (1.19) можем определить интенсивность сигнала в каждой точке дифракционной картины.

Алгоритм быстрого преобразования Фурье может быть применен только к рядам с длиной, являющейся степенью двойки:

$$N = 2^t,$$

где t – целое положительное число.

Это ограничение не является существенным, так как цифровые фотографии обычно имеют размер, кратный 128 пикселям, а в редких случаях, когда это не так, фотографию можно “подрезать”.

Вместе с тем, приобретается значительный выигрыш в скорости работы программы. Оценка быстродействия обычного алгоритма преобразования Фурье [68]:

$$O(N) = N^2. \quad (3.11)$$

Оценка быстродействия алгоритма быстрого преобразования Фурье [68]:

$$O(N) = N \log_2 N. \quad (3.12)$$

Оценка для предложенного алгоритма:

$$O(N) = 4N \log_2 N. \quad (3.13)$$

Из-за того, что пришлось использовать вспомогательные ряды, оценка по сравнению с быстрым преобразованием Фурье ухудшилась, тем не менее, она стала значительно лучше быстродействия обычного алгоритма N^2 . Удобством алгоритма является возможность его применения сначала по строкам, затем – по столбцам, что существенно для изображений с высоким разрешением.

Перед использованием исходного цифрового изображения текстильного материала для расчета дифракционной картины его необходимо подвергнуть некоторой предварительной обработке.

Прежде всего, размеры изображения приводятся к значениям, являющимся степенями двойки. Это связано с условием применимости алгоритма быстрого преобразования Фурье. Часто в этом нет необходимости. Однако в общем случае такая проверка должна выполняться и при необходимости производиться обрезка

изображения до ближайшего меньшего размера, равного 2^t , где t – целое положительное число. Для определения нового размера изображения используется функция $\log_2(x)$:

$$H_{new} = 2^{\log_2(H_{old})}, \quad (3.14)$$

$$W_{new} = 2^{\log_2(W_{old})}, \quad (3.15)$$

где H и W – соответственно высота и ширина изображения; функция $\log_2(x)$ представляет ближайшее максимальное целое значение логарифма по основанию 2 от x .

Следующая процедура, которую надо выполнить, – превращение изображения в монохромное. Дифракция Фраунгофера наблюдается от плоской монохроматической волны. Смоделировать этот эффект можно одним из двух способов. Во-первых, поскольку цвет пикселя формируется из трёх цветовых компонент разной интенсивности – красного, зелёного и синего (модель *RGB*) – можно “погасить” два цвета, установив их интенсивность в ноль, и оставить прежнее значение только одной компоненты, например, зелёной. Во-вторых, можно превратить изображение в черно-белое, преобразовав яркости пикселя по каждому из каналов в значение яркости монохромного пикселя. Во втором случае яркость пикселя черно-белого изображения определяется формулой:

$$C_{WB} = k_R C_R + k_G C_G + k_B C_B, \quad (3.16)$$

где C_R , C_G , C_B – исходные яркости каждой цветовой компоненты; C_{WB} – новая “черно-белая” яркость, которая будет присвоена каждой из трёх цветовых компонент точки изображения (в компьютерных терминах, пикселя); k_R , k_G , k_B – коэффициенты преобразования яркостей компонент.

Далее на чёрно-белое изображение накладывается световое пятно, имитирующее освещение образца лучом лазера. Особенность лазерного луча [1] заключается в том, что интенсивность света в нём уменьшается экспоненциально от центра к краю, у самого края обращаясь практически в ноль (рисунок 3.2). Таким образом, пятно света от лазера на образце не имеет резкой границы между светом и тенью. Благодаря этому дифракционная картина от образца получается

чистой, без так называемых $N-1$ дополнительных максимумов между каждыми основными, которые значительно затрудняют количественный анализ дифракционной картины [69-71].

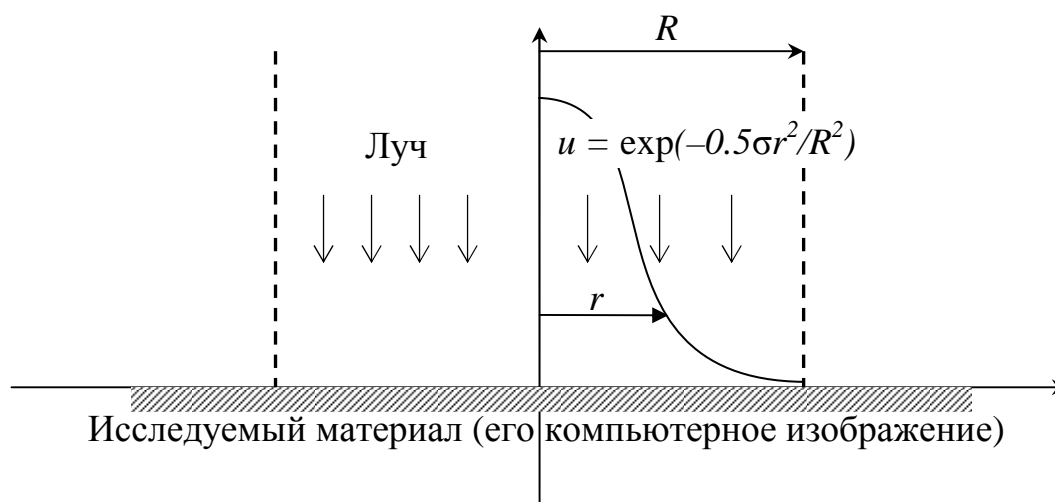


Рисунок 3.2 – Изменение интенсивности светового пятна, «освещающего» компьютерное изображение исследуемого материала

Распределение амплитуды в световом пятне в этом случае описывается зависимостью:

$$u_p(\xi, \eta) = u_{p_0} \exp\left[-\frac{\sigma(\xi^2 + \eta^2)}{2R^2}\right], \quad (3.17)$$

где ξ, η – координаты точки рисунка относительно центра пятна; u_{p_0} – яркость пикселя в центре светового пятна; R – радиус пятна света; σ – коэффициент, определяющий мягкость перехода от света к тени.

В ходе разработки вычислительного метода был опробован также более общий случай распределения интенсивности света в пятне: в центре пятна – круг с постоянной максимальной интенсивностью освещения радиусом R_{min} , далее интенсивность освещения убывает по экспоненциальному закону до границы пятна света, определяемой радиусом R_{max} . В природе такого источника света не существует, однако компьютер позволяет его смоделировать (рисунок 3.3).

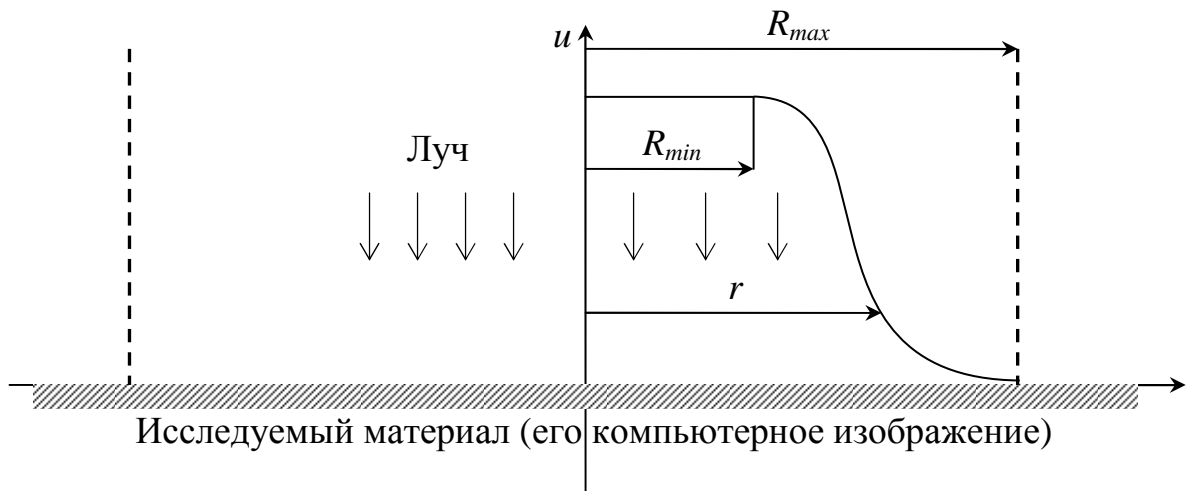


Рисунок 3.3 – Световое пятно с центральным кругом

В этом случае закон распределения амплитуды в световом пятне описывается зависимостью:

$$u_p(\xi, \eta) = u_{p0} \exp\left[-\frac{\sigma(R_{\min} - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2}{2R_{\max}^2}\right], \quad (3.18)$$

где R_{\min} – внутренний радиус пятна, R_{\max} – внешний радиус, $R_{\min}^2 \leq \xi^2 + \eta^2 \leq R_{\max}^2$.

При $\xi^2 + \eta^2 > R_{\max}^2$

$$u_p(\xi, \eta) = 0 \quad (3.19)$$

При $\xi^2 + \eta^2 < R_{\min}^2$ амплитуда постоянна и равна u_{p0} .

К полученной матрице интенсивности можно применить быстрое преобразование Фурье, сначала по строкам, затем по столбцам. В результате имеем распределение амплитуды интенсивности. Это будет двумерный массив комплексных чисел. Умножив каждое из этих чисел на комплексно сопряженное, получаем матрицу интенсивности дифракционной картины.

Производя анализ распределения интенсивностей в такой матрице, мы можем определять различные геометрические параметры структуры текстильного материала, изображенного на исходной фотографии.

Алгоритм 1 расчета дифракционной картины по цифровой фотографии структуры материала может быть записан в виде следующих шагов обработки изображения.

Шаг 1.1. Если ширина или высота цифрового изображения структуры, измеренные в пикселях, не равны двойке, возведённой в целую степень, то обрезать изображение таким образом, чтобы это условие выполнялось (условие применимости алгоритма быстрого преобразования Фурье).

Шаг 1.2. Если ширина изображения не равна высоте, то обрезать изображение, чтобы оно стало квадратным.

Шаг 1.3. Если изображение цветное, то преобразовать его в чёрно-белое так, чтобы каждый пиксель характеризовался только одним значением яркости.

Шаг 1.4. Наложить на изображение, полученное на шаге 1.3, световое пятно согласно (3.18)-(3.19).

Шаг 1.5. Скопировать величины яркостей в двумерный массив комплексных чисел с индексами от $-N/2$ до $N/2-1$ и от $-M/2$ до $M/2-1$.

Шаг 1.6. Для каждой строки двумерного массива, полученного на шаге 1.5, выполнить прямое быстрое преобразование Фурье для элементов с положительными индексами и обратное быстрое преобразование Фурье для элементов с отрицательными индексами (3.10). Результаты записать в строки исходного массива.

Шаг 1.7. Повторить шаг 1.6 для столбцов массива, измененного на шаге 1.5.

Шаг 1.8. Для каждой комплексной величины из массива, изменённого на шаге 1.7, вычислить интенсивность I , используя (1.19), и результат записать в новый массив вещественных чисел. Полученный массив будет массивом интенсивностей точек смоделированной дифракционной картины.

Шаг 1.9. Для визуализации результата моделирования для пользователя построить новое цифровое изображение, где яркость каждого пикселя будет целым числом от 0 до 255, пропорциональным значению соответствующего элемента массива интенсивностей, полученного на шаге 1.8. Яркость 255 будет иметь центральный максимум.

Для последующего анализа следует сохранять в памяти компьютера как цифровое изображение дифракционной картины, так и массив интенсивностей.

3.2 Алгоритмы оценивания геометрических параметров структур материалов по распределению интенсивности в расчетных дифракционных картинах.

Как было показано в параграфе 2.2, асимметричность исходного объекта ведёт к асимметричности его дифракционной картины. В случае крученой нити это элементарные нити (или стренги), из которых состоит крученая нить, наклонённые под некоторым углом к оси нити (рисунок 3.4).

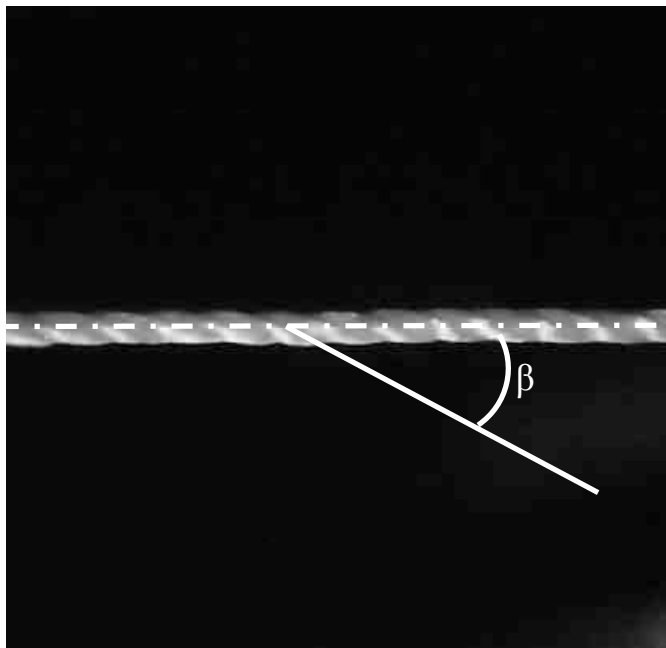


Рисунок 3.4 – Крученая нить

Дифракционная картина может быть получена освещением нити лучом монохроматического света (лазера) либо рассчитана по методу, описанному в параграфе 3.1, по микрофотографии нити, сделанной под микроскопом.

3.2.1 Алгоритм подготовки изображения нити

В качестве исходных изображений использовались цифровые фотографии нитей размером 256 на 256 либо 512 на 512 пикселей, сделанные обычной бытовой веб-камерой, установленной на микроскоп. Исследуемая нить освещалась сверху, таким образом, на снимке фиксировался отраженный от неё

свет (снимок «на отражение»). Нить на снимке обязательно должна располагаться так, чтобы её ось шла сверху вниз через центр изображения (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Исходное цифровое изображение

В случае если исходное изображение было цветным, оно в первую очередь должно быть преобразовано к чёрно-белому (оттенки серого) по формуле (3.16). Затем на изображение накладывается световое пятно (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Изображение с наложенным пятном, имитирующим освещение лазером

Световое пятно рассчитывается по формулам (3.18)-(3.19). Яркость каждого пикселя изображения преобразуется по правилам:

- яркость пикселей за пределами радиуса пятна R_{max} обнуляется;
- яркость пикселей в пределах радиуса R_{min} остаётся неизменной;
- яркость пикселей между R_{min} и R_{max} уменьшается по экспоненциальному

закону.

По полученному таким образом изображению может быть рассчитана фраунгоферова дифракционная картина с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа.

Для этого может быть использован алгоритм быстрого преобразования Фурье (3.10). Расчетная дифракционная картина приведена на рисунке 3.7.

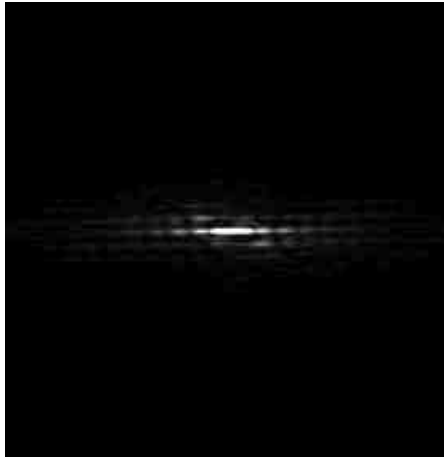


Рисунок 3.7 – Дифракционная картина нити

Того же результата можно добиться, осветив исследуемую нить лучом лазера и получив на удалённом экране дифракционную картину, которая фотографируется цифровой фотокамерой. В дальнейшем анализе будет использоваться файл с изображением дифракционной картины.

3.2.2 Распределение интенсивности по квадрантам изображения и определение направления крутки

Разделим компьютерное изображение дифракционной картины нити на четыре квадранта по горизонтали осью OX и по вертикали осью OY (рисунок 3.8). Начало отсчета точку O расположим в центре дифракционной картины (там же располагается и центральный максимум дифракционной картины). Ось OY направлена параллельно оси нити. Для удобства на рисунке 3.8 приведены негативы изображений.

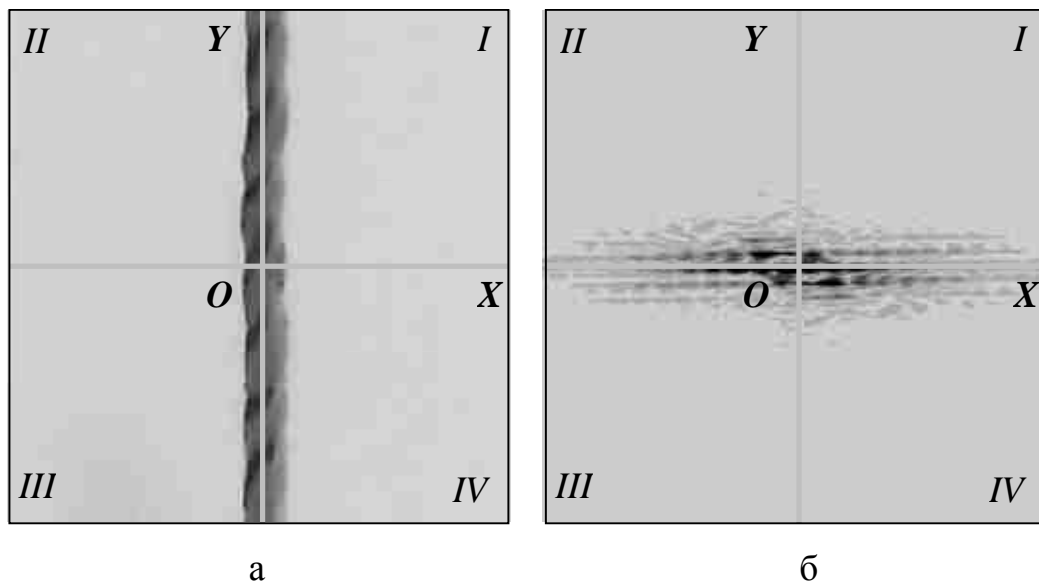


Рисунок 3.8 – Негативы изображения нити (а) и её дифракционной картины (б)

Оси OX и OY делят изображение на четыре равные части. Квадранты нумеруются римскими цифрами против часовой стрелки. Для определения направления крутки нити достаточно подсчитать и сравнить яркость пикселей компьютерного изображения дифракционной картины во всех четырех квадрантах.

В случае S -крутки нити суммарная интенсивность дифракционных максимумов в квадрантах I и III существенно больше, чем суммарная интенсивность в квадрантах II и IV . А в случае Z -крутки всё наоборот: суммарная интенсивность дифракционных максимумов в квадрантах I и III существенно меньше, чем суммарная интенсивность в квадрантах II и IV . Таким образом, по дифракционной картине можно судить о направлении крутки нити.

Очевидным преимуществом данного метода является возможность определять направление крутки в заданном участке нити, включающем только несколько витков, что необходимо, например, для нитей с ложной круткой. Кроме того, образец в результате исследования не разрушается.

В случае определения направления крутки по расчётной дифракционной картине съемку нити цифровой камерой можно производить как в заводской лаборатории, так и непосредственно в производственном цеху. Дальнейшая обработка снимка осуществляется на компьютере.

3.2.3 Диаграмма распределения интенсивностей в полярных координатах. Алгоритмы определения угла кручения нити и перекоса уточной нити в ткани

В параграфе 3.2.2 анализ асимметрии дифракционной картины осуществлялся на основе анализа суммарной яркости пикселей компьютерного изображения в четырёх его равновеликих квадрантах. Однако для более точного анализа распределения интенсивности дифракционных максимумов, например, для определения величины угла кручения нити, целесообразно использовать более точный инструмент.

В качестве такого инструмента может выступать диаграмма распределения интенсивностей (яркостей) пикселей компьютерного изображения дифракционной картины, построенная в полярных координатах.

На рисунке 3.9 приведена схема, поясняющая построение этой диаграммы.

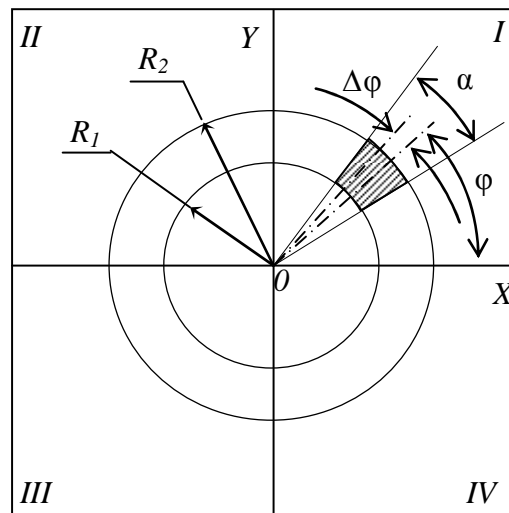


Рисунок 3.9 – Схема построения диаграммы распределения интенсивностей дифракционных максимумов в полярных координатах

Центр исследуемой дифракционной картины всегда совпадает с центром дифракционного максимума, имеющего максимальную интенсивность, который всегда находится в центре симметрии этой картины. На изображение накладывается кольцо симметрично относительно ее центра (точка O) и радиусами R_1 (внутренний) и R_2 (внешний).

Выделяется сектор кольца с угловым размером α (на рисунке 3.9 заштрихован). Сектор находится на угловом расстоянии φ от оси OX . Обозначим заштрихованную площадь этого сектора, находящуюся между окружностями с радиусами R_1 и R_2 , как ΔS . Тогда среднюю интенсивность внутри сектора можно посчитать по формуле:

$$I_{av} = \frac{\sum \Phi_{pix}}{\Delta S}, \quad (3.20)$$

где в числителе – суммарный световой поток, испускаемый всеми пикселями изображения, попавшими в выделенный сектор ΔS .

Повторяя вычисления по формуле (3.20) для всех значений угла φ от 0 до 2π с шагом $\Delta\varphi$ при постоянном значении ΔS , и соединив полученные точки плавной замкнутой кривой, получим зависимость углового распределения средней интенсивности засветки в исследуемой дифракционной картине (рисунок 3.10).

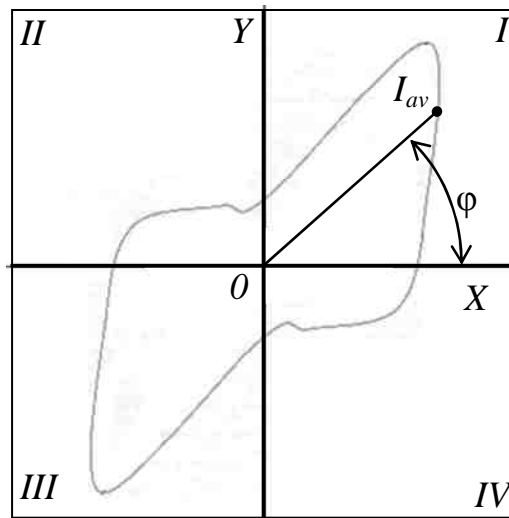


Рисунок 3.10 – Диаграмма распределения интенсивности (кривая серого цвета)

Угол сектора α может быть задан формулой:

$$\alpha = 2\pi/N, \quad (3.21)$$

где N – положительное четное число. В этом случае диаграмма охватывает ровно всю окружность.

Из-за того, что цифровое изображение по своей природе дискретно (состоит из пикселей конечных размеров), угол α задавать очень малым нельзя, иначе в

секторы будет попадать не одинаковое число пикселей. Понятно, что в таком случае расчет интенсивности для секторов будет отличаться не в силу различной яркости, а в силу различного количества пикселей в секторе, что ведёт к неверному отсчету. Чтобы избежать этой проблемы, предлагается не устремлять к нулю ширину сектора, а вместо этого на каждом шаге расчета смещать сектор конечного постоянного размера на «бесконечно малый» угол $\Delta\varphi$. Его величина задается в несколько раз меньше, чем выбранная величина α , и определяется формулой:

$$\Delta\varphi = \alpha/M, \quad (3.22)$$

где M – целое положительное число.

Таким образом, на каждом шаге в смещённый сектор попадает некоторое количество пикселей из предыдущего сектора, что сглаживает искомую зависимость.

Как было отмечено в параграфе 2.2.1, дифракционная картина от нити, освещенной сверху, имеет два набора относительно ярко выраженных дифракционных максимумов:

- располагающихся в направлении, перпендикулярном оси нити;
- располагающихся в направлении, перпендикулярном виткам стренг.

Первый набор соответствует набору дифракционных максимумов при дифракции света на щели. В качестве щели выступает сама нить. Этот набор не несёт информации о величине крутки и препятствует её правильному определению.

Второй набор аналогичен дифракционной картине от решетки, щели в которой имеют некоторый постоянный наклон к оси нити. Очевидно, что величина этого наклона будет влиять на расположение дифракционных максимумов от витков нити.

Воспользуемся для определения величины наклона дифракционных максимумов диаграммой распределения интенсивностей (рисунок 3.11). Исходное изображение нити для получения дифракционной картины подготовлено так, как было описано в параграфе 3.2.1.

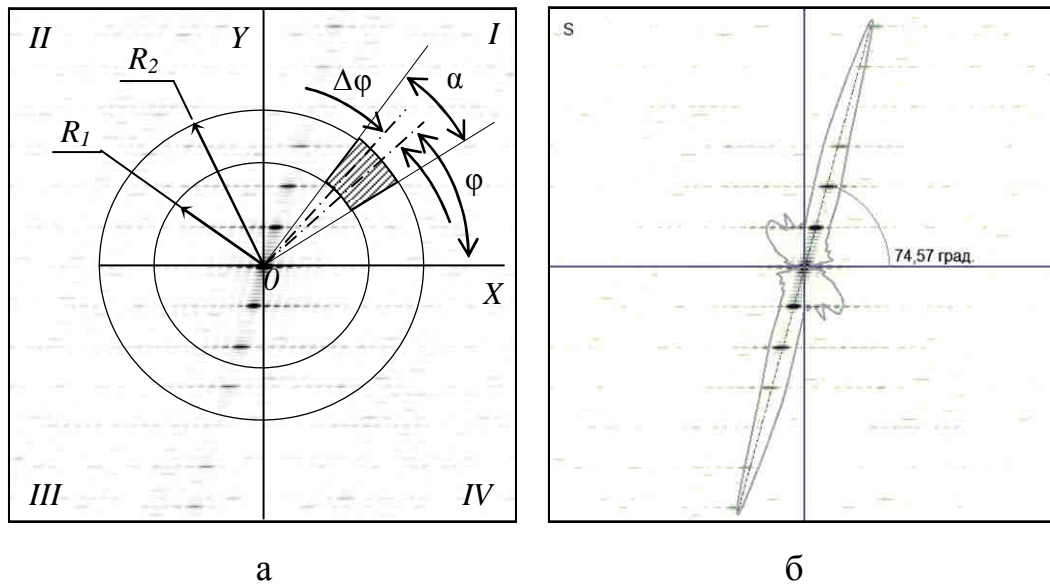


Рисунок 3.11 – Построение диаграммы распределения интенсивностей для дифракционной картины крученой нити

Диаграмма рассчитывается по формуле (3.20), при этом из расчёта следует исключить интенсивности секторов вблизи углов 0° и 180° . Это необходимо для исключения влияния на расчёт набора дифракционных максимумов от нити как от щели. На рисунке 3.11б через наиболее удалённую от центра точку диаграммы проведена штрихпунктирная линия. Угол между этой линией и осью OX с точностью до погрешности построения диаграммы равен углу крутки нити. Для S -направлений крутки угол крутки равен непосредственно углу наклона диаграммы. Для Z -направлений крутки угол крутки, соответственно, равен 180° минус угол наклона диаграммы.

Алгоритм 2 построения диаграммы распределения интенсивности и последующего определения величины угла кручения нити состоит из следующих шагов.

Шаг 2.1. Цифровая фотография нити ориентируется так, чтобы ось нити располагалась строго вертикально (рисунок 3.5).

Шаг 2.2. Рассчитывается дифракционная картина по цифровому изображению нити по алгоритму 1.

Шаг 2.3. На изображение рассчитанной дифракционной картины накладывается кольцо с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 . Внутри кольца на угловом расстоянии φ от оси OX строится сектор, ограниченный внутренней и

наружной границами кольца и с угловым размером α . Определяется суммарная интенсивность дифракционных максимумов внутри сектора. Это значение откладывается на диаграмме интенсивности как величина радиус-вектора для угла φ .

Шаг 2.4. Сектор, построенный на шаге 2.3, сдвигается на угол $\Delta\varphi$. Как и на шаге 2.3, рассчитывается суммарная интенсивность дифракционных максимумов внутри сектора после сдвига, и это значение откладывается на диаграмме как величина радиус-вектора для угла $(\varphi + \Delta\varphi)$.

Шаг 2.5. Повторяется шаг 2.4 для $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. При этом конец радиус-вектора опишет кривую диаграммы.

Шаг 2.6. Построенная на шаге 2.5 диаграмма будет иметь две точки максимума (симметричные относительно начала координат). Через точку максимума, находящуюся в первых двух четвертях изображения, и центр изображения проводится прямая. Угол между этой прямой и осью OX и будет искомым углом кручения.

В параграфе 2.2.2 указывалось, что искажение периодической структуры ткани (а это – взаимное расположение нитей утка и основы) приведёт к искажению и дифракционной картины, полученной при освещении образца такой ткани лучом монохромного когерентного света на удалённом экране (условие дифракции Фраунгофера). Под искажением в данном случае понимается отклонение угла взаимного расположения нити утка и основы от 90° (перекос уточной нити). В качестве исходных данных используется цифровая фотография образца ткани, сделанная под микроскопом. Подготовка изображения для получения дифракционной картины осуществляется тем же способом, что и для крученой нити, как это было описано в параграфе 3.2.1. Изображение преобразуется в чёрно-белое, приводится к размеру 256×256 либо 512×512 пикселей и имитируется наложение на него лазерного пятна. Далее рассчитывается дифракционная картина с помощью быстрого преобразования Фурье. Кроме того, можно использовать и цифровую фотографию дифракционной картины, полученной при освещении образца ткани лучом лазера.

Так как ткань представляет собой системы нитей основы и утка, расположенных друг к другу под углом, близким к 90° , то её дифракционная картина будет похожа на дифракционную картину от решетки (рисунок 3.12). Поэтому на ней должно присутствовать два четко выраженных набора дифракционных максимумов: от горизонтальных и вертикальных линий решетки, что в свою очередь соответствует основным и уточным нитям.

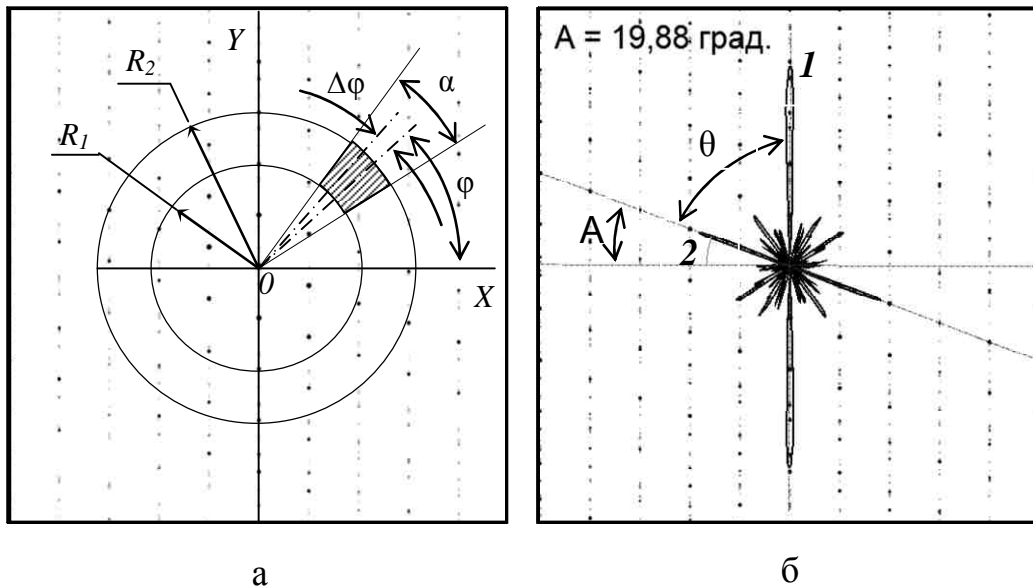


Рисунок 3.12 – Построение диаграммы для определения угла перекоса нитей в ткани

На построенной диаграмме распределения интенсивностей в полярных координатах всегда есть один четкий максимум, указывающий направление преимущественного расположения дифракционных максимумов. Кроме этого максимума на диаграмме присутствуют и другие максимумы. В ходе анализа дифракционных картин различных материалов, имеющих сетчатую структуру, было установлено, что угол между направлением на главный максимум 1 диаграммы и направлением на второй за ним по величине максимум 2 диаграммы соответствует углу между перекрещивающимися нитями в структуре образца. Для построения диаграмм и расчета угла между первым и вторым максимумами была написана оригинальная программа.

Таким образом, по имеющейся дифракционной картине можно построить диаграмму и определять направления на максимумы диаграммы 1 и 2 и угол θ

между этими направлениями. Так как целью является измерение угла перекоса, иными словами, величины отклонения угла θ от 90° , то угол перекоса A может быть рассчитан по формуле:

$$A = 90^\circ - \theta. \quad (3.23)$$

Следует отметить, что в данном случае ориентация изображения ткани абсолютно не важна, в отличие от измерения угла кручения. Угол между первым и вторым максимумами может быть измерен одинаково при любой ориентации дифракционной картины.

Алгоритм 3 определения величины перекоса между нитями утка и основы ткани по её цифровому изображению состоит из следующих шагов.

Шаг 3.1. Осуществляется расчет дифракционной картины по цифровой фотографии образца ткани по алгоритму 1.

Шаг 3.2. Для рассчитанной дифракционной картины строится диаграмма распределения интенсивности в полярных координатах (шаги 2.3-2.5 алгоритма 2).

Шаг 3.3. Осуществляется поиск максимума диаграммы (наиболее удалённой от начала отсчета точки 1 диаграммы на рисунке 3.11б).

Шаг 3.4. В диапазоне углов диаграммы $[\psi; \pi + \psi]$, где ψ – угловая координата максимума диаграммы 1 , осуществляется поиск второго по величине максимума 2 .

Шаг 3.5. Угол между направлениями из начала отсчета на максимумы 1 и 2 определяется как разность между угловыми координатами этих максимумов на диаграмме. Разница между 90° и этим углом равна величине перекоса нитей в переплетении.

3.3 Алгоритм использования способа двойного Фурье-преобразования для определения периодических расстояний

В параграфе 2.2.4 обсуждалось получение новых дифракционных картин от изображений дифракционных картин текстильных материалов с периодической

структурой. Было указано, что в этом случае на второй дифракционной картине согласно (2.20) расстояния между дифракционными максимумами будут прямо пропорциональны расстояниям между повторяющимися элементами структуры материала (нитями в ткацком переплетении, витками крученой нити, трикотажными петлями и прочее).

Вышеописанный метод расчета дифракционных картин по исходному изображению материала с помощью быстрого двумерного дискретного преобразования Фурье позволяет мгновенно рассчитать как дифракционную картину по исходному цифровому изображению материала, так и дифракционную картину от этой расчетной дифракционной картины.

Здесь необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. После первого преобразования Фурье получается поле комплексных амплитуд (1.17). Если применить к этому полю преобразование Фурье второй раз, то в результате получится лишь перевёрнутое исходное изображение [42].

Действительно, в случае одномерного непрерывного Фурье-преобразования функции $f(x)$:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-i\omega x) d\omega, \quad (3.24)$$

обратное преобразование:

$$F^{-1}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(i\omega x) d\omega. \quad (3.25)$$

Заменим в (3.24) x на $-x$:

$$F(-x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(-x) \exp(i\omega x) d\omega. \quad (3.26)$$

Выполним преобразование Фурье для (3.26) второй раз (обозначим его двойной буквой F):

$$\begin{aligned} FF(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(-x) \exp(i\omega x) d\omega \right) \exp(-i\omega x) d\omega = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(-x) \exp(i\omega x) \exp(-i\omega x) d\omega d\omega = f(-x) \end{aligned} \quad (3.27)$$

что и требовалось доказать.

То же справедливо и для дискретного преобразования Фурье. Рассмотрим простейший ряд из четырёх пикселей, расположенных в линию. Комплексные амплитуды светового сигнала в каждой точке-пикселе выражены действительными числами (без мнимой составляющей) и могут быть записаны в виде ряда $\{u_{-2}, u_{-1}, u_0, u_1\}$. Формула преобразования Фурье для такого ряда имеет вид:

$$U_k = \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} u_j \exp(-2\pi ijk / N), \quad (3.28)$$

где $N = 4$. Тогда после первого преобразования Фурье:

$$\begin{aligned} U_{-2} &= u_{-2} - u_{-1} + u_0 - u_1 \\ U_{-1} &= -u_{-2} - iu_{-1} + u_0 + iu_1 \\ U_0 &= u_{-2} + u_{-1} + u_0 + u_1 \\ U_1 &= -u_{-2} + iu_{-1} + u_0 - iu_1 \end{aligned}, \quad (3.29)$$

Как мы видим, в амплитудах U_{-1} и U_1 появились мнимые составляющие. Выполним второе преобразование Фурье, обозначив комплексные амплитуды после его выполнения символами 2U_k . Тогда для пикселя с $k = -1$ после второго преобразования Фурье получим

$${}^2U_{-1} = -U_{-2} - iU_{-1} + U_0 + iU_1 = 4u_1. \quad (3.30)$$

Таким образом, можно сказать, что 2U_k равно u_k с точностью до некоторого постоянного множителя, т.е. в результате двух преобразований Фурье ряд перевернулся зеркально.

Так как двумерное дискретное преобразование Фурье является фактически комбинацией одномерных преобразований, то те же рассуждения справедливы и для него. Рассмотрим двумерный массив пикселей 4×4 . Комплексную амплитуду в каждой ячейке массива обозначим u_{nm} . Величины n и m изменяются в диапазоне от -2 до 1 . В таблице 3.1 приведены выражения для каждого из элементов массива после первого преобразования Фурье.

Таблица 3.1 – Выражения преобразования Фурье для массива 4x4

$k \backslash l$	-2	-1	0	1
-2	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{i\pi n} e^{i\pi m}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{i\pi n} e^{\frac{i\pi m}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{i\pi n}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{i\pi n} e^{\frac{-i\pi m}{2}}$
-1	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{i\pi n}{2}} e^{i\pi m}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{i\pi n}{2}} e^{\frac{i\pi m}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{i\pi n}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{i\pi n}{2}} e^{\frac{-i\pi m}{2}}$
0	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{i\pi m}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{i\pi m}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{-i\pi m}{2}}$
1	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{-i\pi n}{2}} e^{i\pi m}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{-i\pi n}{2}} e^{\frac{i\pi m}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{-i\pi n}{2}}$	$\sum_{-2}^1 \sum_{-2}^1 u_{nm} e^{\frac{-i\pi n}{2}} e^{\frac{-i\pi m}{2}}$

В результате второго Фурье-преобразования для ячейки с координатами (l, l) можем записать:

$$\begin{aligned}
 {}^2U_{ll} &= \sum_{l=-2}^M \sum_{k=-2}^N U_{kl} e^{(-i\pi k/2)} e^{(-i\pi l/2)} = \\
 &= \sum_{l=-2}^M \sum_{k=-2}^N \sum_{m=-2}^M \sum_{n=-2}^N u_{nm} e^{(-i\pi n k/2)} e^{(-i\pi m l/2)} e^{(-i\pi k/2)} e^{(-i\pi l/2)} = Ru_{-l, -l},
 \end{aligned}$$

где $R = 4^6 = 4096$.

Результат второго преобразования Фурье приведён в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Выражения для второго преобразования Фурье для массива 4x4

$k \backslash l$	-2	-1	0	1
-2	Ru_{-2-2}	Ru_{-21}	Ru_{-20}	Ru_{-2-1}
-1	Ru_{1-2}	Ru_{11}	Ru_{10}	Ru_{1-1}
0	Ru_{0-2}	Ru_{01}	Ru_{00}	Ru_{0-1}
1	Ru_{-1-2}	Ru_{-11}	Ru_{-10}	Ru_{-1-1}

Если заменить в массиве переменные u на конкретные числа от 0 до 3 (таблица 3.3), то два последовательных преобразования Фурье дадут результат, приведённый в таблице 3.4 (значения в ячейках поделены на 4096).

Таблица 3.3 – Исходный массив

$k \setminus l$	-2	-1	0	1
-2	0	1	2	3
-1	1	1	2	3
0	2	2	2	3
1	3	3	3	3

Таблица 3.4 – Массив результатов

$k \setminus l$	-2	-1	0	1
-2	0	3	2	1
-1	3	3	3	3
0	2	3	2	2
1	1	3	2	1

Расчёты, проведенные на ЭВМ, с использованием программы двумерного дискретного быстрого преобразования Фурье при условии сохранения промежуточного результата расчета в виде двумерного массива комплексных чисел, подтвердили вышесказанные предположения. На рисунке 3.13 приведено исходное изображение (а) сетки с нанесённым в левый верхний угол чёрным кругом и изображение (б), полученное после применения двух последовательных быстрых преобразований Фурье к изображению (а).

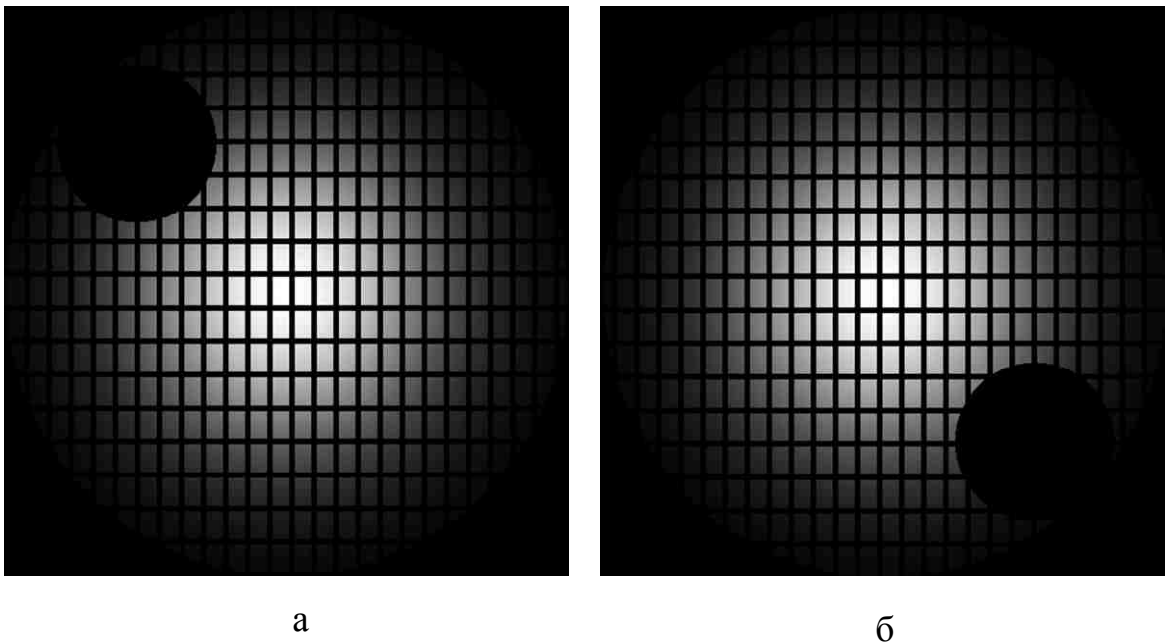


Рисунок 3.13 – Демонстрация инверсии изображения после двух последовательных преобразований Фурье: а) исходное изображение; б) после двух Фурье-преобразований

Чёрный круг переместился в правый нижний угол, то есть изображение (б) является центрально симметричным по отношению к изображению (а).

Иная ситуация возникнет, если после первого двумерного дискретного преобразования Фурье заменить комплексные амплитуды вещественными значениями соответствующих им интенсивностей в каждой точке-пикселе. Интенсивность световой волны I_j в точке с индексом j может быть рассчитана по формуле:

$$I_j = U_j U_j^*, \quad (3.31)$$

где U_j^* – комплексно сопряженная к амплитуде U_j . Используя (3.29) и (3.31) и обозначив комплексную амплитуду в точке k , полученную после второго Фурье-преобразования, применённого к интенсивностям, как \tilde{U}_{-1} , получим

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{-1} &= -I_{-2} - iI_{-1} + I_0 + iI_1 = -(u_{-2} - u_{-1} + u_0 - u_1)^2 \\ &- i(u_0 - u_{-2})^2 - i(u_1 - u_{-1})^2 + (u_{-2} + u_{-1} + u_0 + u_1)^2 + \\ &+ i(u_0 - u_{-2})^2 + i(u_{-1} - u_1)^2 = 4(u_{-2} + u_0)(u_{-1} + u_1) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Таким образом, вместо зеркального отражения мы получили некое осреднение, учитывающее величины исходных амплитуд в точках, соседних с исследуемой. Для массива данных (таблица 3.3) приведены для примера: таблица интенсивностей после первого Фурье-преобразования (таблица 3.5) и рассчитанная по ним таблица интенсивностей после второго Фурье-преобразования (таблица 3.6). В таблице 3.6 все рассчитанные значения для уменьшения порядка поделены на 2^{42} .

Таблица 3.5 – Результат первого преобразования Фурье

$k \setminus l$	-2	-1	0	1
-2	1024	512	4096	512
-1	512	5120	8704	0
0	4096	8704	295936	8704
1	512	0	8704	5120

Таблица 3.6 – Результат второго преобразования Фурье

$k \setminus l$	-2	-1	0	1
-2	4,52	4,52	5,06	4,52
-1	4,52	5,20	5,64	4,52
0	5,06	5,64	7,22	5,64
1	4,52	4,52	5,64	5,2

Таким образом, максимум значений после второго Фурье-преобразования располагается в центре картины в точке $(0,0)$, где и положено быть дифракционному максимуму. Прочие максимумы выстраиваются симметрично относительно центрального.

На рисунке 3.14 демонстрируется применение метода двойного Фурье-преобразования для определения расстояний между петлями по компьютерному изображению трикотажа.

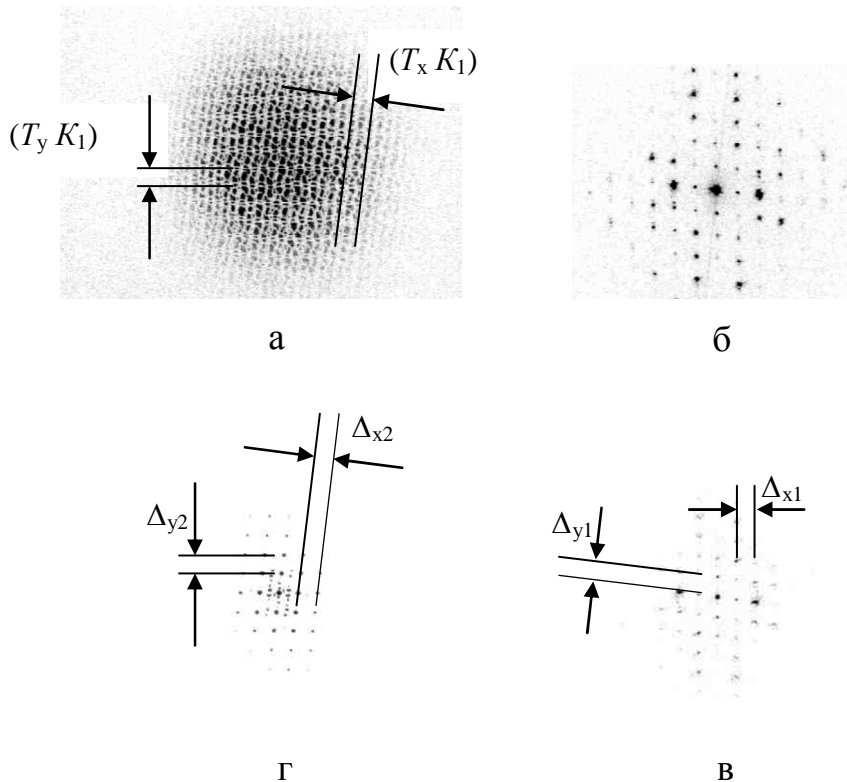


Рисунок 3.14 – Применение метода двойного Фурье-преобразования для определения расстояния между петлями в трикотаже

На рисунке 3.14а приведено исходное микроизображение. На рисунке 3.14б приведена фотография дифракционной картины, полученной при освещении этого же образца лучом *He-Ne* лазера «на просвет». На рисунке 3.14в приведена та же самая дифракционная картина, но полученная уже расчетным способом с использованием быстрого преобразования Фурье и с заменой после расчета комплексных амплитуд действительными значениями интенсивностей по формуле (1.19). На рисунке 3.14г приведена расчетная дифракционная картина от изображения на рисунке 3.14в.

Алгоритм 4 измерения расстояний между периодическими элементами структуры текстильного материала описывается следующими шагами.

Шаг 4.1. Подготовить цифровую фотографию структуры материала к применению для построения дифракционной картины быстрого преобразования Фурье: привести исходное изображение к квадрату со стороной, равной целой степени двойки; преобразовать цветное изображение в монохромное с сохранением яркости пикселей; смоделировать освещение структуры на изображении лучом лазера.

Шаг 4.2. Выполнить расчет интенсивностей светового сигнала для каждого пикселя моделируемой дифракционной картины с использованием алгоритма быстрого дискретного преобразования Фурье (шаги 1.5-1.8 алгоритма 1). В результате получено цифровое изображение дифракционной картины и двумерный массив интенсивностей.

Шаг 4.3. Повторить шаги 1.5-1.8 алгоритма 1 для полученного на шаге 4.2 цифрового изображения дифракционной картины. Результатом будет новое изображение дифракционной картины и двумерный массив интенсивностей точек в ней.

Шаг 4.4. Проанализировать расположение максимумов интенсивностей в полученной на шаге 4.3 модели дифракционной картины с помощью алгоритма поиска экстремумов функции, заданной таблично. Определить средние расстояния между соседними максимумами вдоль горизонтальной и вертикальной осей: Δ_{x2} и Δ_{y2} .

Шаг 4.5. Определённые на шаге 4.4 средние расстояния между дифракционными максимумами равны средним расстояниям между элементами периодической структуры материала на цифровой фотографии в пикселях. Далее полученные величины необходимо умножить на коэффициент разрешения цифрового фотоаппарата, использованного для съемки исследуемой структуры.

Выводы к главе 3

1. Дифракционная картина, получаемая на удалённом экране при освещении образца текстильного материала с периодической структурой лучом монохроматического когерентного света, может быть рассчитана с использованием интеграла Френеля-Кирхгофа по компьютерному микроизображению этого материала. Для вычисления самого интеграла предложен высокопроизводительный алгоритм, использующий быстрое дискретное двумерное преобразование Фурье.

2. Рассчитанная таким образом дифракционная картина может быть программно проанализирована с целью определения геометрических параметров структуры исследуемого материала. Для определения периодов структуры материала определяются расстояния между главными дифракционными максимумами. Для определения этих расстояний может быть использован алгоритм поиска экстремумов функции. Для определения таких геометрических характеристик структуры, как угол кручения текстильной нити и угол перекоса точной нити ткани по отношению к основным нитям, может быть использован специальный инструмент: диаграмма распределения интенсивностей дифракционных максимумов, построенная в полярных координатах. Впервые реализация различных вариантов программного анализа дифракционных картин предлагается в рамках одного программного продукта, который также берёт на себя и построение модели самой дифракционной картины.

3. Возможность мгновенного расчёта интеграла Френеля-Кирхгофа с помощью компьютерной программы быстрого двумерного дискретного Фурье-преобразования позволяет строить и анализировать дифракционные картины от дифракционных картин текстильных материалов, что позволяет реализовать на практике метод двойного Фурье-преобразования, который упрощает определение расстояний между элементами периодических структур по сравнению с обычным дифракционным методом. Это связано с тем, что расстояния между дифракционными максимумами на обычной дифракционной картине обратно

пропорциональны истинным расстояниям между периодическими элементами в структуре материала. При использовании же метода двойного Фурье-преобразования они в точности равны расстояниям на исходном цифровом изображении и отличаются от истинных расстояний в структуре материала только на коэффициент увеличения при съемке.

4. Дифракционные способы определения геометрических параметров материалов с периодической структурой могут быть реализованы с помощью компьютерной программы, обрабатывающей исходное цифровое изображение материала, сделанное с достаточным увеличением. Разработаны основные алгоритмы для реализации такой программы. Благодаря использованию высокопроизводительных алгоритмов программа может применяться для оперативного определения геометрических параметров материалов в процессе их производства. Если вводить в такую программу в качестве исходных данных не только цифровое изображение, но и допустимые диапазоны измеряемых параметров, то предлагаемая автором система может быть использована также для автоматического контроля качества производимого материала по геометрическим параметрам его структуры.

4 Разработка экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой

С целью практической проверки правильности предложенных алгоритмов был разработан экспериментальный образец системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой.

4.1 Архитектура экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой

На рисунке 4.1 приведена общая схема экспериментального образца бесконтактной системы определения геометрических параметров материалов с периодической структурой.

Система функционирует в соответствии с **алгоритмом 5**.

Шаг 5.1. Цифровая фотография исследуемого материала выполняется с помощью веб-камеры и передаётся в виде файла изображения в качестве исходных данных программе, установленной на персональном компьютере.

Шаг 5.2. Осуществляется предварительная обработка изображения (приведение к ширине и высоте, равным целым степеням двойки, и преобразование изображения в чёрно-белое) и наложение на него пятна, имитирующего освещение материала лучом лазера.

Шаг 5.3. Осуществляется расчёт дифракционной картины с помощью дискретного двумерного быстрого преобразования Фурье. Полученная дифракционная картина анализируется по соответствующему алгоритму в зависимости от вида анализа (определение направления крутки нити, определение угла крутки, определение перекоса в ткани либо определение расстояния между нитями в ткани по методу двойного преобразования Фурье).

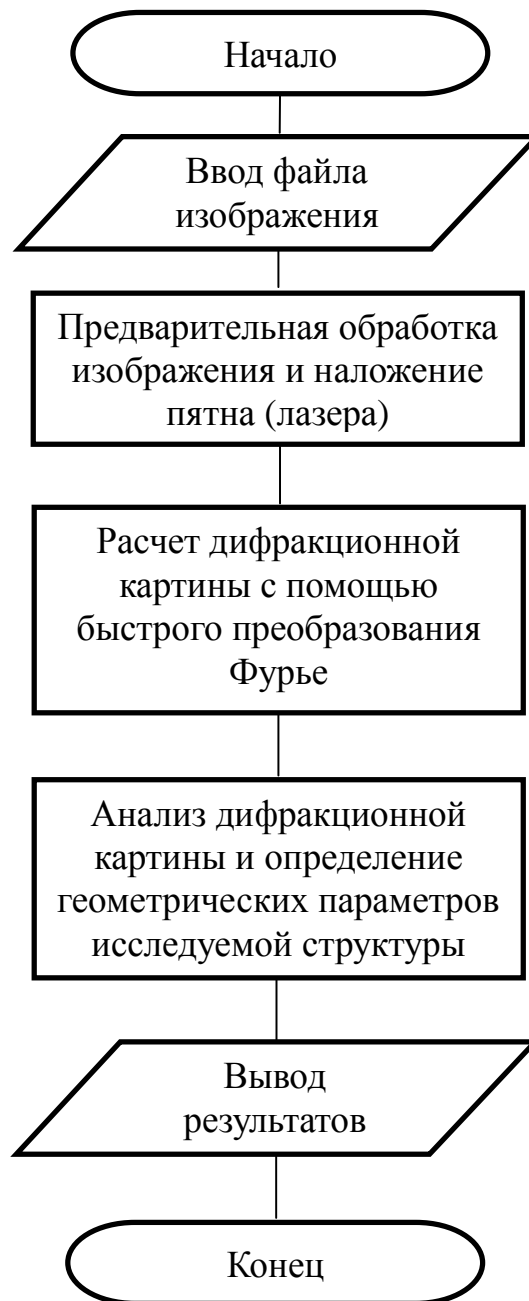


Рисунок 4.1 – Схема системы определения геометрических параметров материалов с периодической структурой

Алгоритм имитации наложения лазерного пятна использует выражения (3.18-3.19). С учетом установленных в настройках параметров пятна R_{min} , R_{max} и коэффициента убывания экспоненты σ для каждого элемента массива яркостей исходного изображения рассчитывается новое значение u_p .

Алгоритм моделирования дифракционной картины заключается в преобразовании массива комплексных амплитуд U , первоначально заполненного значениями яркостей пикселей исходного подготовленного изображения, по

алгоритму быстрого дискретного преобразования Фурье по строкам и по столбцам с последующим вычислением для каждого полученного элемента массива комплексных амплитуд значения интенсивности I как произведения значения амплитуды на комплексно ей сопряженную.

Для определения величины угла кручения нити либо перекоса нитей в ткани используется алгоритм построения диаграммы распределения интенсивности в полярных координатах. С учетом выбранных настроек определяются массив и границы секторов диаграммы. Каждая точка изображения может попадать в несколько секторов. В цикле определяется, будет ли интенсивность данной точки учитываться в диаграмме и, если будет, то в каких секторах. Интенсивность точки добавляется к суммарной интенсивности соответствующих секторов. После этого находится сектор с максимальным значением суммарной интенсивности. Так как для каждого сектора известно его угловое положение относительно оси координат OX , то можно построить диаграмму интенсивностей в полярных координатах и определить угол её наклона β к оси OX . В случае анализа дифракционной картины нити он будет равен углу кручения. В случае определения величины перекоса в ткани кроме сектора с максимальной суммарной интенсивностью должен быть также определен сектор со вторым по величине значением суммарной интенсивности. Угол между этими секторами будет равен углу между перекрещивающимися нитями.

Для определения расстояния между элементами периодической структуры материала в случае применения метода двойного Фурье преобразования повторно строится дифракционная картина по дифракционной картине, рассчитанной по исходному изображению. Важным обстоятельством здесь является то, что перед вторым Фурье преобразованием комплексные амплитуды заменяются вещественными значениями интенсивностей. Затем вторая дифракционная картина передается блоку программы, автоматически определяющему расстояния между соседними дифракционными максимумами.

4.2 Программное обеспечение экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой

Основным элементом разработанного экспериментального образца системы является программа обработки изображений, написанная на языке программирования *Microsoft Visual C++* с использованием платформы *.NET*. Данная программа может исполняться на персональных компьютерах и ноутбуках с операционной системой *Microsoft Windows XP* и выше. Программа использует многооконный интерфейс, что позволяет одновременно работать с несколькими изображениями.

Главное окно программы содержит меню, состоящее из следующих пунктов:

- Подменю «Файл», команды:
 - «Открыть» - открыть графический файл;
 - «Сохранить» - записать изображение в графический файл;
 - «Клонировать» - создать точную копию текущего изображения, включая двумерный массив вычисленных интенсивностей каждого пикселя;
 - «Заккрыть» - завершить работу программы.
- Подменю «Фурье» содержит команды:
 - «Наложение пятна» - вызов диалогового окна для предварительной обработки изображения перед расчетом дифракционной картины, включая имитацию лазерного пятна;
 - «Быстрое Фурье» - запускает процесс расчета дифракционной картины с помощью быстрого преобразования Фурье, в завершение откроется форма с изображением рассчитанной дифракционной картины.
- Подменю «Анализ»:
 - «Диаграммы срезов» - открывает форму анализа распределения интенсивностей дифракционных максимумов вдоль заданных

горизонтального и вертикального срезов изображения с расчетом расстояний между соседними пиками интенсивности;

- «Диаграмма интенсивности» - строит диаграмму распределения интенсивности в полярных координатах поверх изображения дифракционной картины;
- «Направление крутки» - по дифракционной картине нити определяет направление крутки и выводит в середине изображения либо стилизованную букву *S*, либо букву *Z*;
- «Угол крутки» - строит диаграмму интенсивности в полярных координатах и по направлению на главный максимум этой диаграммы автоматически определяет угол кручения;
- «Перекося по утку и основе» - строит диаграмму интенсивности в полярных координатах и по углу между направлениями на максимумы диаграммы определяет величину перекося уточных нитей;
- «Выключить» - убирает с изображения дифракционной картины диаграмму интенсивности и прочую вспомогательную информацию.
- Подменю «Изображение», содержащее команды манипулирования изображением дифракционной картины с целью более четкого её отображения для пользователя:
- «Гамма» - строит новое изображение, извлекая корень из величины яркости каждого пикселя исходного изображения (таким образом, неяркие пиксели видны более отчетливо);
- «Обратное гамма» - строит новое изображение, возводя значение яркости каждого пикселя в квадрат;
- «Удаление центрального максимума» - обращает в ноль значения интенсивностей самых ярких пикселей, «вытягивая» таким образом, менее яркие пиксели на дифракционной картине;
- «Срезание центрального максимума» - интенсивность следующих по величине яркости за пикселями центрального максимума увеличивается до максимального значения, при этом интенсивность прочих пикселей

(за исключением пикселей центрального максимума) увеличивается пропорционально;

- «Осреднение» - для всех пикселей, яркость которых больше 30% от яркости центрального максимума, яркость уменьшается на эту величину;
- «Линейное увеличение интенсивности» - яркость всех пикселей увеличивается в n раз, где n задаётся пользователем;
- «Черное и белое» - все пиксели, яркости которых меньше максимальной, становятся черными;
- «Повернуть» - поворачивает изображение на заданный пользователем угол;
- «Негатив» - строит негатив исходного изображения.

➤ Подменю «Калькулятор»:

- «Сложить картинки» - интенсивность каждого пикселя суммарного изображения образуется сложением интенсивности соответствующих пикселей двух выбранных пользователем изображений;
- «Сложить логически» - интенсивность каждого пикселя суммарного изображения есть максимальное значение из интенсивностей соответствующих пикселей двух выбранных пользователем изображений;
- «Вычесть картинки» - интенсивность каждого пикселя суммарного изображения образуется вычитанием из интенсивности пикселя первого изображения интенсивности соответствующего пикселя второго изображения.

➤ Подменю «Сервис»:

- «Настройки диаграммы» - открывает окно для ввода параметров построения диаграммы распределения интенсивностей в полярных координатах: радиусы R_1 и R_2 , число секторов N и угол смещения сектора $\Delta\varphi$ (см. параграф 3.2.3);

- «Настройки визира» - открывает окно для задания значений по умолчанию размеров лазерного пятна и параметров кривой изменения интенсивности пикселей внутри пятна.

Подменю «Помощь» содержит единственный пункт «О программе».

Программа построена в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования и представляет собой совокупность классов. Объекты этих классов в процессе работы программы взаимодействуют друг с другом.

Ниже будут кратко описаны основные классы приложения.

FmMain – класс главного окна программы, внутри которого открываются окна с обрабатываемыми изображениями. Также содержит главное меню программы и обработчики команд главного меню.

FmImage – класс окна изображения. Это может быть как исходное изображение материала, так и рассчитанная дифракционная картина. Переменная *bmp* класса содержит указатель на сам объект изображения. Переменная *intensField* содержит указатель на объект класса *IntensityField*, представляющего собой массив расчетных интенсивностей всех точек изображения. Класс также содержит методы для манипулирования изображением и отображения уже рассчитанной диаграммы распределения интенсивности.

FmVizir – класс окна диалога наложения лазерного пятна на исходное изображение. Для наложения пятна использует объект класса *Vizir*, который рассчитывает пятно и формирует новое изображение на основании исходного, но уже с наложенным пятном.

Классы *Fourier* и *FFTv* используются для реализации алгоритма быстрого двумерного дискретного преобразования Фурье по формулам (3.10). Интенсивности в каждой точке дифракционной картины рассчитываются на основании вычисленных комплексных амплитуд по формуле (1.19) и сохраняются в объекте класса *IntensityField*. Для отображения дифракционной картины на экране компьютера эти интенсивности нормируются в пределах от 0 до 255.

FmSlicerXY – класс окна отображения распределения интенсивностей вдоль заданных горизонтальной и вертикальной осей, проходящих через изображение дифракционной картины. Окно представляет собой форму с двумя закладками, на первой из которых размещены графики изменения интенсивности пикселей вдоль горизонтальной и вертикальной осей, расположение которых задаётся тут же на уменьшенном изображении дифракционной картины. На второй закладке располагаются две таблицы, содержащие положения и величины пиков графиков интенсивности, а также расстояние между пиками. Здесь же по средним расстояниям между пиками графиков автоматически рассчитываются расстояния между элементами периодической структуры исследуемого материала.

IntensityDistribution – класс, предназначенный для расчета диаграммы распределения интенсивностей в полярных координатах на основании данных объекта класса *IntensityField*. Помимо координат точек замкнутой кривой, изображающей диаграмму, определяется угол наклона диаграммы (радиус-вектора в точку максимума диаграммы из точки полюса O) к горизонтальной оси координат изображения OX . Это позволяет определить угол кручения нити.

Класс *WarpWeftDiagramme* строит диаграмму распределения интенсивностей в полярных координатах для дифракционной картины ткани. При расчете диаграммы автоматически определяются направления на главный и второй по величине максимум диаграммы, что позволяет определить величину перекоса между нитями основы и утка.

Способ двойного Фурье-преобразования реализуется следующим образом. После вычисления дифракционной картины от исходного изображения материала открывается форма изображения рассчитанной дифракционной картины с присоединенным полем рассчитанных значений интенсивностей точек изображения. Если теперь для этой дифракционной картины выполнить быстрое преобразование Фурье второй раз, то в результате мы получим искомую вторичную дифракционную картину (но не перевёрнутую исходную, ибо в расчёте участвовали не комплексные амплитуды, а вещественные величины

интенсивностей!). Для анализа периодов структуры по вторичной дифракционной картине можно использовать форму *FmSlicerXY*.

Для проверки правильности работы программного обеспечения экспериментального образца системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой были разработаны дополнительные компьютерные программы, моделирующие изображения исследуемых материалов: крученой нити и ткани.

4.2.1 Программа моделирования изображения крученой нити

Математическое моделирование проекции произвольной крученой нити на плоскость представляет собой достаточно сложную задачу [72]. Основные причины, затрудняющие моделирование плоского изображения крученой нити, близкой к реальной, - это разный диаметр одиночных нитей, скрученных в исследуемую нить, и наличие ворсинок, выступающих за границы профиля нити. В остальном же крученую нить можно рассматривать как тело, образуемое вращением нескольких касающихся друг друга эллипсов, представляющих собой сечения входящих в нить стренг, вокруг точки, лежащей на оси нити, с их одновременным поступательным движением вдоль оси нити (рисунок 4.2).

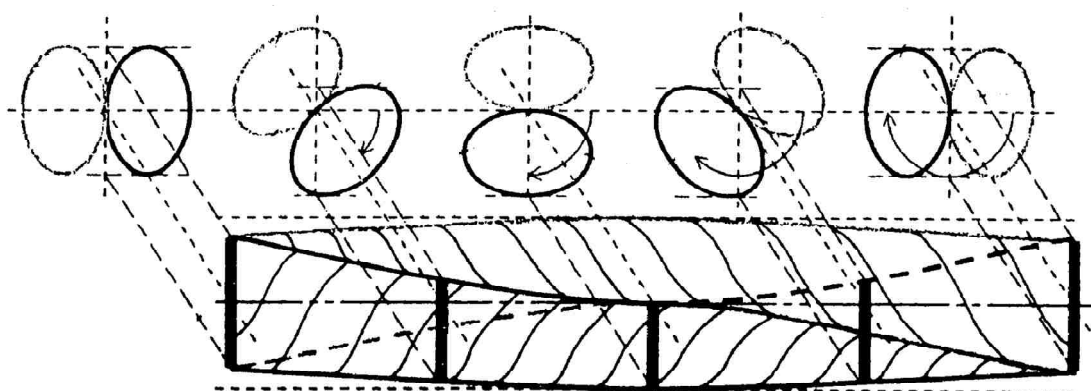
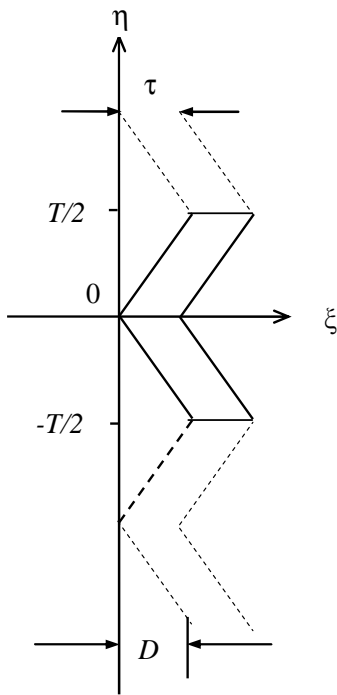


Рисунок 4.2 – Схема получения модели изображения нити, скрученной из двух стренг

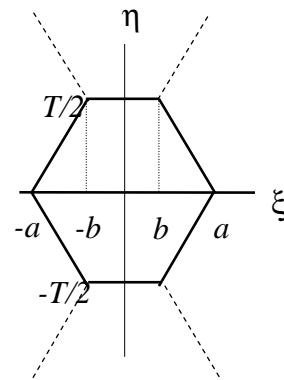
Однако для построения дифракционных картин достаточно более простых моделей нити, дающих верное очертание в первую очередь профиля, образуемого

витками. В [1] хорошие результаты были достигнуты даже при аппроксимации границ периодических звеньев прямыми отрезками (рисунок 4.3). Это позволило вывести аналитические формулы решений интеграла Френеля-Кирхгофа, расчёт по которым совпал с экспериментально наблюдаемыми дифракционными картинками.

В [1] было отмечено, что существует принципиальное отличие в форме профиля нитей скрученных из нечётного и чётного числа стренг. Если для нечётных каждому выступу профиля справа соответствует впадина слева (рисунок 4.3а), то в профилях нитей с чётным числом стренг выступы и впадины находятся друг напротив друга (рисунок 4.3б).



а) Аппроксимация
профиля нити,
скрученной из нечётного
числа стренг



б) Аппроксимация
профиля нити,
скрученной из чётного
числа стренг

Рисунок 4.3 – Аппроксимация профилей нити для вывода аналитических формул дифракционных картин

Для задачи проверки правильности нахождения величины угла кручения нити достаточно максимально точно повторить её профиль. Профиль каждого витка представляет собой синусоиду [73]. Была разработана программа,

рисующая модель нити набором налагающихся друг на друга с некоторым постоянным смещением синусоидальных кривых (рисунок 4.4).

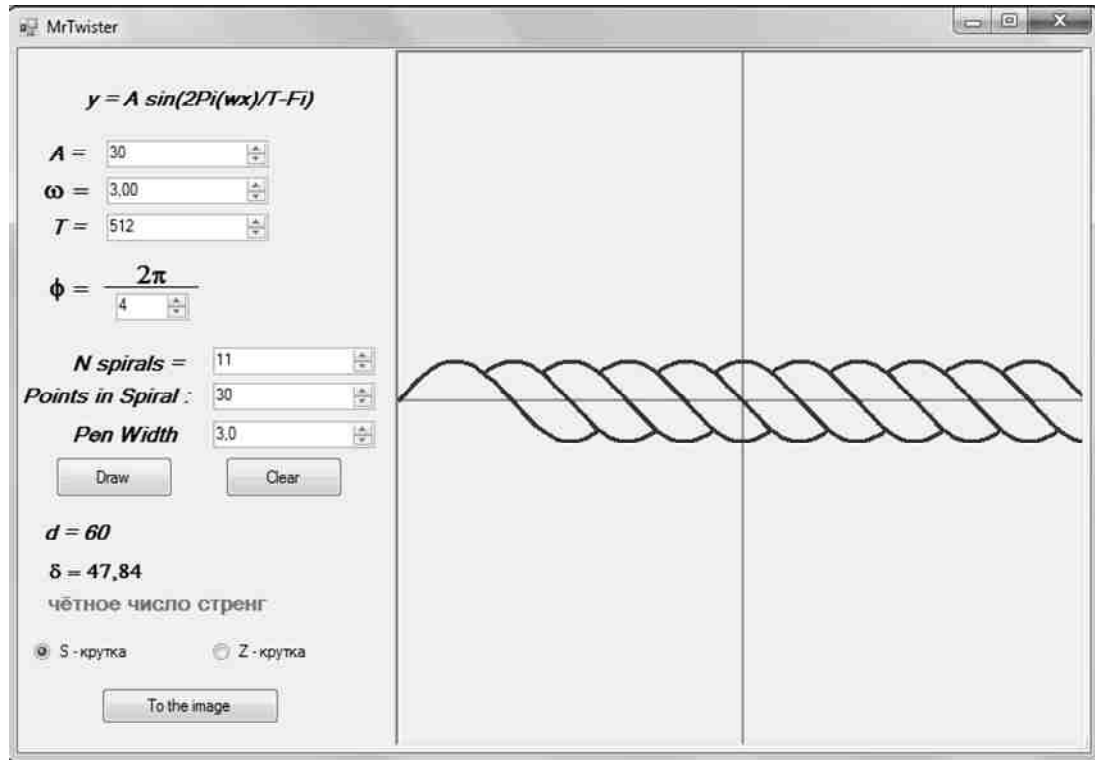


Рисунок 4.4 – Окно программы построения модели нити с полями для ввода параметров

Профиль каждого витка задаётся функцией:

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi\omega x}{T} - \varphi_i\right), \quad (4.1)$$

где A – амплитуда синусоиды, равная диаметру нити по гребню витков; ω – циклическая частота синусоиды; T – период; φ_i – смещение i -того витка:

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi, \quad (4.2)$$

где $\Delta\varphi$ задаётся пользователем как $2\pi/N$.

Если N – нечётное, то моделируется нить с нечётным числом стренг, и наоборот. A , ω и T также задаются пользователем.

На рисунке 4.5 приведены образцы построенных программой моделей с чётным и нечётным числом стренг и с направлениями крутки S и Z .

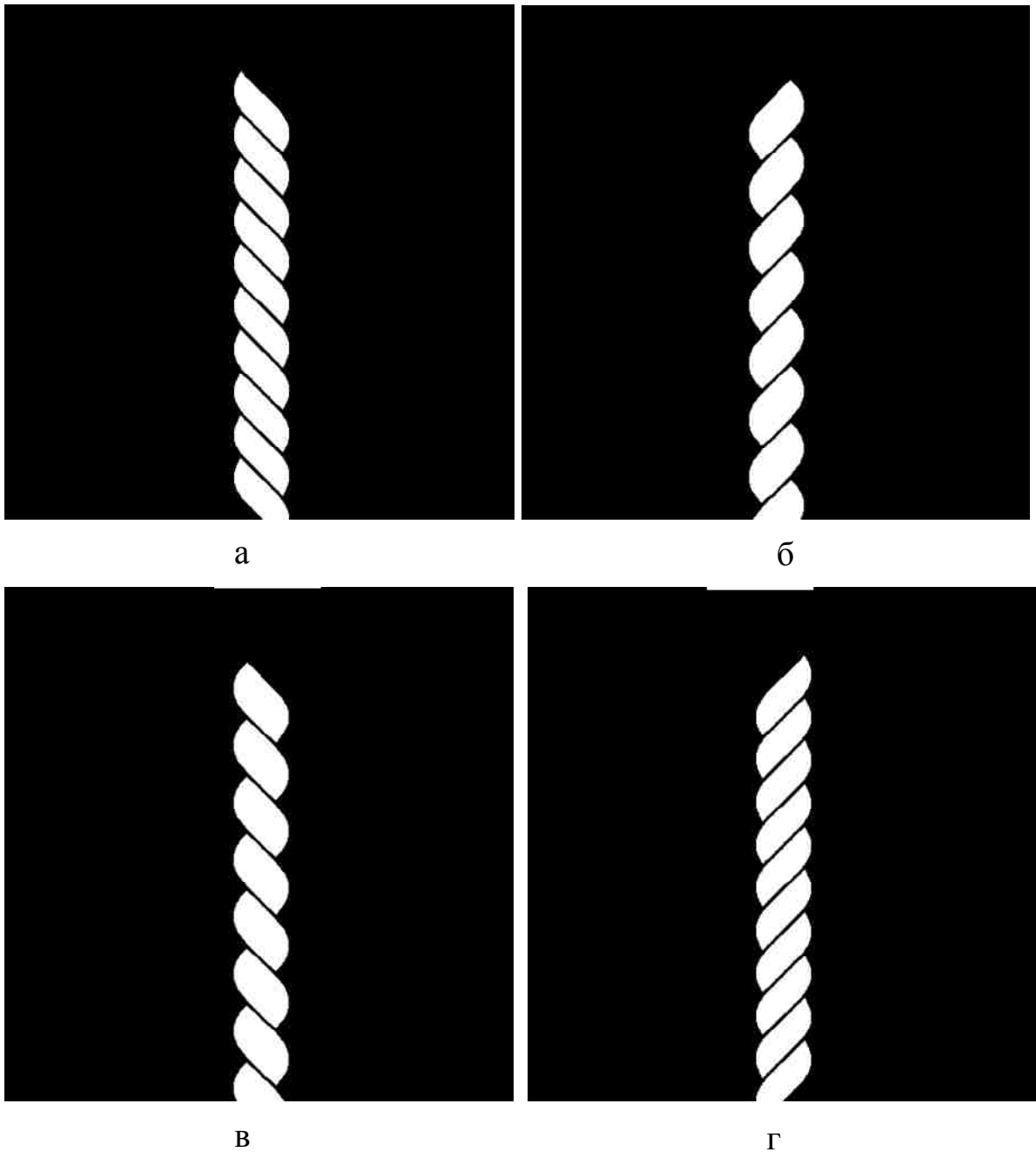


Рисунок 4.5 – Модели нитей, построенные программой: а) *S*-крутка, чётное число стренг; б) *Z*, нечётное; в) *S*, нечётное; г) *Z*, чётное

Витки нити рисуются белым цветом на чёрном фоне с тонкими чёрными промежутками между ними, что соответствует освещению нити «на отражение».

4.2.2 Программа моделирования изображения ткани

Как отмечалось в главе 2, в простейшем случае изображение ткани представляет собой решетку.

Горизонтальные линии в этой решетке можно считать нитями основы, а вертикальные – нитями утка. Компьютерное изображение такой решетки может считаться моделью изображения ткани, достаточной для построения расчетных дифракционных картин.

В процессе отладки и проверки работоспособности разрабатываемого комплекса требовалась программа, автоматически строящая изображения таких решеток. Кроме того, так как комплекс решал, в том числе задачу автоматического определения величины перекоса уточных нитей, программа построения моделей должна была уметь строить изображения с заданной величиной наклона вертикальных (уточных) линий.

Диалоговое окно программы приведено на рисунке 4.6.

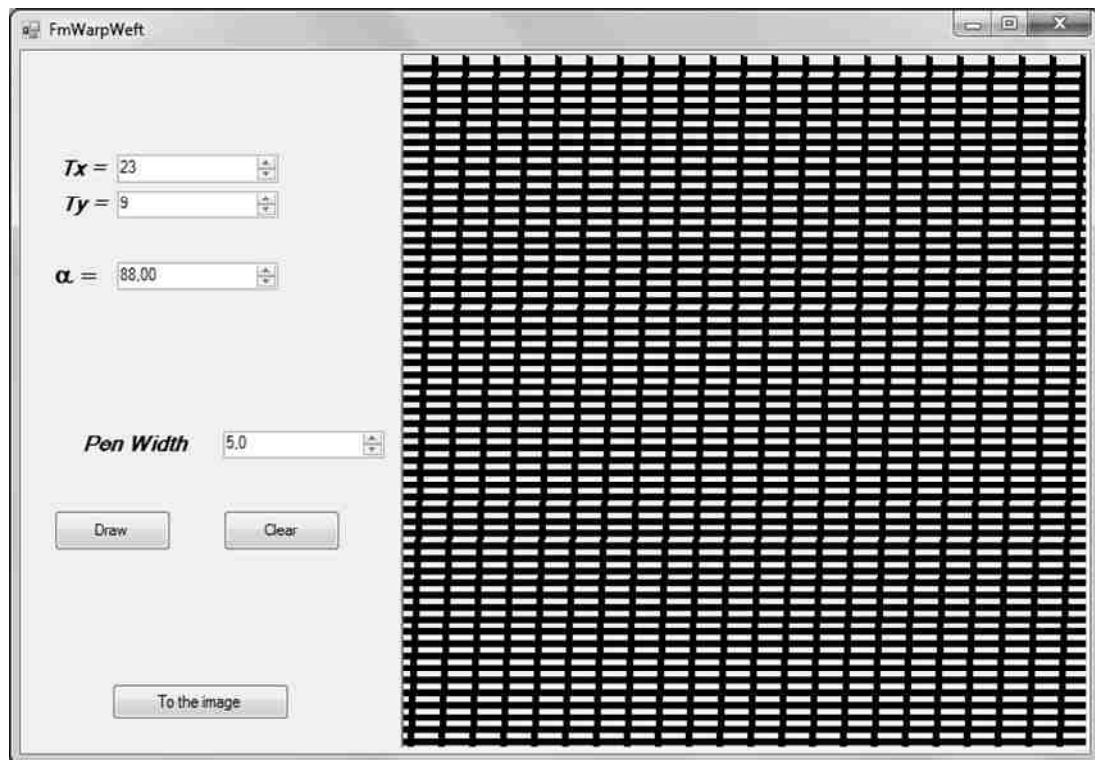


Рисунок 4.6 – Окно программы построения модели ткани с полями для ввода параметров

Пользователь задаёт шаг между нитями по горизонтали T_x и вертикали T_y (в пикселях), угол наклона уточных нитей α (при построении модели для определения перекоса) и толщину нитей $Pen\ Width$.

При нажатии на кнопку “Draw” программа демонстрирует на панели справа, как будет выглядеть модель ткани. Нажатие на кнопку “Clear” стирает это

изображение. Если пользователя устраивает модель, он нажимает кнопку “To the image”, и программа создаёт компьютерное изображение модели ткани, которое может быть сохранено в графический файл.

Для расчета и анализа дифракционных картин могут быть использованы модели двух типов, показанные на рисунке 4.7:

- в которых нити изображены белыми линиями, а промежутки между ними чёрные (рисунок 4.7а), что соответствует фотографиям реальных тканей, сделанных в отраженном свете;

- в которых нити изображены черными линиями с белыми порами (рисунок 4.7б), что соответствует фотографиям тканей, сделанных «на просвет».

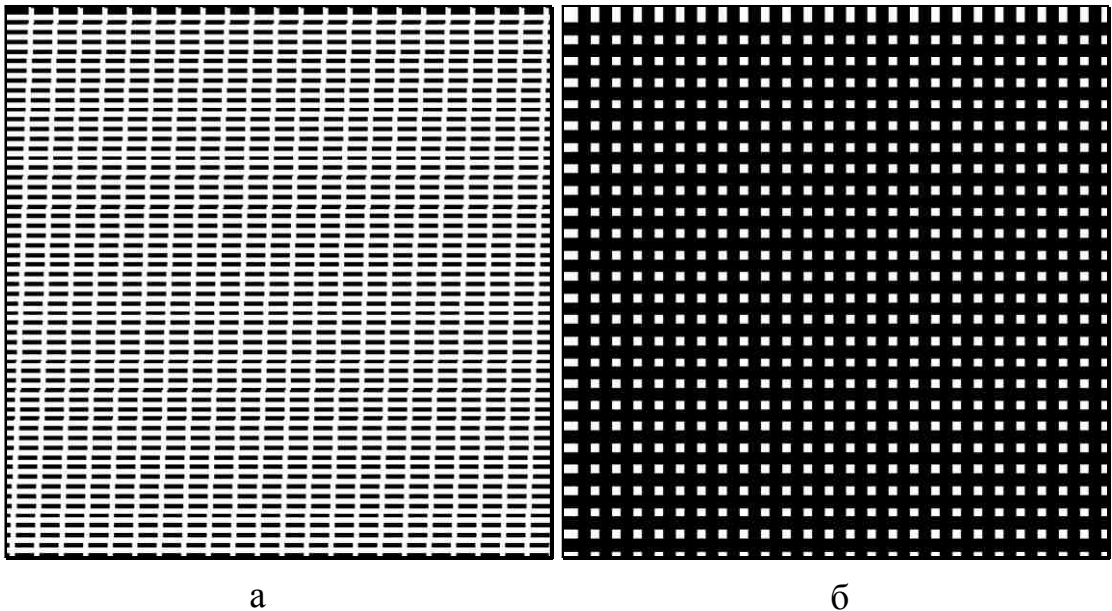


Рисунок 4.7 – Модели тканей, построенные программой: а) шаг 23 по горизонтали, 9 по вертикали, 2° перекося, толщина нити 5, «на отражение»; б) шаг 20 по горизонтали и вертикали, без перекося, толщина нити 12, «на просвет»

Главным достоинством программ, описанных в параграфах 4.2.1 и 4.2.2, является то, что они позволяют быстро создавать изображения моделей текстильных материалов с заданными пользователем геометрическими параметрами структуры, что позволяет не только протестировать систему бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой, но и определить погрешность данного дифракционного метода.

Для удобства дальнейшего использования обе программы были интегрированы в экспериментальный образец системы.

Помимо изображений моделей крученых нитей, построенных с помощью программы, описанной в параграфе 4.2.1, с использованием компьютерного микроскопа *Leica* были сделаны снимки физических моделей крученых нитей, изготовленных из медной проволоки диаметром $d = 0,15$ мм (рисунок 4.8).

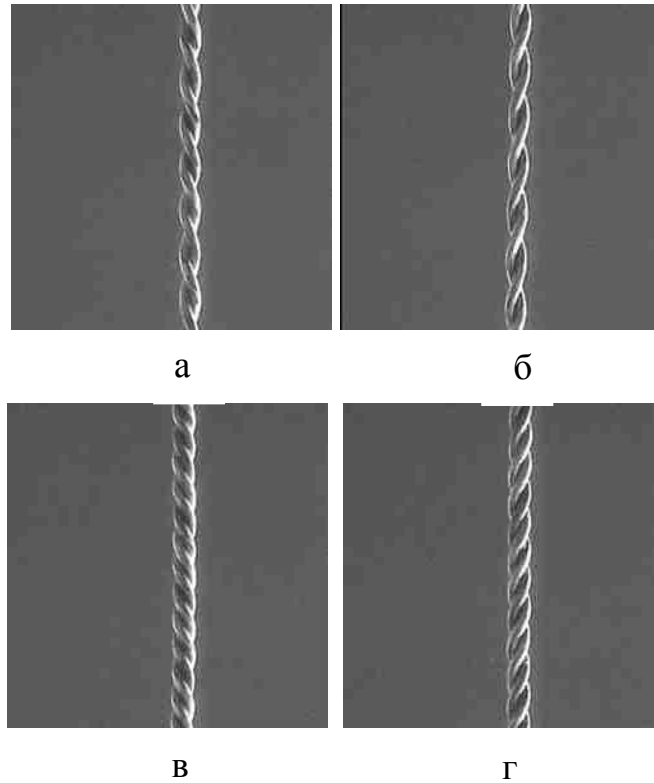


Рисунок 4.8 – Модели нитей, скрученные из проволоки: а) *S*-крутка, чётное число стренг; б) *Z*, чётное; в) *S*, нечётное; г) *Z*, нечётное

Достоинством таких моделей является то, что в силу значительной толщины стренг, из которых скручены модели, на снимках даже при не очень большом увеличении четко видны отдельные витки. Ввиду того, что модели изготовлены из гладкой проволоки, отсутствуют неровности и присущая текстильным нитям ворсистость, которая искажает дифракционную картину.

Для указанных моделей дифракционные картины были получены на удалённом экране освещением этих моделей лучом лазера [1,39,48-50]. Также по компьютерным изображениям этих моделей были рассчитаны дифракционные картины с использованием быстрого преобразования Фурье, и было

экспериментально установлено, что полученные в обоих случаях дифракционные картины идентичны.

Чтобы определить величину крутки таких моделей, необязательно раскручивать их на установке, аналогичной круткомеру для текстильных нитей. Крутка может быть рассчитана чисто геометрически по количеству витков на единицу длины с учетом количества стренг, использованных при скручивании:

$$K = \frac{l}{L} = \frac{l}{nh}, \quad (4.3)$$

где K – величина крутки нити, L – шаг витка стренги, n – число стренг, h – шаг между соседними витками (рисунок 4.9).

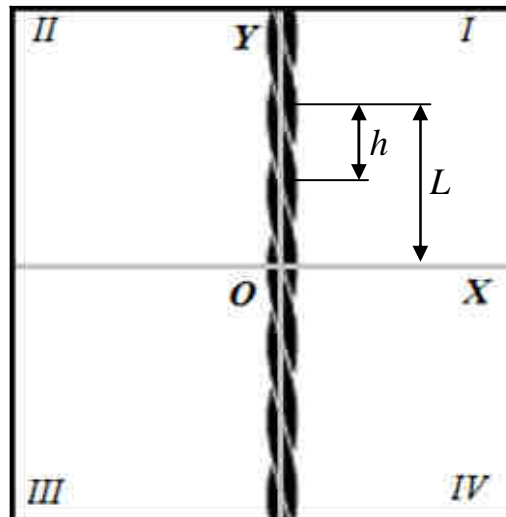


Рисунок 4.9 – Геометрические параметры для определения величины крутки модели нити, скрученной из двух стренг

Также по изображениям таких моделей легко непосредственно определить величину угла кручения, измерив её обычным транспортиром либо с помощью инструментов обработки изображения какого-нибудь графического редактора, например, *GIMP* [74].

4.3 Практическое использование экспериментального образца системы для определения геометрических параметров структуры материалов

Разработанный в соответствии с изложенной в данной диссертационной работе методикой экспериментальный образец программно-аппаратной системы позволяет измерять следующие категории геометрических параметров структуры текстильных материалов:

- расстояния между периодическими элементами микроструктуры текстильных материалов: расстояния между основными и уточными нитями в ткани и расстояния между петлями в трикотаже;
- направление и угол кручения нити, что позволяет косвенно вычислить её крутку.

Кроме того, эта же система позволяет выявлять такой дефект ткани, как перекося уточных нитей по отношению к основным нитям, и измерять величину этого перекося.

4.3.1 Практическое определение расстояний между периодическими элементами в структуре текстильного материала

В качестве исходных данных для получения дифракционной картины использовались черно-белые (в оттенках серого) изображения структуры текстильных материалов: ткани и трикотажа.

Согласно (2.7) расстояния между основными максимумами в дифракционной картине обратно пропорциональны расстояниям между элементами периодической структуры материала с некоторым коэффициентом K , зависящим от условий наблюдения дифракционной картины и параметров установки. Обычно этот коэффициент может быть определен при настройке системы при исследовании материала с известными периодами структуры. Для

определения величины этого коэффициента можно воспользоваться моделями ткани, описанными в параграфе 4.2.2.

Для настройки и одновременной проверки работоспособности системы используются два модельных изображения ткани (рисунок 4.10):

а) с одинаковым шагом по вертикали и горизонтали в 20 пикселей, без перекоса и с толщиной «нити» 3 пикселя;

б) с шагом по горизонтали 4 и по вертикали 7 пикселей и толщиной «нити» 2 пикселя, также без перекоса.

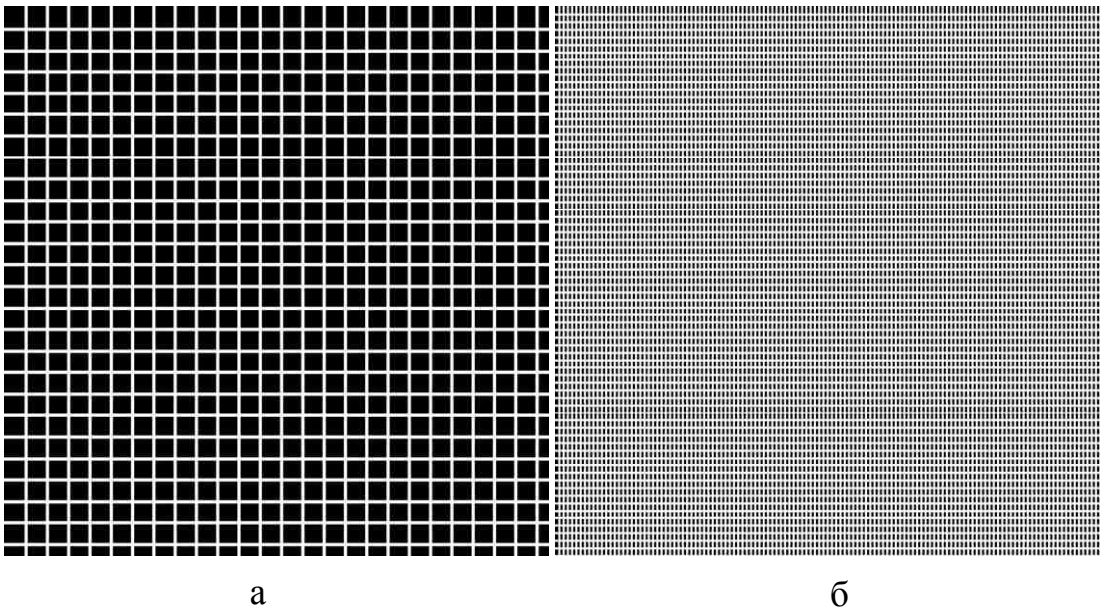


Рисунок 4.10 – Модели тканей для проверки системы: а) $T_x = T_y = 20$, толщина нити 3, без перекоса; б) $T_x = 4$, $T_y = 7$, толщина нити 2, без перекоса

Модели имитируют освещение материала «на отражение» (нити светлые, поры тёмные). Размеры обоих изображений 512x512 пикселей.

Для исходного изображения вызывается команда меню «Фурье»-«Наложение пятна». Перед открытием диалогового окна для ввода параметров пятна, имитирующего освещение материала лучом лазера, исходное изображение будет автоматически при необходимости обрезано до размеров 2^t , где t – целое положительное число (условие алгоритма быстрого преобразования Фурье) и преобразовано в чёрно-белое.

В диалоговом окне наложения пятна (рисунок 4.11) надо задать расположение центра пятна на изображении материала, внутренний и внешний

радиусы пятна (в пределах внутреннего радиуса интенсивность света постоянна, а затем убывает к границе внешнего радиуса по экспоненциальному закону (3.18-3.19)) и коэффициент, определяющий убывание интенсивности.

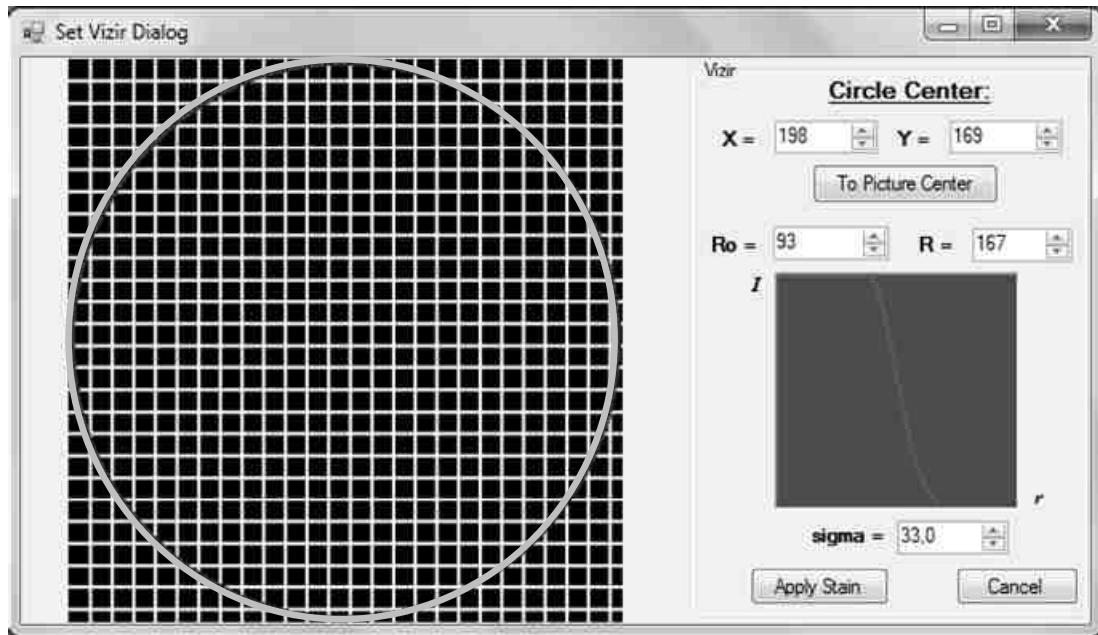


Рисунок 4.11 – Окно диалога наложения пятна

После наложения пятна открывается изображение, для которого можно вычислить дифракционную картину, используя пункт меню «Быстрое Фурье». На рисунке 4.12 приведены изображение с наложенным пятном и рассчитанная дифракционная картина.

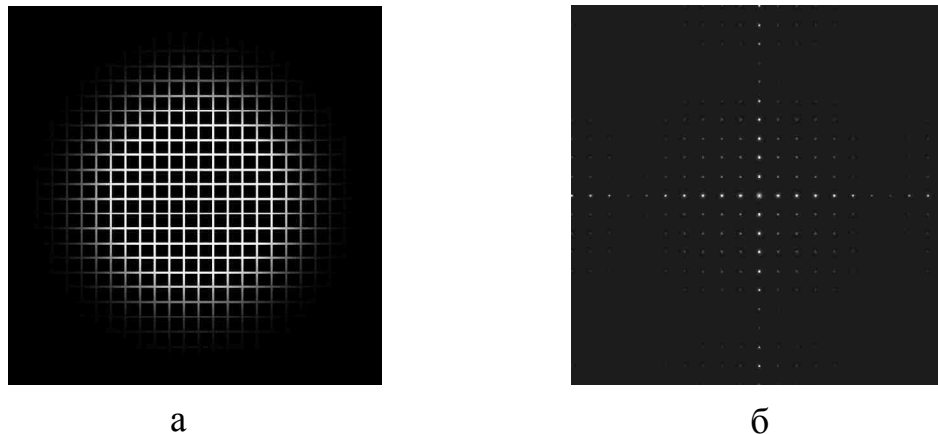


Рисунок 4.12 – Компьютерные изображения: а) исходное с наложенным пятном; б) расчетная дифракционная картина

Для определения расстояния между дифракционными максимумами используется окно программы, открываемое через пункт меню «Анализ»-«Диаграммы срезов» (рисунок 4.13).

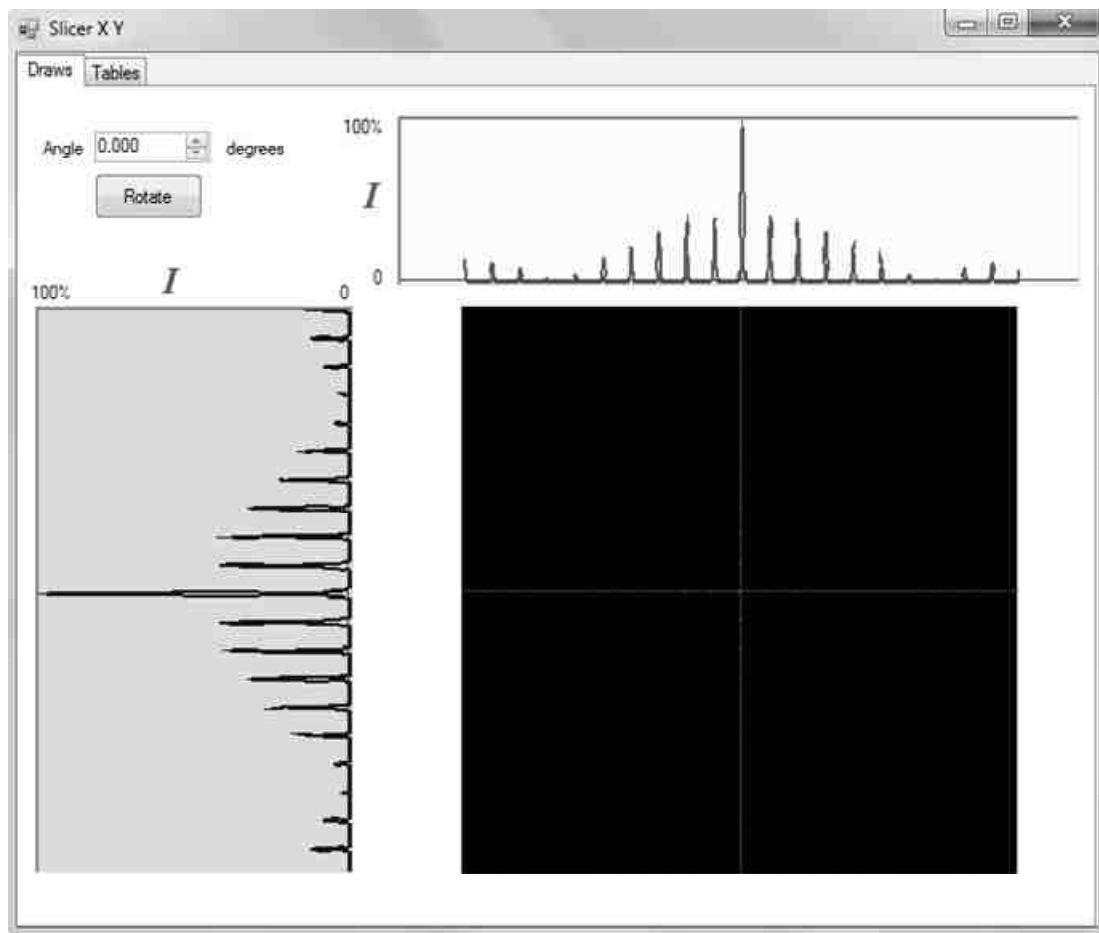


Рисунок 4.13 – Окно программы для определения расстояния между максимумами интенсивности

На макете изображения в правой нижней части окна задаются горизонтальная и вертикальная оси (по умолчанию они проходят через центр изображения, но могут быть смещены пользователем). Сверху и слева от макета изображения автоматически строятся графики распределения интенсивности дифракционных максимумов на изображении вдоль этих осей.

Графики представляют собой систему пиков интенсивности, отстоящими друг от друга на равных расстояниях. Это позволяет автоматически определить эти расстояния и свести их в таблицу. После этого программа автоматически может рассчитать среднее расстояние между соседними пиками и затем по формуле (2.7) определить расстояния между периодическими элементами структуры: в данном случае, между соседними основными и соседними уточными нитями. Таблицы расстояний между пиками и расчет периодов структуры приводится на второй закладке окна программы (рисунок 4.14).

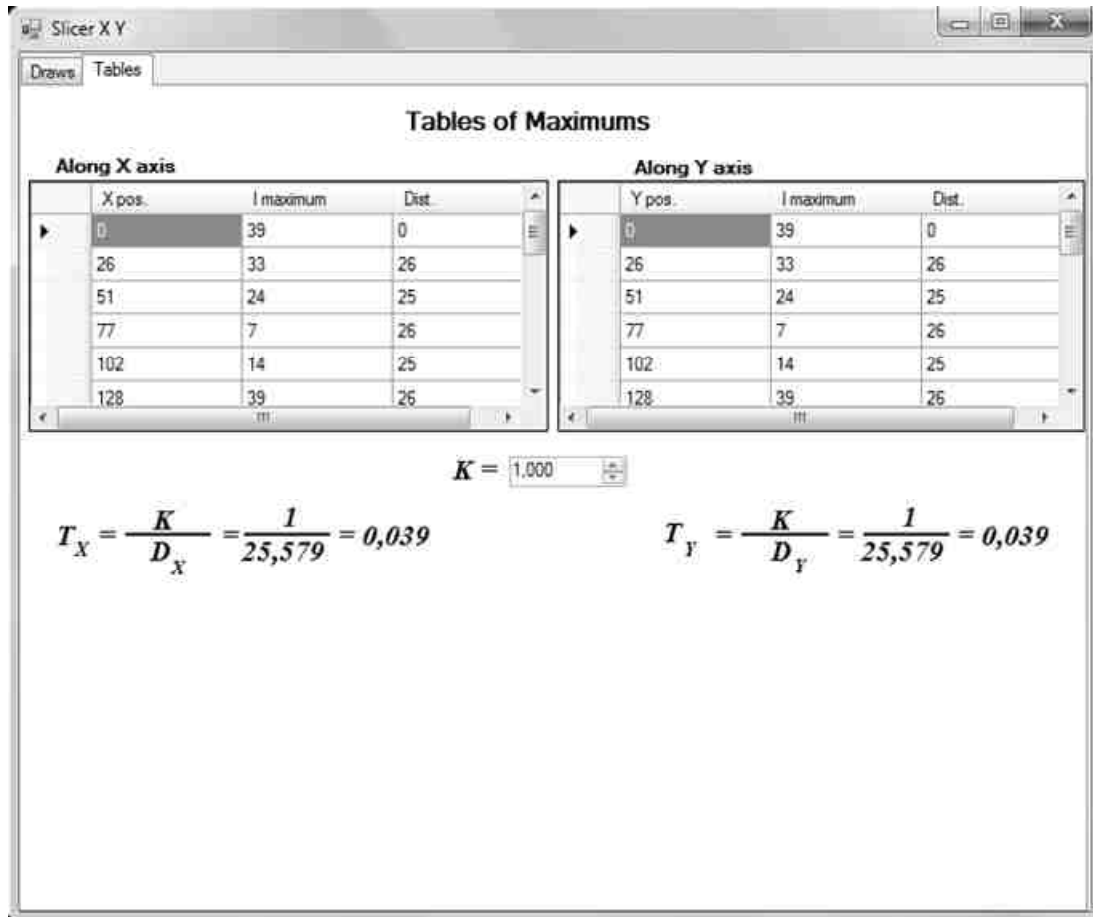


Рисунок 4.14 – Окно программы с таблицами расстояний между максимумами интенсивности

На данном этапе невозможно выполнить окончательный расчет по формуле (2.7), так как неизвестен коэффициент K . Собственно, расчет для модельного изображения ткани с известными расстояниями между основными и уточными нитями как раз и делался для определения величины этого коэффициента.

Расстояния между максимумами на дифракционной картине модели ткани с горизонтальным и вертикальным периодами между линиями, изображающими нити, сведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 –
Расстояние между
максимумами вдоль
OX

<i>Xpos</i>	<i>Imax</i>	<i>Dist</i>
0	39	0
26	33	26
51	24	25
77	7	26
102	14	25
128	39	26
154	58	26
179	83	25
205	100	26
230	105	25
256	255	26
282	105	26
307	100	25
333	83	26
358	58	25
384	39	26
410	14	26
435	7	25
461	24	26
486	33	25

Таблица 4.2 –
Расстояние между
максимумами вдоль
OY

<i>Ypos</i>	<i>Imax</i>	<i>Dist</i>
0	39	0
26	33	26
51	24	25
77	7	26
102	14	25
128	39	26
154	58	26
179	83	25
205	100	26
230	105	25
256	255	26
282	105	26
307	100	25
333	83	26
358	58	25
384	39	26
410	14	26
435	7	25
461	24	26
486	33	25

Среднее расстояние между дифракционными максимумами как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, равно с точностью до третьего знака после запятой 25,579. Зная расстояние между нитями в модели (20 пикселей), можно рассчитать величину коэффициента K :

$$K = DT = 25,579 \cdot 20 = 511,580, \quad (4.4)$$

где D – среднее расстояние между дифракционными максимумами, T – расстояние между «нитями» в модели.

Для проверки правильности найденного коэффициента K проведем аналогичное определение расстояний между «нитями» для второй модели ткани (рисунок 4.10б). На модель ткани было наложено точно такое же световое пятно, а затем рассчитана дифракционная картина с помощью быстрого преобразования Фурье. Затем автоматически были определены расстояния между основными

максимумами вдоль горизонтальной и вертикальной осей, проходящих через центр изображения. Результаты сведены в таблицы 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 –
Расстояние между
максимумами вдоль
 OX

X_{pos}	I_{max}	$Dist$
128	100	0
256	255	128
384	100	128

Таблица 4.4 –
Расстояние между
максимумами вдоль
 OY

Y_{pos}	I_{max}	$Dist$
37	12	0
110	34	73
183	51	73
256	255	73
329	51	73
402	34	73
475	12	73

В диалоговом окне расчета периодов структуры материала (рисунок 4.15) подставлено значение коэффициента K , определённое с помощью предыдущей модели.

The screenshot shows a software window titled 'Slicer X Y' with a 'Tables' tab selected. The main area is titled 'Tables of Maximums' and contains two tables:

Along X axis			Along Y axis		
X pos.	I maximum	Dist.	Y pos.	I maximum	Dist.
128	100	0	83	51	73
256	255	128	56	255	73
384	100	128	29	51	73
			02	34	73
			75	12	73

Below the tables, the coefficient K is set to 511,580. Two formulas are displayed:

$$T_X = \frac{K}{D_X} = \frac{511,58}{128} = 3,997$$

$$T_Y = \frac{K}{D_Y} = \frac{511,58}{73} = 7,008$$

Рисунок 4.15 – Окно программы с таблицами расстояний между максимумами интенсивности и $K = 511,580$

Таким образом, расчетное расстояние между вертикальными (уточными) нитями в модели равно 3,997, а расстояние между горизонтальными (основными) нитями равно 7,008. Как мы помним, для данной модели эти расстояния равнялись 4 и 7 пикселей соответственно. Следовательно, в данном случае отклонение измеренных с помощью разработанной системы расстояний от реальных составили:

$$100 \cdot (4 - 3,997) / 4 = 0,075\% \text{ по горизонтали};$$

$$100 \cdot (7,008 - 7) / 7 = 0,114\% \text{ по вертикали.}$$

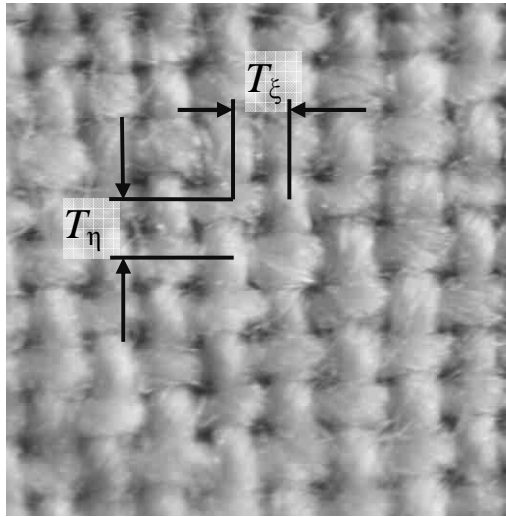
Итак, система позволяет по изображениям текстильных материалов с периодической структурой автоматически определять расстояния между повторяющимися элементами этих структур (для ткани – расстояния между соседними нитями, для трикотажа – между петельными рядами и столбиками и так далее) и определен коэффициент, связывающий эти расстояния, выраженные в пикселях изображения, с расстояниями между дифракционными максимумами. Коэффициент справедлив для фотографий материалов размером 512 на 512 пикселей.

Разработанная методика была проверена на фотографиях реальных тканей (рисунок 4.16).

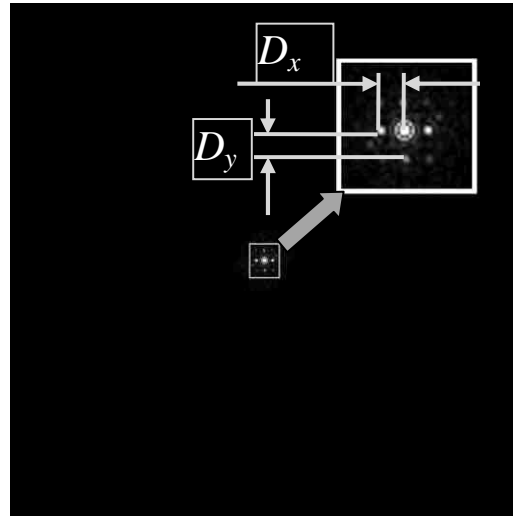
Фотография ткани сделана с разрешением 73,333 пикселя на 1 мм (440 пикселей на 6 мм). При размере исходной фотографии 512x512 пикселей и, соответственно, коэффициенте $K = 511,580$ можем рассчитать расстояние между нитями в миллиметрах:

$$T_{\xi} = \frac{K}{D_x K_{mag}} = \frac{511,580}{8 \cdot 73,333} \approx 0,872,$$

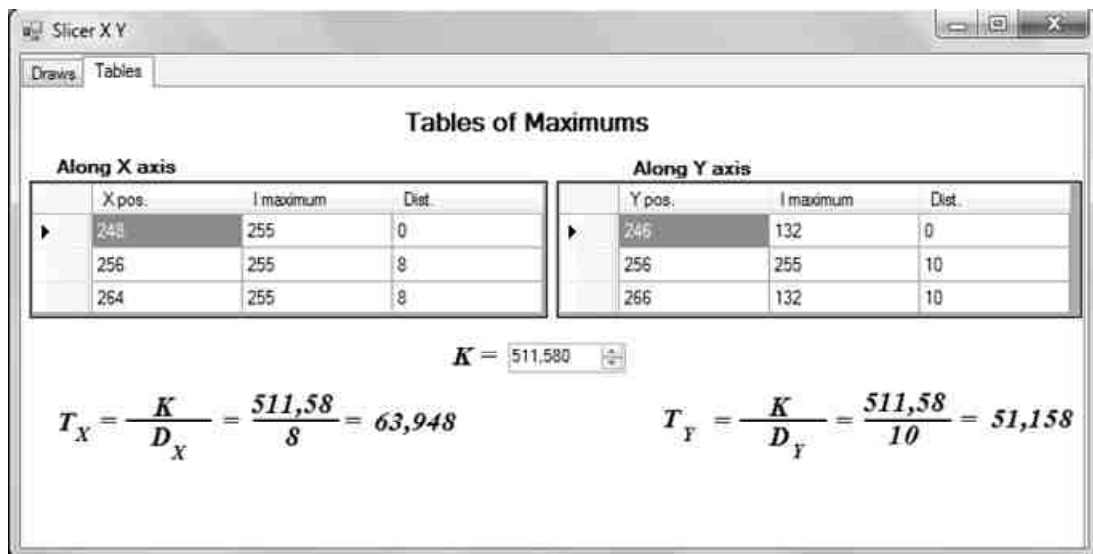
$$T_{\eta} = \frac{K}{D_y K_{mag}} = \frac{511,580}{10 \cdot 73,333} \approx 0,698.$$



а



б



в

Рисунок 4.16 – Анализ дифракционной картины, рассчитанной по фотографии образца ткани: а) исходное изображение; б) рассчитанная дифракционная картина; в) окно программы для определения расстояния между максимумами

4.3.2 Практическое определение направлений крутки нитей

В качестве исходных данных использовались цифровые фотографии моделей нитей, скрученных из проволоки, и реальных нитей, выпускаемых отечественной промышленностью. Результат выводился в виде компьютерного изображения дифракционной картины, рассчитанной по исходному изображению, с выводимыми в углах процентами средней интенсивности в каждом из квадрантов изображения по отношению к суммарной интенсивности всей картины. Определённое автоматически направление крутки выводилось в центре изображения в виде стилизованных букв *S* и *Z*. На рисунке 4.17 приведены исходные микроизображения (а), полученные с помощью компьютерного микроскопа *Leica*, и результаты работы программы (б) по определению направлений круток для модельных (скрученных из медной проволоки диаметром $d = 0,15$ мм) нитей.

Римскими цифрами обозначены:

I – модельная нить из двух стренг (свитая из двух проволок) с *S*-направлением крутки;

II – модельная нить с двумя стренгами и *Z* - направлением крутки;

III – модельная нить с тремя стренгами и *S* - направлением крутки;

IV – модельная нить с тремя стренгами и *Z* - направлением крутки.

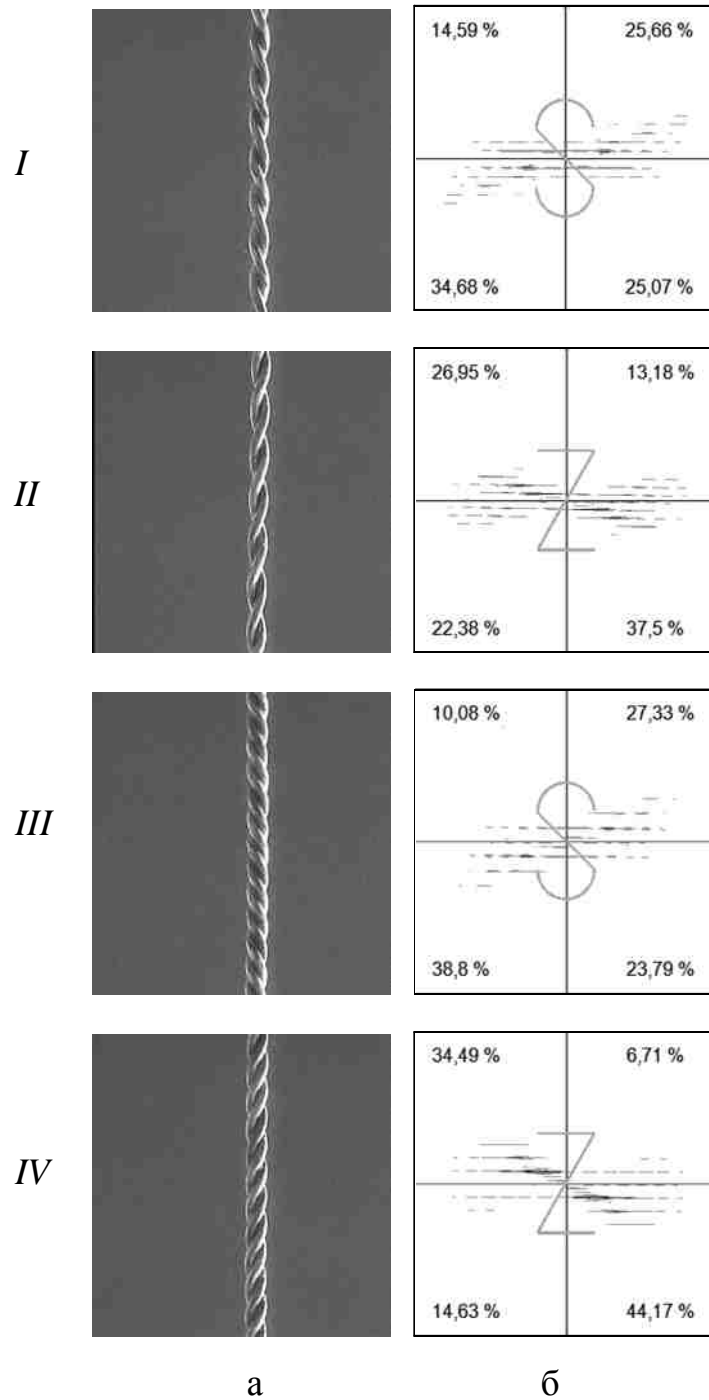


Рисунок 4.17 – Проверка метода на модельных нитях из проволоки

На рисунке 4.18 приведены результаты работы программы для изображений стандартных нитей, выпускаемых промышленностью.

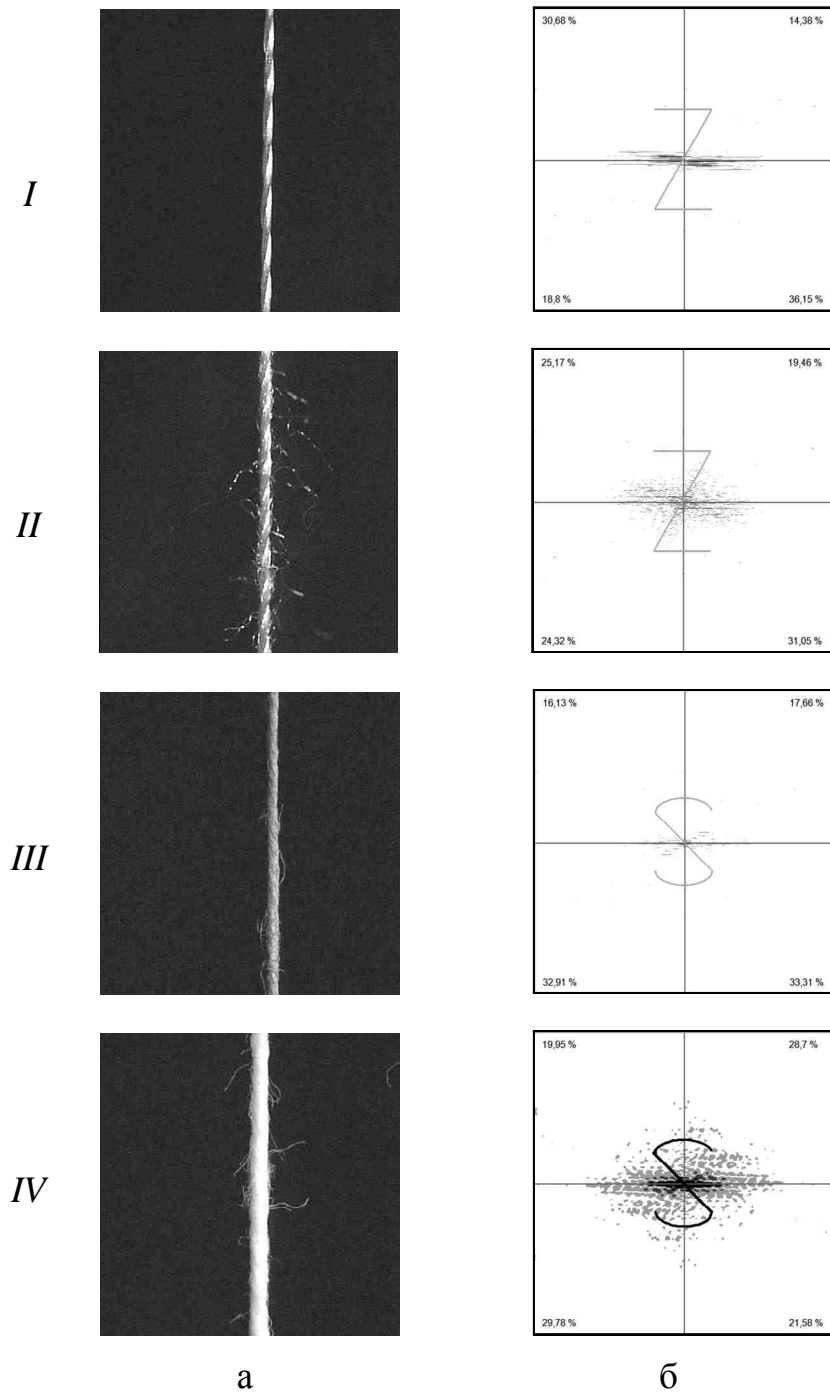


Рисунок 4.18 – Исследование текстильных нитей

На рисунке 4.18: а – микроизображения исследуемых нитей, б - результаты работы программы. Римскими цифрами обозначены:

I – бежевая нить из полиэстера 26,8 Текс Z X 2;

II – синяя нить марки "bestex" из полиэстера 40 Текс Z X 2;

III – красная нить из смеси хлопка и вискозы 39,2 Текс S X 3;

IV – белая нить 96,08 Текс S X 3.

Таким образом, имеется метод объективного определения направления крутки нити расчетным способом, исходя лишь из компьютерного изображения этой нити.

4.3.3 Практическое определение угла кручения нитей

С помощью разработанной системы угол кручения определялся для математических моделей крученых нитей, физических моделей нитей, скрученных из проволоки и реальных текстильных нитей, выпускаемых отечественной промышленностью. Результатом работы программы являлось компьютерное изображение расчетной дифракционной картины с нанесённой поверх неё диаграммой распределения интенсивности в полярных координатах и автоматически определённой величиной угла кручения.

В качестве математической модели крученой нити использовалось идеальное изображение такой нити в виде накладывающихся друг на друга спиралей. Сама нить идеально белая, с тонкими черными промежутками между витками, на абсолютно черном фоне. Такая модель позволяет рассчитывать идеальную дифракционную картину без погрешностей, связанных с особенностью съемки фотоаппаратом. Кроме того, в такой модели заранее известен угол крутки, так как мы задаём его сами при построении.

На рисунке 4.19 приведены исходные изображения таких модельных нитей (а) и диаграммы (б), построенные для их дифракционных картин, с величинами углов наклона этих диаграмм.

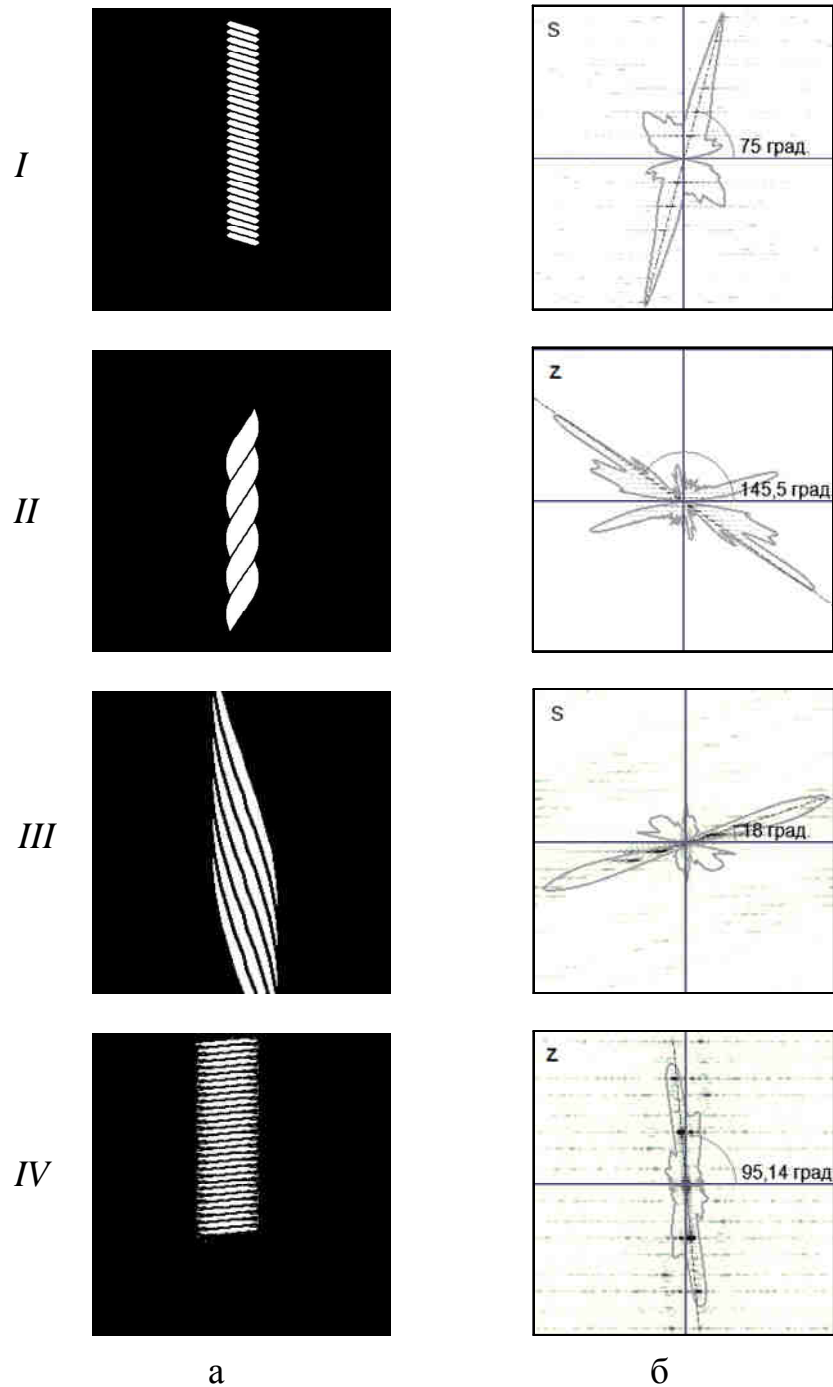


Рисунок 4.19 – Проверка метода на изображениях нитей, нарисованных программой

Римскими цифрами на рисунке 4.19 обозначены:

I – модельная нить с четным числом стренг и *S*-направлением крутки; угол крутки составляет 75° ; угол крутки по диаграмме 75° ;

II – модельная нить с четным числом стренг и *Z*-направлением крутки; угол крутки составляет 36° ; угол крутки по диаграмме

$180^\circ - 145,5^\circ = 34,5^\circ \approx 35^\circ$;

III – модельная нить с нечётным числом стренг и *S* - направлением крутки; угол крутки составляет 20° ; угол крутки по диаграмме 18° ;

IV – модельная нить с нечётным числом стренг и *Z* - направлением крутки; угол крутки составляет 85° ; угол крутки по диаграмме $180^\circ - 95,14^\circ = 84,86^\circ \approx 85^\circ$.

На рисунке 4.20 приведены исходные микроизображения (а), полученные с помощью компьютерного микроскопа *Leica*, и диаграммы (б), построенные для их дифракционных картин, для нитей, скрученных из медной проволоки диаметром $d = 0,15$ мм. Ввиду того, что стренги таких модельных нитей имеют достаточно большой диаметр, угол крутки можно достаточно точно измерить непосредственно на исходном изображении. Для измерения этого угла использовались инструменты свободно распространяемого графического редактора *GIMP*. Это позволило сравнить угол, измеренный по исходному изображению с углом, рассчитанным программой через построение диаграммы интенсивности. Римскими цифрами на рисунке 4.20 обозначены:

I – модельная нить из двух стренг (свитая из двух проволок) с *S*- направлением крутки; угол крутки, измеренный с помощью *GIMP*, составляет 19° ; угол крутки по диаграмме 19° ;

II – модельная нить с двумя стренгами и *Z* - направлением крутки; угол крутки, измеренный с помощью *GIMP*, составляет 20° ; угол крутки по диаграмме $180^\circ - 161^\circ = 19^\circ$;

III – модельная нить с тремя стренгами и *S* - направлением крутки; угол крутки, измеренный с помощью *GIMP*, составляет 32° ; угол крутки по диаграмме $30,6^\circ \approx 31^\circ$;

IV – модельная нить с тремя стренгами и *Z* - направлением крутки; угол крутки, измеренный с помощью *GIMP*, составляет 30° ; угол крутки по диаграмме $180^\circ - 153^\circ = 27^\circ$.

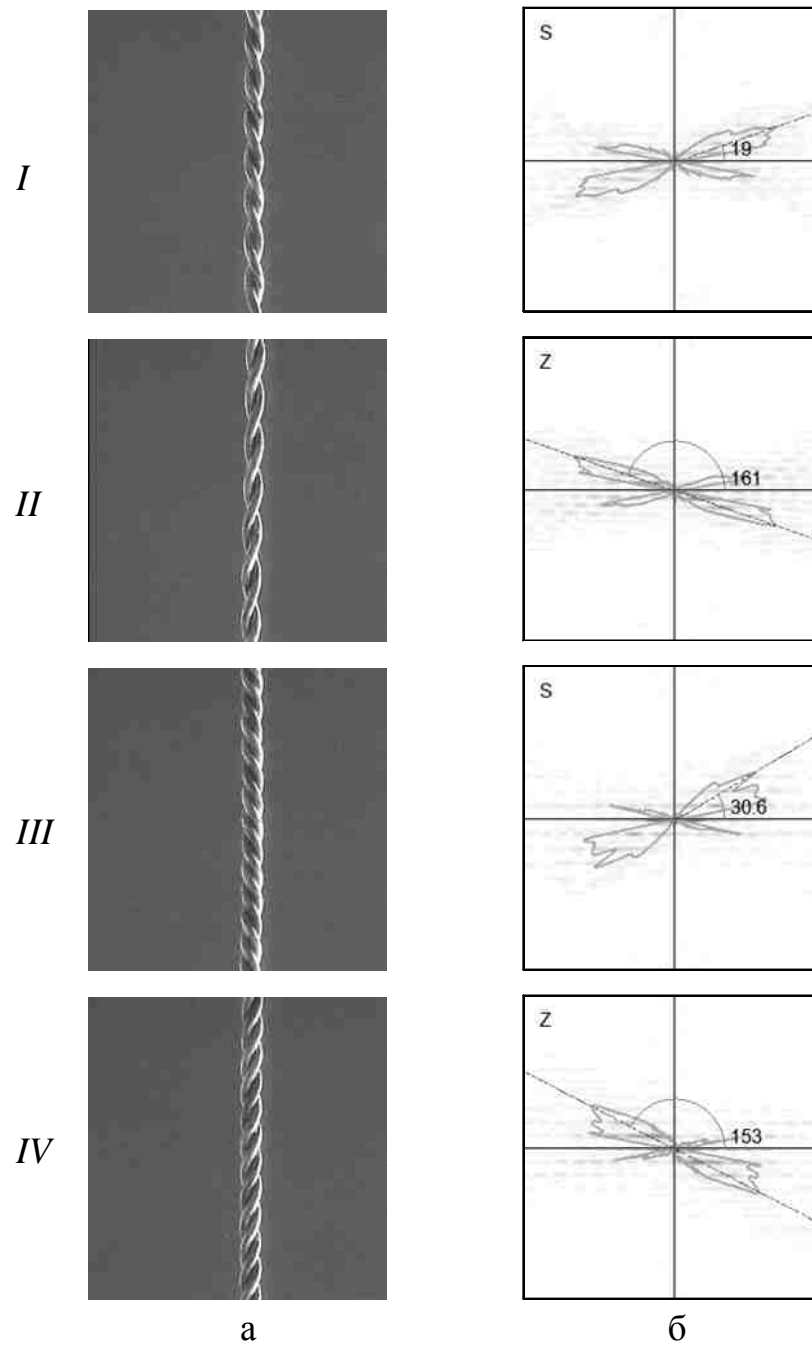


Рисунок 4.20 – Исследование моделей нитей, скрученных из проволоки

Таким образом, погрешность измерения угла крутки указанным методом с помощью разработанной программы по цифровым фотографиям размера 512 на 512 пикселей можно оценить как $\pm 3^\circ$.

Наконец на рисунке 4.21 приведены результаты определения угла крутки предложенным способом для изображений стандартных нитей, выпускаемых промышленностью.

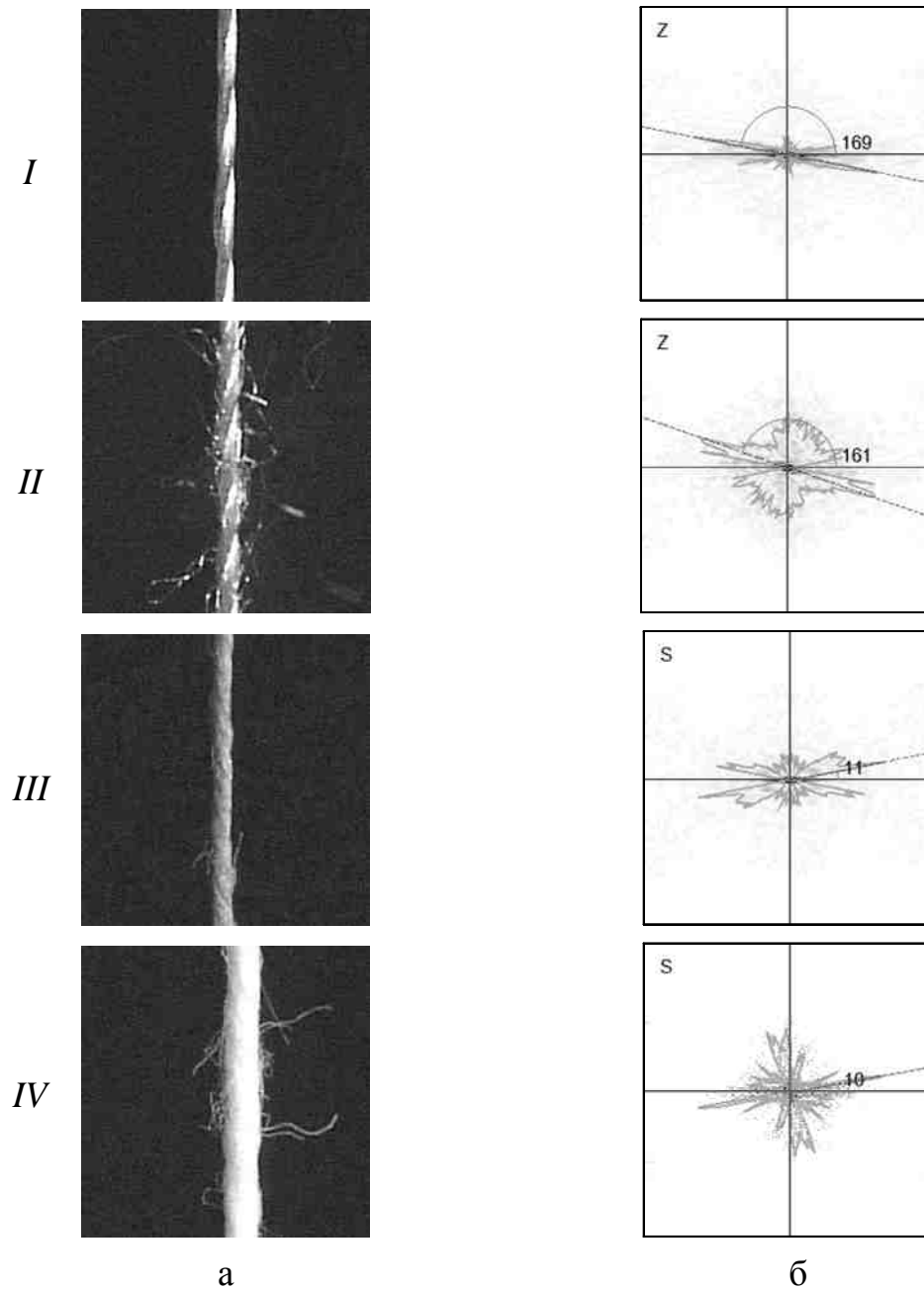


Рисунок 4.21 – Исследование текстильных нитей

На этом рисунке: а – микроизображения исследуемых нитей, б - результаты работы программы. Римскими цифрами обозначены:

I – бежевая нить из полиэстера 26,8 Текс Z X 2; угол крутки по диаграмме $180^{\circ}-169^{\circ} = 11^{\circ}$;

II – синяя нить марки "bestex" из полиэстера 40 Текс Z X 2; угол крутки по диаграмме $180^{\circ}-161^{\circ} = 19^{\circ}$;

III – красная нить из смеси хлопка и вискозы 39,2 Текс S X 3; угол крутки по диаграмме 11° ;

IV – белая нить хлопчатобумажная 96,08 Текс S X 3; угол крутки по диаграмме 10° .

Таким образом, разработанная система автоматически определяет величину угла кручения нити по её компьютерному изображению. Результат, получаемый с помощью этой программы можно назвать объективным в том смысле, что он не зависит от наблюдателя, как это происходит при измерении угла крутки под микроскопом [4].

4.3.4 Практическое определение перекоса

Разработанная система была использована для определения перекоса нитей как в изображениях математических моделей тканей, так и в реальных тканях. Результат автоматического измерения перекоса выводился в виде компьютерного изображения расчётной дифракционной картины с нанесённой поверх неё диаграммой распределения интенсивности и автоматически определёнными направлениями на два главных максимума этой диаграммы из центра изображения. Отклонение угла между этими направлениями от 90° считалось величиной перекоса нитей в ткани.

На рисунке 4.22 приведены изображения моделей ткани (а), построенных по методу, описанному в параграфе 4.2.2, и результаты работы программы по определению угла перекоса для них (б).

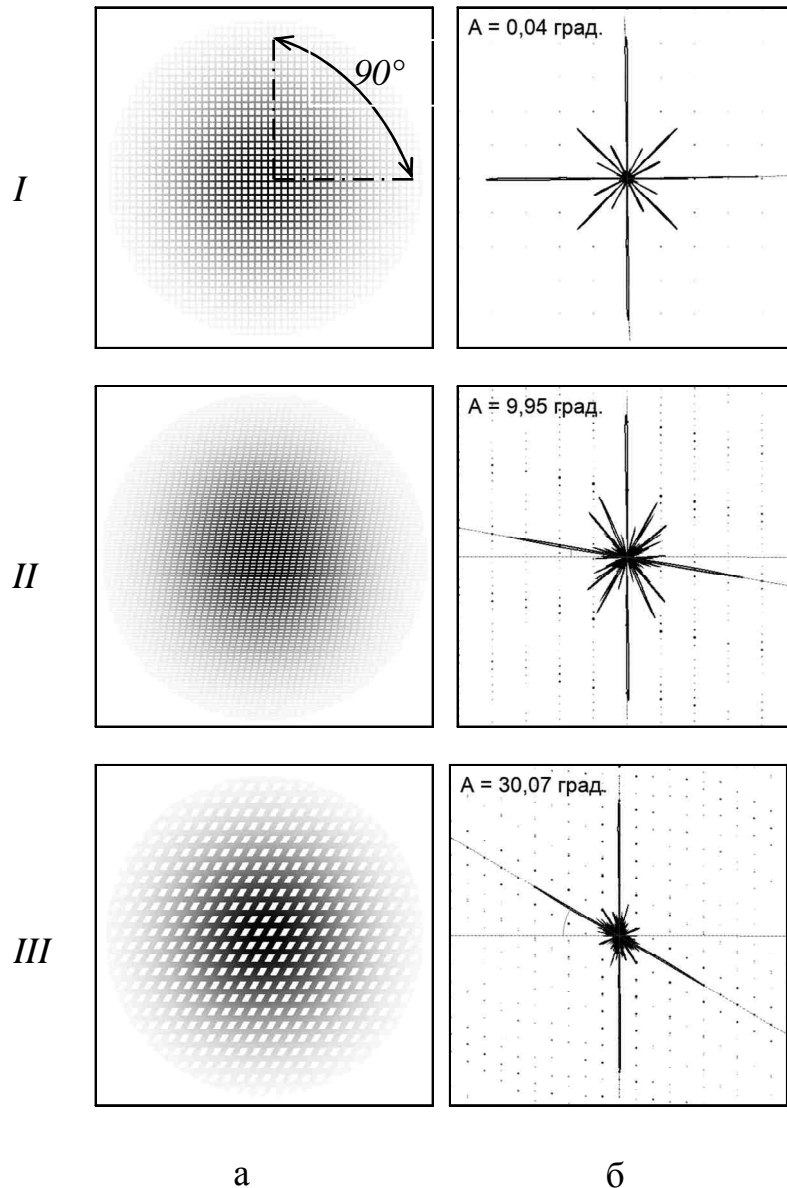


Рисунок 4.22 – Расчет угла перекоса для компьютерных моделей ткани

Римскими цифрами на рисунке 4.22 обозначены:

- I* – модель ткани с углом 90° между нитями утка и основы (без перекоса); модель построена из линий с шагом 10 пикселей по вертикали и горизонтали;
- II* – модель ткани с углом 80° между нитями утка и основы (угол перекоса 10°); модель построена из линий с шагом 5 пикселей по вертикали и 10 по горизонтали;
- III* – модель ткани с углом 60° между нитями утка и основы (угол перекоса 30°); модель построена из линий с шагом 20 пикселей по вертикали и

горизонтали, толщина «нити» увеличена в 3 раза по сравнению с образцами *I* и *II*.

Из приведённых примеров видно, что угол определяется с точностью до одной десятой градуса. Таким образом, метод протестирован на моделях изображений тканей и показал удовлетворительную точность.

На рисунке 4.23 приведены результаты проверки работоспособности программы для изображений тканей, выпускаемых отечественной промышленностью.

На рисунке 4.23: а – микроизображения исследуемых тканей, б – результаты работы программы. Римскими цифрами обозначены:

I – плащевая ткань (на рисунке 4.23а приведён негатив исходного изображения);

II – полотно;

III – ткань с явно выраженным перекосом;

IV – другой участок той же ткани, где перекос нитей происходит в противоположную сторону по сравнению с рисунке 4.23(*III*а); в этом случае угол β между направлениями на максимумы диаграммы получается больше 90° , соответственно, угол перекоса $A = 90^\circ - \beta$ меньше нуля; это означает, что предлагаемый метод позволяет определять не только величину, но и направление перекоса.

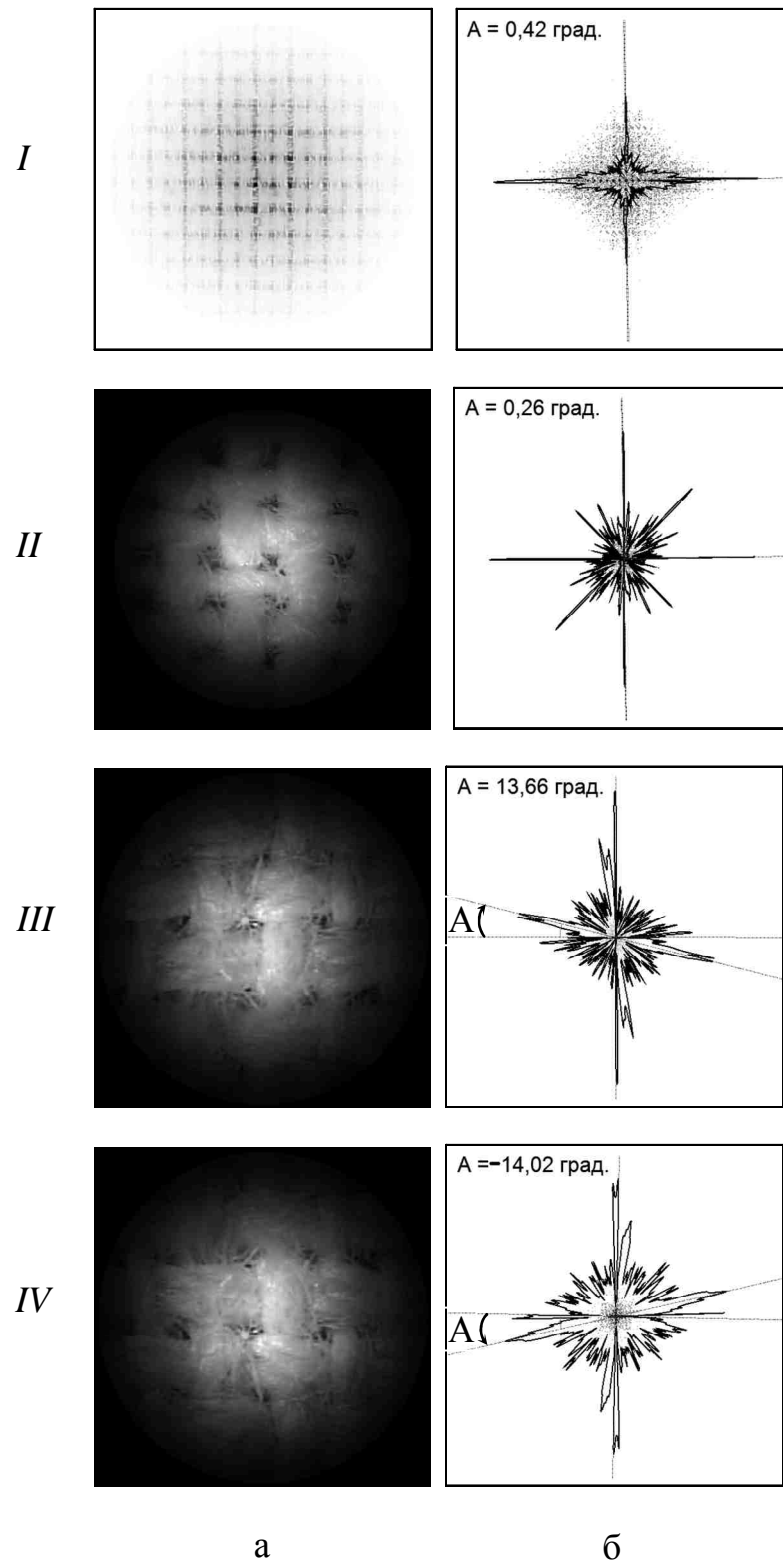


Рисунок 4.23 – Определение перекоса в реальных тканях

Таким образом, разработанная система автоматически определяет направление и величину угла диагонального перекоса уточной нити в ткани по отношению к нити основы. Преимуществом данного метода является то, что в

качестве исходных данных достаточно микроизображения исследуемого участка ткани, которое может быть выполнено цифровой камерой с достаточным увеличением, в том числе и во время движения ткани. Алгоритм быстрого преобразования Фурье позволяет с высокой скоростью построить изображение дифракционной картины. Алгоритм построения диаграммы распределения интенсивности максимумов в дифракционной картине также работает быстро. Всё это позволяет использовать данный метод для разработки систем контроля перекоса, действующих непосредственно на станке во время его работы и управляющих системами исправления перекоса.

4.3.5 Демонстрация практического применения метода «двойного» Фурье-преобразования

Разработанный экспериментальный образец системы определения геометрических параметров структуры материалов может быть успешно применён и для практической реализации метода двойного Фурье-преобразования, описанного в параграфе 3.3.

Для этого достаточно применить повторно расчет дифракционной картины методом дискретного двумерного быстрого преобразования Фурье к рассчитанной по исходному изображению материала дифракционной картине. С помощью разработанной системы была проведена серия численных экспериментов по определению величин геометрических параметров микроструктуры по компьютерным изображениям различных текстильных материалов.

Как отмечалось в параграфе 3.3, суть метода «двойного» Фурье-преобразования заключается в том, что повторное преобразование Фурье применяется не к полю комплексных амплитуд $U_{n,m}$ (результату первого Фурье-преобразования), а к полю интенсивностей $I_{n,m}$. На рисунке 4.24 продемонстрированы различия в расчете второй дифракционной картины по

величинам $U_{n,m}$ (б) и $I_{n,m}$ (в). Для этого в программу была добавлена опция сохранения комплексных амплитуд, получаемых после первого расчета.

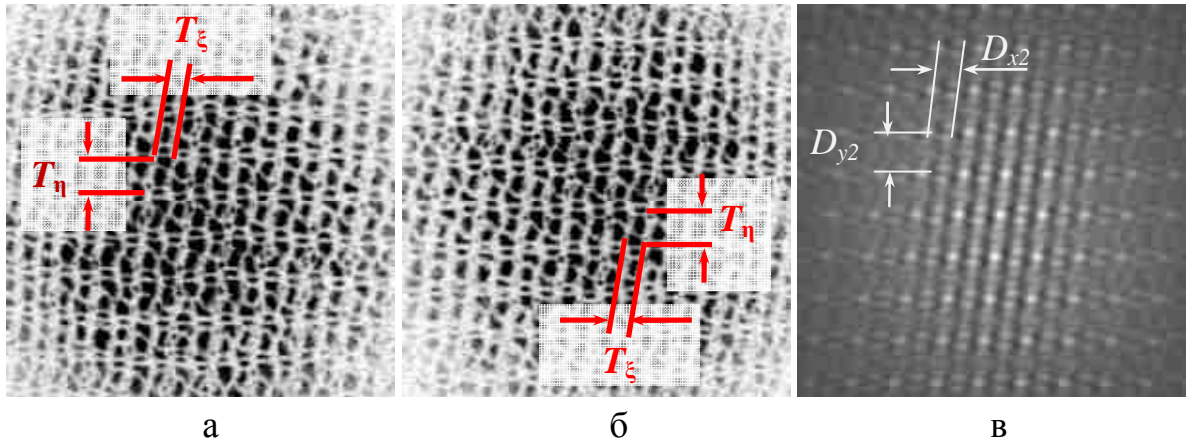


Рисунок 4.24 – Применение «двойного» Фурье-преобразования к изображению микроструктуры чулочного трикотажа: а) исходное изображение; б) два последовательных Фурье-преобразования без расчета изображения между ними; в) второе Фурье-преобразование применено к изображению, построенному после первого Фурье-преобразования

Рисунок 4.23б демонстрирует, что после второго Фурье-преобразования, применённого к полю комплексных амплитуд, мы получаем лишь перевёрнутое исходное изображение. Применение же второго Фурье-преобразования к полю интенсивностей, рассчитанных по значениям комплексных амплитуд по формуле (1.19), даёт изображение (рисунок 4.23в) с ярко выраженными дифракционными максимумами, расстояние между которыми в точности равно расстоянию между элементами периодической структуры в исходном изображении (рисунок 4.23а).

На рисунке 4.25 показано определение периода повторения витков крученой нити по картине дифракционных максимумов, полученной после второго преобразования Фурье. В качестве исходного изображения для расчета используется цифровая фотография нити, сделанная «на просвет».

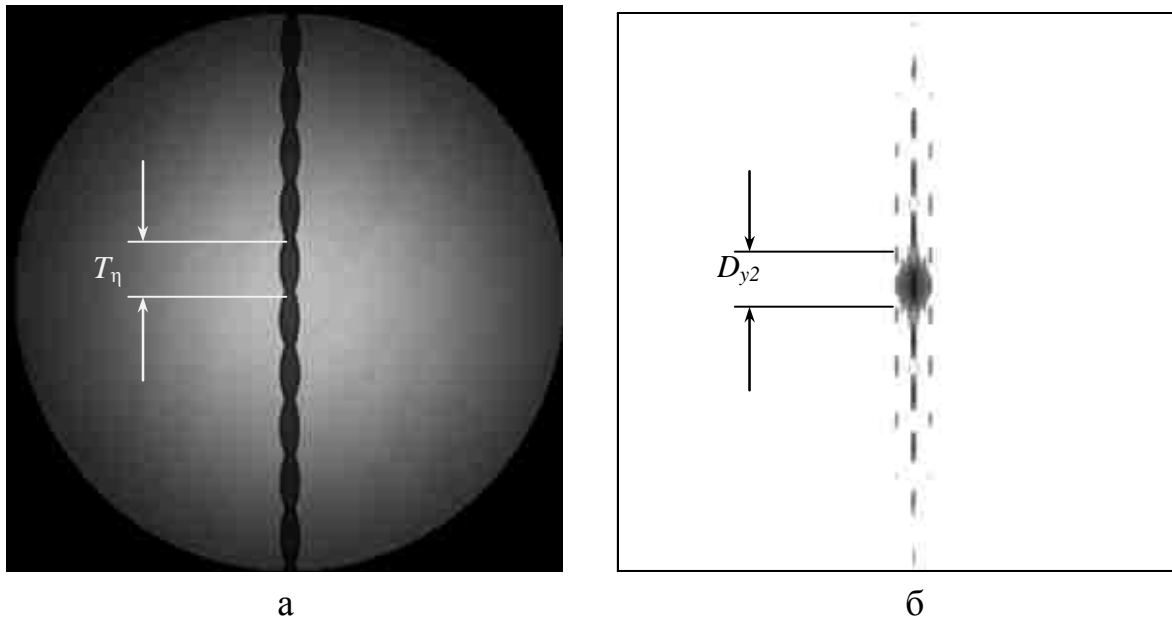
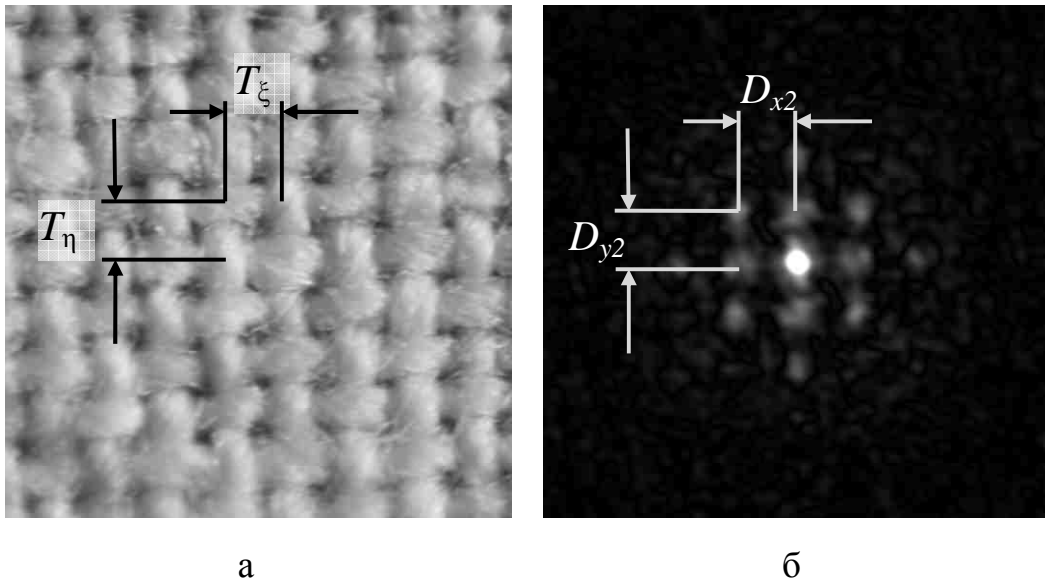


Рисунок 4.25 – Применение «двойного» Фурье-преобразования для определения периода витков кручёной нити: а) исходное изображение нити, скрученной из двух стренг; б) дифракционная картина после двух Фурье-преобразований

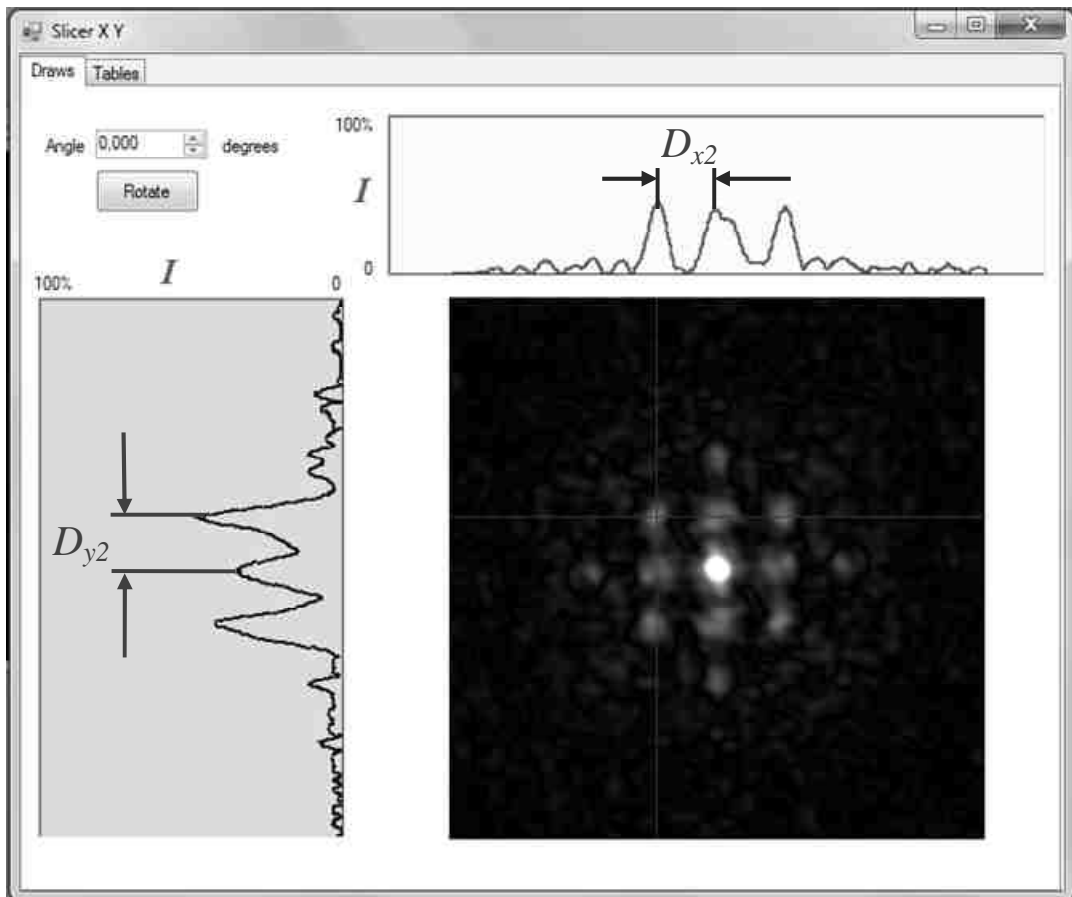
Сравнивая изображения (а) и (б) на рисунке 4.25 можно убедиться, что расстояния между дифракционными максимумами в точности равны расстояниям между витками нити на изображении. При этом расстояния между максимумами значительно проще определить в автоматическом режиме, чем распознать взаимное расположение витков на исходном изображении. Для получения истинных значений расстояний достаточно разделить полученное значение на коэффициент увеличения микроскопа и фотокамеры.

Для автоматического определения расстояний между дифракционными максимумами может быть использовано то же окно программы «Диаграммы срезов», что и в параграфе 4.3.1, только в данном случае периоды дифракционных максимумов будут прямо пропорциональны расстояниям между периодическими элементами структуры материала. На рисунке 4.26 приведено определение периодов структуры полотняного переплетения ткани, а на рисунке 4.27 – переплетения «тартан».



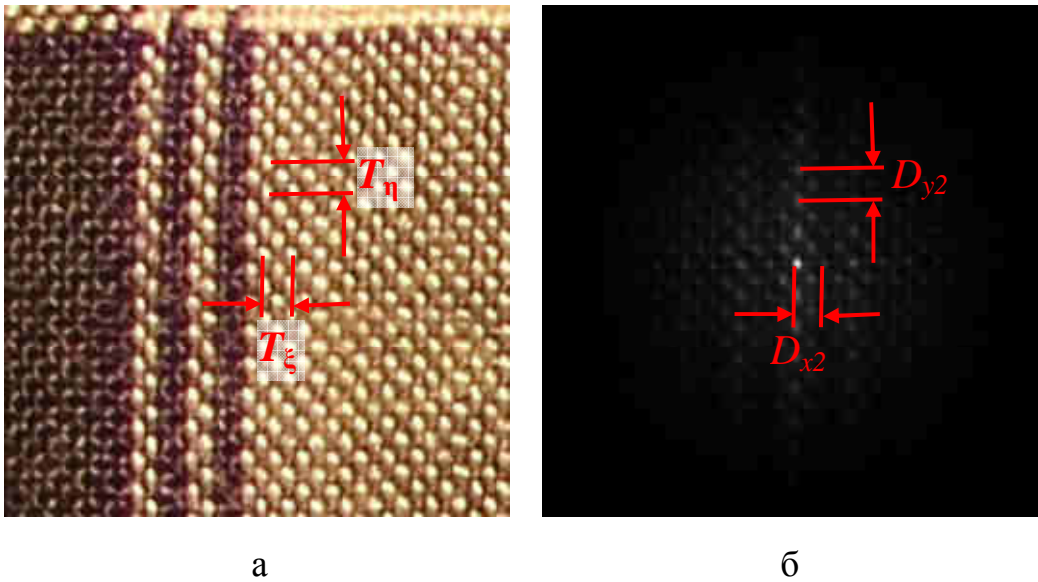
а

б



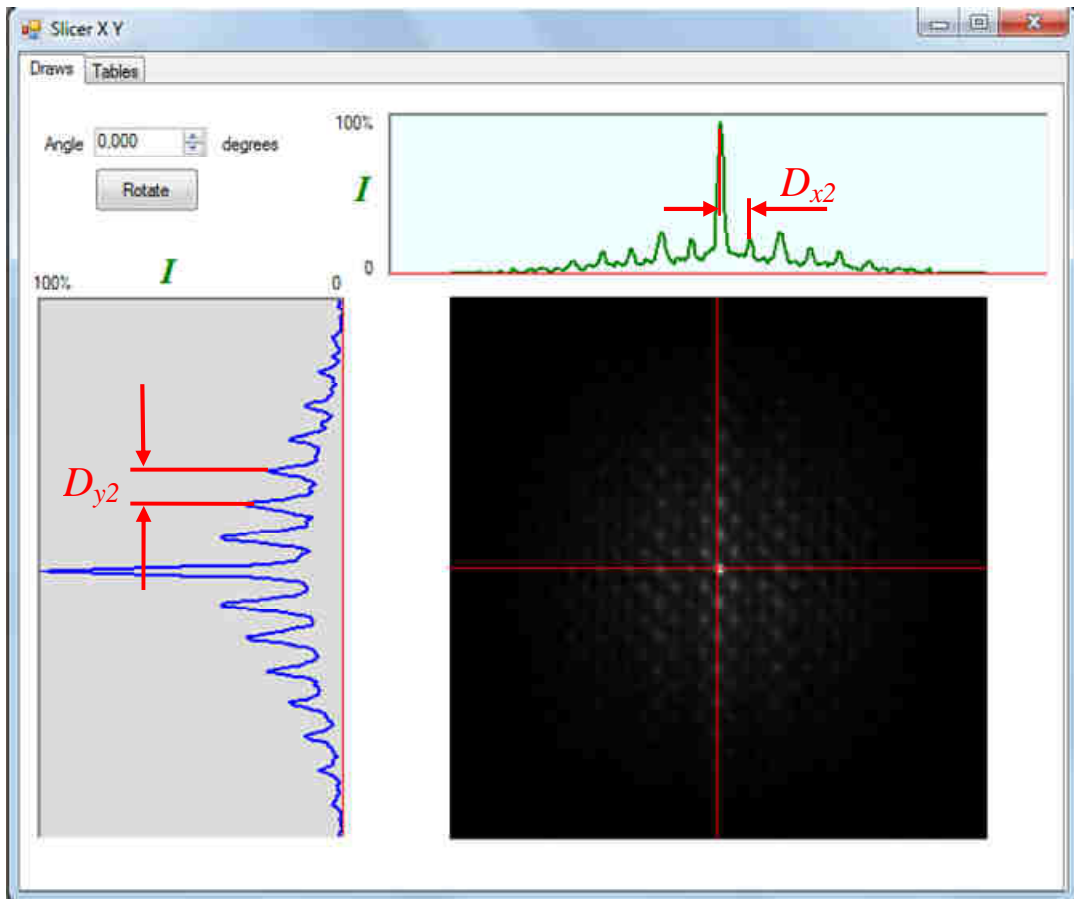
в

Рисунок 4.26 – Применение «двойного» Фурье-преобразования к изображению полотняного переплетения: а) исходное изображение ткани; б) дифракционная картина после двух Фурье-преобразований; в) определение расстояний в окне программы



а

б



в

Рисунок 4.27 – Применение «двойного» Фурье-преобразования к изображению переплетения «тарган»: а) исходное изображение ткани; б) дифракционная картина после двух Фурье-преобразований; в) определение расстояний в окне программы

Появление компьютерных программ, реализующих алгоритм быстрого дискретного двумерного преобразования Фурье и позволяющих за доли секунды

рассчитывать дифракционную картину по любому исходному изображению, позволило на практике реализовать метод «двойного» Фурье-преобразования, который проще в получении конечного результата, чем обычный дифракционный метод. И уж конечно он намного проще таких методов распознавания изображения, как, например, методы, основанные на преобразовании Хафа [36].

4.3.6 Определение точности измерения угла кручения нити при использовании диаграммы распределения интенсивности

Производилось сравнение точности измерений бесконтактным методом по дифракционной картине нити с использованием алгоритма построения диаграммы распределения интенсивностей в полярных координатах со способом непосредственного измерения угла кручения под микроскопом. Измерения проводились для нитей, выпускаемых ОАО «Прядильно-ниточный комбинат им. С.М. Кирова» (г. Санкт-Петербург).

Результаты сравнительных измерений приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнение результатов определения величины угла кручения способом непосредственного измерения (способ 1) и по дифракционной картине (способ 2)

Тип нити	Условное обозначение	Линейная плотность, Текс	Угол кручения $\bar{\beta}$ Градусы (оценка среднего)		$\alpha_{\text{выч.}}$ для t - статистики при $P_{\text{дов.}}=0,95$ ($\alpha = 0,05$)
			По способу 1	По способу 2	
Хлопчатобумажные	10ХБ	103(34*3)	34,05	35,01	0,109
Армированные (лавсан+лавсан)	35ЛЛ	34,5(16,7*2)	23,34	22,99	0,473
	45ЛЛ	43,5(21*2)	27,05	27,01	0,939
	70ЛЛ	65(21*3)	34,55	34,7	0,788
	100ЛЛ	108(50*2)	18,49	19,13	0,062
Армированные (лавсан+хлопок)	44ЛХ	45(21,5*2)	27,64	27,52	0,734
	65ЛХ	68,5(21,5*3)	19,85	20,01	0,839
	100ЛХ	108(50*2)	18,01	18,99	0,143

В таблице 4.5 способом 1 именуется способ непосредственного измерения угла кручения под микроскопом, описанный в [4], способом 2 – предлагаемый

способ с использованием расчета дифракционной картины и диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов.

Проверяется гипотеза H_0 о статистической незначимости разницы в измерениях угла кручения способом непосредственного измерения угла кручения под микроскопом и вынесенным на защиту способом с использованием диаграммы распределения интенсивности:

$$H_0 : \bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2 = 0, \quad (4.5)$$

где $\bar{\beta}_1$ – угол кручения, измеренный способом непосредственного измерения (способ 1); $\bar{\beta}_2$ – угол кручения, измеренный с использованием расчета дифракционной картины и диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов (способ 2). При $\alpha_{\text{выч.}} > 0,05$ ($t < t_{\text{критич.}}$) гипотеза H_0 принимается.

Согласно таблице 4.5 значения вычисленного уровня значимости статистики Стьюдента (t -критерия) $\alpha_{\text{выч.}} > 0,05$ свидетельствуют о том, что с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}=0,95$ разница в измерениях угла кручения обоими способами является статистически незначимой [75].

Учитывая, что способ непосредственного измерения угла под микроскопом является исключительно трудоёмким, предлагаемый способ с использованием диаграммы распределения интенсивностей обеспечивает высокую точность измерения при высокой скорости измерения и при минимуме трудозатрат.

Выводы к главе 4

1. Разработано программное обеспечение для экспериментального образца системы бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой.

2. Для проверки работоспособности экспериментального образца системы разработаны программы моделирования изображения крученой нити и ткани с уточным перекосом.

3. Экспериментальный образец системы был протестирован на различных периодических структурах: моделях и реальных текстильных материалах. В результате была подтверждена правильность разработанных алгоритмов и способов измерения.

Заключение

В теоретической части работы, охваченной первыми двумя главами, подробно рассмотрены требующие контроля геометрические параметры структуры различных текстильных материалов. Показано влияние этих параметров на физико-механические характеристики производимых нитей, тканей, трикотажа. Таким образом, оценивание величин этих параметров является важной частью производственного процесса.

Продемонстрированы основные трудности существующих в настоящее время методов определения геометрических параметров структур материалов. Большая часть этих методов, используемых в настоящее время и регулируемых соответствующими стандартами, совершенно не автоматизирована, требует использования дорогого труда лаборантов, а получаемые результаты зависят от человеческого фактора (субъективные ошибки измерений).

Разработанные же к настоящему моменту автоматизированные методы контроля требуют использования дорогостоящего оборудования и могут быть применены в лабораторных условиях, а не непосредственно в цеху.

Наиболее перспективными можно считать методы оценивания геометрических параметров, основанные на явлении дифракции монохроматического света на периодической микроструктуре различных материалов. Эти методы относительно дешёвы (особенно после появления недорогих бытовых лазеров), и их использование не требует разрушения исследуемого образца материала. Таким образом, эти методы являются бесконтактными и неразрушающими.

В исследовательской части работы показано, что благодаря существующему математическому аппарату теории дифракции, дифракционная картина, идентичная наблюдаемой на реальной физической установке, может быть рассчитана и построена на компьютере на основании исходного изображения материала. Ещё некоторое время назад задача расчета дифракционной картины хоть и имела чёткое математическое описание, но требовала значительных

вычислительных ресурсов. С развитием вычислительной техники эта задача стала доступной самым дешёвым современным компьютерам. А использование алгоритмов быстрого преобразования Фурье позволило решать эту задачу практически мгновенно.

Рассчитанные дифракционные максимумы ярко выражены, в отличие от элементов периодической структуры исследуемого материала. Это позволяет применить алгоритмы автоматического программного анализа дифракционных картин с целью вычисления геометрических параметров структуры текстильных материалов.

В параграфе 1.3.2 упоминается прибор *Tester 5-S800*, стоимость которого колеблется от 15 до 85 тысяч долларов США. Стоимость же экспериментального образца программно-аппаратной системы, разработанной на основе предлагаемых алгоритмов, можно оценить следующим образом:

- стоимость 80-кратного микроскопа около 700 долларов;
- цифровая веб-камера – 100 долларов;
- портативный персональный компьютер, ресурсов которого достаточно для выполнения программы Фурье-преобразования, – 1000 долларов.

Итого: стоимость разработанного комплекса не превышает 2 тысяч долларов США.

Оперативность выполнения измерений с помощью предлагаемого экспериментального образца системы, вынесенного на защиту, значительно выше, чем при использовании ручных разрушающих способов, используемых в настоящее время, и не ниже, чем при использовании специализированных устройств типа *Tester 5-S800*. При ручном измерении линейных геометрических параметров структуры из полотна вырезается образец, расправляется на столе, далее с помощью лупы и пинцета осуществляется ручной подсчет количества периодических элементов (нитей) по длине и ширине образца. Измеряются с помощью линейки длина и ширина, затем рассчитываются средние расстояния между отдельными нитями. Время на выполнение операции, составляет от 2 до 5

минут в зависимости от навыков контролёра и количества нитей на единицу длины. Измерение угловых геометрических параметров, в частности, величины перекоса, осуществляется с помощью угломера, при этом для обеспечения надлежащей точности надо выполнить не менее 10 замеров. Время на выполнение операции, составляет от 2 до 3 минут в зависимости от навыков контролёра и расцветки ткани. Также угол кручения нити может быть определен по величине крутки с помощью (1.6). Крутка измеряется с помощью круткомера, этот способ также является разрушающим. Суммарное время на измерение величины крутки и пересчёт по (1.6) при использовании полуавтоматических круткомеров составляет от 1 до 3 минут.

При измерении как линейных, так и угловых геометрических параметров материалов с периодической структурой с помощью предлагаемого экспериментального образца системы качества затраты времени составляли от 3 до 15 секунд, включая выполнение фотографии структуры, передачу цифрового изображения на компьютер и его последующей обработки с помощью программы, реализующей защищаемые алгоритмы.

В ходе проведённых исследований были получены следующие **основные результаты**.

1. Разработаны модель дифракционной картины и алгоритм её реализации по микроизображениям материалов с периодической структурой. Модель используется для бесконтактного оценивания геометрических параметров структуры. Преимущество разработанного алгоритма состоит в увеличении скорости вычислений за счет использования для расчета интеграла Френеля-Кирхгофа высокопроизводительного метода быстрого преобразования Фурье.
2. Разработан алгоритм построения угловой диаграммы распределения интенсивностей дифракционных максимумов и измерения с её помощью направления и угла кручения текстильной нити, а также определения дефекта перекоса уточной нити в ткани. Алгоритм позволяет автоматически и с высокой точностью измерять угловые размеры в текстильных

микроструктурах, а также оперативно контролировать такой важный дефект, возникающий в процессе производства ткани, как перекося уточной нити. В отличие от существовавших ранее методов данный способ не требует использования сложных оптических установок.

3. Разработан алгоритм расчета вторичной дифракционной картины периодической структуры материала по методу двойного Фурье-преобразования. В силу того, что после применения метода получается дифракционная картина, на которой расстояния между максимумами в точности соответствуют размерам периодических элементов в исходном изображении материала, повышается точность измерения. Способ двойного Фурье-преобразования позволяет непосредственно измерять линейные геометрические размеры структур, в то время как обычные дифракционные методы дают величины, обратно пропорциональные истинным геометрическим размерам, что требует дополнительного пересчета с использованием коэффициента, учитывающего особенности используемой оптической системы.
4. На основе разработанных методов и алгоритмов создан экспериментальный образец системы бесконтактного определения величин геометрических параметров материалов с периодической структурой, позволяющий повысить оперативность контроля качества этих материалов по сравнению с традиционными методами, отказаться от разрушения материала при проведении измерений и снизить использование ручного труда.

Перспективы дальнейших исследований в данной области заключаются в повышении автоматизации процесса получения цифрового изображения материала, а также в применении предложенных алгоритмов к обработке изображений и измерению геометрических параметров различных видов материалов и изделий.

Результаты исследований публиковались в [76-88].

По результатам исследований были сделаны доклады [48, 89, 90].

По результатам проведённой исследовательской работы получены два патента на изобретения [91, 92] и зарегистрированы четыре компьютерные программы [93-96].

Список литературы

1. Шляхтенко П. Г. Оптические методы контроля параметров волоконсодержащих материалов. Контроль структуры текстильных материалов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 347 с.
2. Шустов Ю. С. Основы текстильного материаловедения: учебное пособие. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина: Совъяж Бево, 2007. – 302 с.
3. Садыкова Ф. Х. Текстильное материаловедение и основы текстильных производств: учебник /Ф. Х. Садыкова, Д. М. Садыкова, Н. И. Кудряшова. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 288 с.
4. Давыдов А. Ф. Текстильное материаловедение: учебное пособие. - М.: Рос. заоч. ин-т текстил. и лег. пром-сти, 1997. - 168 с.
5. Lord P. R. Handbook of yarn production: technology, science and economics. – Cambridge: Woodhead Pub.: Textile Institute; Boca Raton: CRC Press, 2003. – 493 p.
6. Atkinson C. False twist textured yarns: principles, processes and applications. - Cambridge: Woodhead Pub., 2012. – 221 p.
7. Wang X. Yarn Technology and Quality. Courses In Yarn Technology. - Geelong, Vic.: Deakin University, 2000.
8. Далидович А. С. Основы теории вязания: учебник. - М.: Легкая индустрия, 1970. – 432 с.
9. Шалов И. И. Технология трикотажа: учебник / И. И. Шалов, А. С. Далидович, Л. А. Кудрявин. - М.: Легпромбытиздат, 1986. – 376 с.
10. Механическая технология текстильных материалов: учебник / под ред. А. Г.Севостьянова. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 509 с.
11. Jaouadi M. Evaluation of real yarn diameter/ M. Jaouadi, S. Msehli, F. Sakli // The Indian Textile Journal. – 2007. – September. URL: <http://docslide.us/documents/evaluation-of-real-yarn-diameter.html> (дата обращения: 07.06.15).

12. Mahmoudi M. R. A new electro-mechanical method for measuring yarn thickness/ M. R. Mahmoudi, W. Oxenham // Autex Research Journal. – 2002. – March (Vol. 2, №1). – P. 28 – 37.
13. Jewel, Raul. Textile Testing. - New Delhi: APH Publishing, 2005. – 280 p.
14. Патент 262478 SU. Прибор для измерения угла кручения нити / Гурвичюс И. В., Каплан В. И., Кроткус В. А. - № 1260568/28-12; заявл. 01.08.1968; опубл. 26.01.1970, Бюллетень № 6.
15. Patent 4648054 US. Continuous measurement of yarn diameter and twist/ Boshra D. Farah, Jae L. Woo. – № 06/622,478; заявл. 20.06.84; опубл. 03.03.87.
16. Патент 2482231 РФ, МПК D03J1/20. Устройство для контроля плотности ткани по утку и измерительный преобразователь длины участка, пройденного тканью в процессе работы ткацкого станка / Блинов О. В., Калинин Е. Н. – № 2012125121/12; заявл. 15.06.12; опубл. 20.05.2013, Бюллетень № 14.
17. Патент 881611 SU, МПК G 01 N 33/36. Способ определения поверхностной плотности трикотажного полотна/ Пинхасович А. В., Иванов В.Ф. – № 2843457/23-12; заявл. 21.11.79; опубл. 15.11.1981, Бюллетень № 42.
18. Бесхлебная С. Е. Разработка метода расчета объема сквозных пор в тканях главных и производных переплетений: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02. – М., 2004. – 168 с.
19. Патент 80193 СССР. Устройство для обнаружения и автоматической компенсации перекоса уточной нити на ширильных машинах/ Красильщиков Л. Б. – № 386701; заявл. 29.10.48; опубл. 1950, Бюл. № 5.
20. Патент 99319 СССР. Прибор для определения неровности поверхности ткани / Пальдрок Ю. Е. – № 3828/448688; заявл. 11.03.54; опубл. 1954, Бюл. № 11.

21. Патент 99445 СССР. Способ определения неровноты, например, вязания трикотажа/ Мильченко И. С. – № 4091/448802; заявл. 17.06.1954; опубл. 1954, Бюл. № 12.
22. Kretzschmar S. D. Uster© Tester 5-S800. Application Report/ S.D. Kretzschmar, R. Furter. – Uster: Uster Technologies AG, 2009. – 40 p.
23. Патент 2035035 РФ, МПК G01N15/08. Способ определения пористости материалов/ Демин А. В., Смышляева Е. Ю., Золотарев В. М., Мирза А. В., Горбунов Н. И., Кретинин В. Б. - № 93003272/25; заявл. 18.01.93; опубл. 10.05.95.
24. Корнюхина Т. А. Определение ориентации и распрямленности волокон методом рассеяния излучения / Т. А. Корнюхина, И. Г. Борзунов// Изв. вузов. ТТП. – 1966. – № 1. – С. 19 – 22.
25. Корнюхина Т. А. Определение ориентации и распрямленности волокон методом рассеяния излучения / Т. А. Корнюхина, И. Г. Борзунов // Изв. вузов. ТТП. – 1976. – № 1. – С. 25 – 28.
26. Корнюхина Т. А. Определение ориентации и распрямленности волокон методом рассеяния излучения / Т. А. Корнюхина, И. Г. Борзунов // Изв. вузов. ТТП. – 1976. – № 3. – С. 19 – 22.
27. Яковлев В. В. Прибор для измерения коэффициента параллелизации волокон в полуфабрикатах/ В. В. Яковлев, Н. А. Цитович // Изв. вузов. ТТП. – 1966. – № 1. – С. 170 – 173.
28. Яковлев В. В. Оптический метод определения степени параллелизации хлопковых волокон // Изв. вузов. ТТП. – 1966. – № 2. – С.33 – 40.
29. Яковлев В. В. Исследование оптического метода определения степени параллелизации волокон // Изв. вузов. ТТП. – 1967. – № 1. – С. 56 – 64.
30. Шляхтенко П. Г. Оптический метод измерения коэффициента распрямленности волокон в волокнистых лентах/П. Г. Шляхтенко, Н. Н. Труевцев, Ю. Н. Ветрова // Изв. вузов. ТТП. – 1987. – № 4. – С. 9 – 10.

31. Исследование угловых диаграмм светорассеяния плоских волоконсодержащих материалов / П. Г. Шляхтенко [и др.]. – Л., 1987. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 24.06.87.
32. Дифракционный метод контроля углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала/ П. Г. Шляхтенко [и др.] // Оптический журнал. - 2012. – Т. 79, № 9. – С. 96 – 100.
33. Патент 2131605 РФ, МПК G01N33/36. Бесконтактный способ анализа структуры ткани/ Лустгартен Н. В., Сокова Г. Г., Сергеев А. С. - № 98108331/12; заявл. 29.04.98; опубл. 10.06.99, Бюл. № 16.
34. Измерение структурных характеристик текстильных материалов с применением информационных технологий: методические указания/ сост. М. А. Сташева. - Иваново, 2008. – 24 с.
35. Станийчук А. В. Установка и метод изучения структурных параметров трикотажа/ А. В. Станийчук, А. М. Медведев // Вестник Амурского государственного университета. – 2013. - № 61. - С. 88 - 94.
36. Automatic Inspection of Woven Fabric Density of Solid Colour Fabric Density by the Hough Transform/ R. Pan [et al.] // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2010. -Vol.18, №4(81). – P. 46 – 51.
37. Дегтярева А. Преобразование Хафа (Hough transform)/ А. Дегтярева, В. Вежневек // Компьютерная графика и мультимедиа: сетевой журнал. – 2003. - № 1(2). URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/36> (дата обращения: 07.06.15).
38. Patent 5210594 US. Process And Device For Measuring The Twist Of A Textile Yarn/ Durand B. - № 07/768,933; заявл. 05.02.91; опубл. 11.05.93.
39. Шляхтенко П. Г. Исследование дифракции монохроматического света на текстильных материалах. Ч. 1 // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1, Естественные и технические науки. - 2010. - № 4. - С. 16 – 27.
40. Бутиков Е. И. Оптика: учебное пособие. - СПб.: БХВ-Петербург: Невский Диалект, 2003. - 479 с.

41. Борн М. Основы оптики. - М.: Наука, 1973. - 720 с.
42. Гудмен Дж. У. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
43. Парамонов А. В. Экспресс-метод определения крутки пряжи / А. В. Парамонов, Т. А. Корнюхина // Текст. пром-сть. – 1978.– № 3. – С. 72 – 74.
44. Сухарев М. И. Оптический анализ структуры ткани / М. И. Сухарев, Л. И. Радзивильчук и др. // Изв. вузов. ТТП. – 1978. – № 5. – С. 12 – 16.
45. Радзивильчук Л. И. Применение дифракционного метода для контроля перекося уточных нитей / Л. И. Радзивильчук, Н. Г. Дружинина // Изв. вузов. ТТП. – 1990. – № 2. – С. 9 - 12.
46. Иванова С. Ю. Метод лазерного просвечивания для исследования плотности ворсовых покрытий/ С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев // Изв. вузов. ТТП. – 1987. – № 2. – С. 40 – 42.
47. Иванова С. Ю. Оптические методы контроля плотности ворса электрофлорированных материалов // Разработка и создание нового ассортимента нетканых текстильных материалов бытового и технического назначения: межвуз. сб. науч. трудов. – Л.: ЛИТЛП, 1989. – С. 72 – 78.
48. 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: сборник докладов всероссийской НТК. – Димитровград, 2012. – С. 4 - 7.
49. Шляхтенко П. Г. Исследование дифракции монохроматического света на текстильных материалах. Ч. 2 // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1, Естественные и технические науки. - 2011. - № 1. - С. 39 – 56.
50. Шляхтенко П. Г. Исследование дифракции монохроматического света на текстильных материалах. Ч. 3 // Вестник Санкт-Петербургского

- государственного университета технологии и дизайна. Серия 1, Естественные и технические науки. - 2011. - № 2. - С. 33 – 46.
51. Исследование связи между коэффициентом поверхностного заполнения тканого полотна и параметрами Фраунгоферовой дифракционной картины от He-Ne лазера / П. Г. Шляхтенко [и др.] // Изв. вузов. ТТП. – 1998. – № 4. – С. 45 – 49.
52. Шляхтенко П. Г. Дифракционный метод контроля геометрических параметров спиральной нити // Оптика и спектроскопия. – 2000. – Т. 88, № 1. – С. 116 – 121.
53. Шляхтенко П. Г. Исследование фраунгоферовой дифракции монохроматического света на спиральной нити // Изв. вузов ТТП. – 2000. – № 3. – С. 13 – 18.
54. Шляхтенко П. Г. Исследование Фраунгоферовой дифракции монохроматического света на крученой нити // Оптика и спектроскопия. – 1999. – Т. 86, № 5. – С. 815 – 819.
55. Патент 2138588 РФ, МПК D01N13/32, G01N21/00. Способ контроля физических параметров движущейся нити/ Шляхтенко П. Г., Мещерякова Г. П., Труевцев Н. Н., Лучинкина В. В. - № 96111136/12; заявл. 03.06.1996; опубл. 27.09.1999, Бюл. № 27.
56. Сухарев П. А. Зависимость вида дифракционных картин, рассчитанных по изображениям крученой нити, от направления ее крутки / П. А. Сухарев, П. Г. Шляхтенко // Известия вузов. ТЛП. – 2013. - №2(20). – С. 97 – 98.
57. Патент 2047169 РФ, МКИ 6 G 01 N 21/00, D 01 N 13/00. Оптический способ контроля крутки нитей / Челышев А. М., Шляхтенко П. Г., Ветрова Ю. Н., Струева Л. В. - № 93006606/12; заявл. 03.02.93; опубл. 27.10.95, Бюл. № 30.
58. Ветрова Ю. Н. Оптический метод контроля крутки нитей / Ю. Н. Ветрова, П. Г. Шляхтенко, А. М. Челышев // Текст. пром-сть. – 1995. – № 3. – С. 31 – 33.

59. Vetrova Y. N. An Optical Method for Determining Thread Twist / Y. N. Vetrova, P. G. Shlyakhtenko, M. S. Bradshaw // Journal of Federation of Asian Professional Textile Associations. – 1995. – Vol. 3, № 1. – P. 57 – 59.
60. Бельцов В. М. Оборудование текстильных отделочных предприятий: учебник. – СПб.: СПГУТД, 2001. – 568 с.
61. Шляхтенко П. Г. Использование дифракционного метода для контроля геометрических параметров структуры трикотажного полотна / П. Г. Шляхтенко, Н. Н. Труевцев // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 5. – С. 76 – 79.
62. Шляхтенко П. Г. Контроль параметров геометрической структуры трикотажного полотна дифракционным методом / П. Г. Шляхтенко, В. А. Агапов // Изв. вузов. ТТП. – 2003. - № 5. – С. 15 – 18.
63. Шляхтенко П. Г. Особенности дифракционного контроля геометрических параметров чулочного трикотажа // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 11. – С. 89 – 93.
64. Shlyakhtenko P. G. Features of the diffraction monitoring of the geometrical parameters of knitted hosiery fabric // J. Opt. Technol. - 2004. - № 71. – P. 795 – 798.
65. Патент 2164679 РФ, МПК 7 G 01 N 21/89. Способ контроля структурных геометрических параметров тканых материалов / Шляхтенко П. Г., Труевцев Н. Н. - № 99114066/28; заявл. 25.06.99; опубл. 20.04.01, Бюл. № 11.
66. Шляхтенко П. Г. Дифракционный метод контроля геометрической структуры ткани по ее изображению / П. Г. Шляхтенко, Н. Н. Труевцев // Изв. вузов. ТТП. – 2003. – № 4. – С. 19 – 24.
67. Шляхтенко П. Г. Дифракционный метод контроля геометрических параметров текстильных материалов по их дифракционным изображениям / П. Г. Шляхтенко, Н. Н. Труевцев // Тр. МНК по совместному проектированию SfP-973658 (НАТО) 30 июня – 1 июля 2004. – С. 43 – 48.

68. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: пер. с англ. - М: Радио и связь, 1985. - 248 с.
69. Шляхтенко П. Г. Компьютерный анализ моделей оптических изображений полотняных переплетений / П. Г. Шляхтенко, В. П. Нефедов, С. Н. Шкуропат // Оптический журнал. - 2007. - Т.4, №7. - С. 47 – 50.
70. Shlyakhtenko P. G. Computer analysis of models of optical images of plain weaves / P. G. Shlyakhtenko, S. N. Shkuropat, V. P. Nefedov // J. Opt. Technol. -2007. - № 74. - P. 476 – 478.
71. Метод снижения влияния спеклов при обработке дифракционных картин от движущихся тканых материалов / П. Г. Шляхтенко [и др.] // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79, № 1. – С. 83 – 85.
72. Patent 7493245 B2 US. Method And Apparatus For Similating Image Of Twisted Yarn / Suzuki N. – № 10/537,302; заявл. 02.12.03; опубл. 17.02.09.
73. Шляхтенко П. Г. Математическая модель профиля нити/ П. Г. Шляхтенко, Г. П. Мещерякова // Текст. пром-сть. – 1997. – № 1. – С. 47 – 49.
74. Колисниченко Д. Н. GIMP 2. Бесплатный аналог Photoshop для Windows/Linux/Mac OS. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 356 с.
75. Пименов В.И. Статистические методы и средства исследований: Учебное пособие. – СПб.: СПГУТД, 2005. – 102 с.
76. Безаппаратный метод дифракционного контроля параметров текстильных материалов по компьютерным изображениям их поверхности / П. А. Сухарев, П. Г. Шляхтенко, А. Е. Рудин, О. В. Кофнов // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. - №1. – С. 23 – 25.
77. Шляхтенко П. Г. Использование двумерного дискретного преобразования Фурье для компьютерного анализа материала с повторяющейся структурой / П. Г. Шляхтенко, В. И. Пименов, О. В.

- Кофнов //Автоматизация и современные технологии. – 2013. - №7. – С. 20 - 27.
78. Кофнов О. В. Безаппаратный метод автоматического определения направления крутки нити по её компьютерному микроизображению / О. В. Кофнов, П. А. Сухарев, П. Г. Шляхтенко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. - №2. - С. 79 – 81.
79. Кофнов О. В. Измерение угла кручения нити по её компьютерному изображению / О. В. Кофнов, П. Г. Шляхтенко //Химические волокна. – 2013. - №5. – С. 57 – 61.
80. Kofnov O. Measuring the Angle of Twist of a Fiber on the Basis of its Computer Image / O. Kofnov, P. Shlyakhtenko // Fibre Chemistry. – 2014. - January (Vol. 45, Issue 5). - P. 317 – 321.
81. Шляхтенко П. Г. Метод определения перекоса уточной нити в ткани / П. Г. Шляхтенко, О. В. Кофнов, П. А. Сухарев // Оптический журнал. – 2014. – Т. 82, №2. – С. 76 – 79.
82. Shlyakhtenko P. G. Method of determining the skewness of the weft thread in fabric / P. G. Shlyakhtenko, O. V. Kofnov, P. A. Sukharev //Journal of Optical Technology. – 2014. - Vol. 81, Issue 2. - P. 111 – 113.
83. Кофнов О. В. Использование двойного Фурье-преобразования для контроля параметров геометрической структуры текстильных материалов / О. В. Кофнов, П. Г. Шляхтенко, А. Е. Рудин // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2013. - №3. – С. 23 – 26.
84. Shlyakhtenko P. Double Two-Dimensional Discrete Fast Fourier Transform for Determining of Geometrical Parameters of Fibers and Textiles / P. Shlyakhtenko, O. Kofnov //Fibers. - 2013. - № 1. - P. 36 - 46.
85. Kofnov O. V. Analysis of Computed Diffraction Pattern Diagram for Measuring Yarn Twist Angle / O. V. Kofnov, P. G. Shlyakhtenko // Textiles and Light Industrial Science and Technology. – 2014. - № 3(1). - P. 1 - 5. - DOI: 10.14355/tlist.2014.0301.01.

86. Кофнов О. В. Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов. //Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 5(42). – с. 90-111.
87. Кофнов О. В. Моделирование процесса контроля периодических структур с применением автоматизированных систем. //Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение, т.58, №10, 2015. – с. 855-858.
88. Кофнов О. В. Система компьютерного моделирования дифракции для измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов. //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2014. - № 2. – С. 38 – 45.
89. Кофнов О. В. Способ двойного Фурье-преобразования в задачах контроля структуры текстильных материалов //Инновации молодежной науки: тез. докл. Всерос. науч. конф. молодых ученых. – СПб.: СПГУТД, 2014. – С. 229.
90. Кофнов О. В. Автоматический анализ периодических структур материалов на основе расчетных моделей дифракционных картин. / О. В. Кофнов, В. И. Пименов //Актуальные вопросы и перспективы развития математических и естественных наук. Сб. научн. трудов по итогам международной научн.-практической конференции. Выпуск 2. Омск, 2015. – с. 90-92.
91. Патент 2508537 РФ, МПК G 01 N 21/898, G 01 N 33/36. Способ измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов / Шляхтенко П. Г., Кофнов О. В., Рудин А. Е. - № 2012125084/28; заявл. 15.06.2012; опубл. 27. 02.2014, Бюл. № 6.
92. Патент 2534720 РФ, МПК G 01 N 21/898, G 01 B 11/26. Способ определения угла крутки нити / Шляхтенко П. Г., Кофнов О. В. - № 2013119356/28; заявл. 25.04.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 30.
93. Шляхтенко П. Г. Программа предварительной обработки изображения материала для дальнейшего исследования его периодической структуры

- безаппаратным методом / П. Г. Шляхтенко, О. В. Кофнов, В. П. Нефедов // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных схем. - Рег. номер 2012614450 (18.05.2012); RU ОБПБТ № 3(80). – М.: ФИПС, 2012. - № 3(80) (II ч.). – С. 324 – 325.
94. Шляхтенко П. Г. Программа Фурье обработки микроизображений поверхности текстильных материалов для определения значений периодических параметров исследуемой структуры / П. Г. Шляхтенко, О. В. Кофнов, В. П. Нефедов// Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных схем. - Рег. номер 2012618350 (14.09.2012); RU ОБПБТ № 4(81). – М.: ФИПС, 2012. - № 4 (81) (II ч.). - С. 567.
95. Кофнов О. В. Программа для определения направления крутки нити по дифракционной картине/ О. В. Кофнов, П. Г. Шляхтенко // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных схем. - Рег. номер 2013610621 (09.01.2013); RU ОБПБТ № 5(82). – М.: ФИПС, 2013. - № 5 (82)(III ч.). - С. 810.
96. Кофнов О. В. Программа для измерения угла крутки нити по её компьютерному изображению // О. В. Кофнов, П. Г. Шляхтенко // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных схем. - Рег. номер 2013614141 (24.04.2013); RU БПБТ № 2 (84). – М.: ФИПС, 2013. - № 2 (84)(II ч.). - С. 457.

Приложение А Копии патентов на изобретения и свидетельств о регистрации программ для ЭВМ

1835 U3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2508537

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ТЕКСТИЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012125084
Приоритет изобретения **15 июня 2012 г.**
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 февраля 2014 г.**
Срок действия патента истекает **15 июня 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности
Б.П. Симонов



Автор(ы): *Шляхтенко Павел Григорьевич (RU), Кофнов Олег Владимирович (RU), Рудин Александр Евгеньевич (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2534720

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА КРУТКИ НИТИ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна" (СПГУТД) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013119356

Приоритет изобретения **25 апреля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **06 октября 2014 г.**

Срок действия патента истекает **25 апреля 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий



Автор(ы): *Шляхтенко Павел Григорьевич (RU), Кофнов Олег Владимирович (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

327 201

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012614450

Программа предварительной обработки изображения
материала для дальнейшего исследования его периодической
структуры безаппаратным методом

Правообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Санкт-Петербургский государственный
университет технологии и дизайна» (RU)*

Автор(ы): *Шляхтенко Павел Григорьевич, Кофнов Олег
Владимирович, Нефедов Валерий Петрович (RU)*

Заявка № 2012612465

Дата поступления 3 апреля 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
18 мая 2012 г.

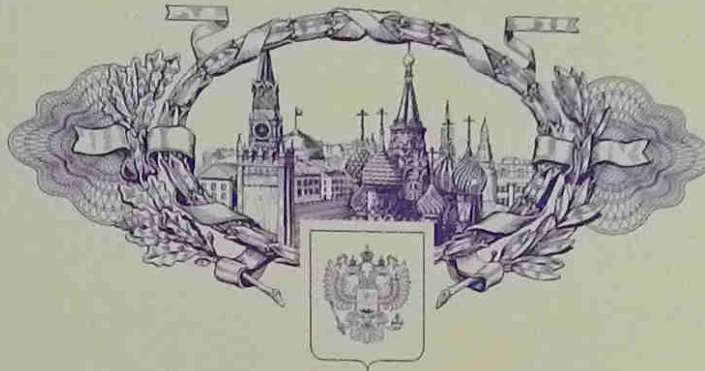
Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

351 3105



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012618350

**Программа Фурье обработки микроизображений поверхности
текстильных материалов для определения значений
периодических параметров исследуемой структуры**

Правообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Санкт-Петербургский государственный
университет технологии и дизайна» (RU)**

Автор(ы): **Шляхтенко Павел Григорьевич, Кофнов Олег
Владимирович, Нефедов Валерий Петрович (RU)**

Заявка № **2012616027**

Дата поступления **17 июля 2012 г.**

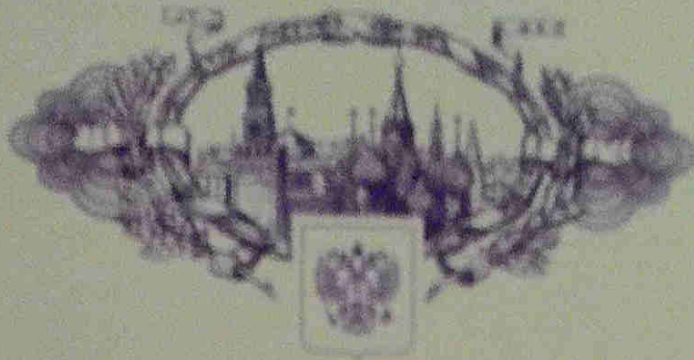
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
14 сентября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.Л. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013610621

Программа для определения направления
крутки нити по дифракционной картине

Правообладатель(ы) *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна» (RU)*

Автор(ы) *Кочнов Олег Владимирович,
Шляхтенко Павел Григорьевич (RU)*

Заявка № 2012619836

Дата поступления 14 ноября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
9 января 2013 г.

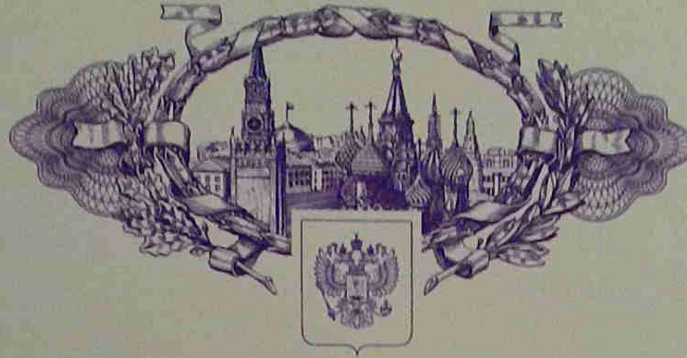


Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

В.И. Сидоров

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

34475



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013614141

Программа для измерения угла крутки нити
по ее компьютерному изображению

Правообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна" (RU)*

Автор(ы): *Кофнов Олег Владимирович (RU),
Шляхтенко Павел Григорьевич (RU)*

Заявка № 2013612000

Дата поступления 11 марта 2013 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

24 апреля 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.Н. Симонов

