

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)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт–Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (СПбГУПТД).

Научный руководитель:

**Пименов Виктор Игоревич,**

доктор технических наук, доцент,  
зав. кафедрой информационных технологий  
Санкт-Петербургского государственного  
университета промышленных технологий и  
дизайна

Официальные оппоненты:

**Лебедев Евгений Леонидович,**

доктор технических наук, доцент,  
нач. кафедры Военно-космической академии им.  
А.Ф. Можайского

**Кульчицкий Александр  
Александрович,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры автоматизации технологических  
процессов и производств Национального  
минерально-сырьевого университета «Горный»

Ведущее предприятие:

Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический  
университет)

Защита состоится 24 марта 2016 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.199.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: г. Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте диссертационного совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук, <http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/info-kofnov-2/>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.199.01

кандидат технических наук, доцент



Р.Р. Фаткиева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 перекоса 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; преимуществом 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена ее цель и сформулированы задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы.

**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 ГОСТах (ГОСТ 8846-87, ГОСТ 3812-72, ГОСТ 6611.3-2003, ГОСТ 14067-91) и стандарта ИСО 2061:1995. Указаны основные недостатки этих методов и обрисованы в общих чертах преимущества оптических (дифракционных) методов.

Проанализированы современные методы определения геометрических параметров структуры текстильных материалов и дана классификация этих методов. Наиболее перспективными являются оптические дифракционные методы как неразрушающие исследуемый материал. 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.

Дифракционная картина, необходимая для определения параметров структуры, может быть получена не только на экране при освещении образца материала пучком монохроматического света, но и смоделирована с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа по исходному микроизображению материала. По рассчитанной таким образом амплитуде светового сигнала  $U$  определяется интенсивность света  $I$  в каждой точке дифракционной картины.

Глава завершается формальной постановкой задачи определения геометрических параметров материала с периодической структурой. Она сводится к решению общей задачи моделирования дифракционной картины, получаемой при освещении периодической структуры исследуемого материала лучом монохроматического света, и решению на её основе двух частных задач определения угловых и линейных геометрических параметров структуры.

**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 микроструктурах.

Проанализированы дифракционные картины, полученные при освещении различных периодических структур материалов. Выявлены основные закономерности в расположении дифракционных максимумов, с помощью которых можно измерить истинные величины геометрических параметров.

Дифракционная картина крученой нити получена при её освещении пучком монохроматического света. В этом случае свет дифрагирует на витках нити, наклоненных под углом кручения  $\beta$  к её оси (рис. 1).

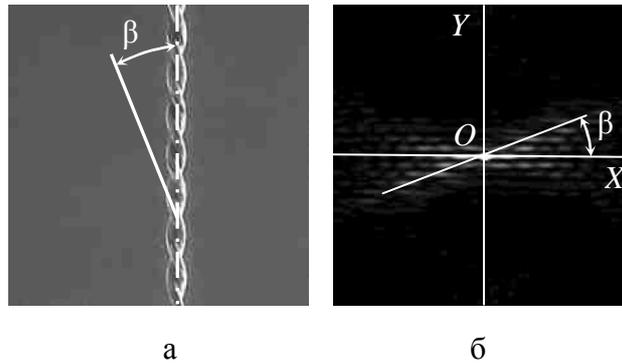


Рисунок 1 – Изображения крученой нити (а) и её дифракционной картины (б)

Через центры дифракционных максимумов можно провести наклонную прямую, образующую угол с горизонтальной осью  $OX$ , равный углу наклона витков  $\beta$  (углу кручения нити).

В дифракционной картине для структуры ткани расстояния между дифракционными максимумами обратно пропорциональны расстояниям между соседними нитями утка и основы соответственно, а угол перекоса расположения максимумов равен углу точного перекоса.

Аналитическая модель обработки изображений структур материалов для оценивания их геометрических параметров реализуется следующим образом. По цифровой фотографии структуры материала строится модель изображения дифракционной картины:

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

где  $I_0(\xi, \eta)$  – 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. Интенсивность света в каждой точке такого изображения рассчитывается с помощью интеграла Френеля-Кирхгофа. По взаимному расположению дифракционных максимумов можно судить о структуре исследуемого материала.

Для расчета угловых геометрических параметров анализируется распределение светового потока в модели дифракционной картины с помощью диаграммы, построенной в полярных координатах:

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

где  $\Phi$  – световой поток в угловом секторе изображения дифракционной картины шириной  $\alpha$ , ограниченном concentрическими окружностями с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , центры которых совпадают с центром изображения;  $\varphi$  – азимут сектора.

К угловым геометрическим параметрам, в частности, относятся угол кручения текстильной нити и величина перекоса нитей в тканях. Величина угла кручения текстильной нити:

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

где  $\beta^*$  – искомый угол кручения, равный угловой координате максимума светового потока  $\Phi$ .

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

$$\{\varphi_1^*, \varphi_2^*\} = \left\{ \varphi_{1,2}^* \mid \varphi^* \in \underset{\varphi \in [0, 2\pi]}{\text{Arg max}} \Phi(\varphi) \wedge \right. \\ \left. \wedge \forall (\varphi^* \notin \{\varphi_1^*, \varphi_2^*\}) (\Phi(\varphi^*) < \Phi(\varphi_2^*) < \Phi(\varphi_1^*)) \right\}.$$

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

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

В задаче расчета линейных геометрических параметров материала с периодической структурой определяются множества координат локальных максимумов интенсивности светового сигнала в изображении дифракционной картины, соответствующих дифракционным максимумам:

$$D_X = \left\{ x_i^* \mid x^* \in \underset{x \in [0, W]}{\text{Arg max}} I_y(x) \wedge x_i^* < x_{i+1}^* \right\}, \\ D_Y = \left\{ y_j^* \mid y^* \in \underset{y \in [0, H]}{\text{Arg max}} I_x(y) \wedge y_j^* < y_{j+1}^* \right\},$$

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:

$$\bar{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^{P-1} (x_{i+1}^* - x_i^*)}{P-1}, \\ \bar{\Delta y} = \frac{\sum_{j=1}^{Q-1} (y_{j+1}^* - y_j^*)}{Q-1},$$

где  $x_i^* \in D_X$ ,  $P = |D_X|$ ;  $y_j^* \in D_Y$ ,  $Q = |D_Y|$ .

Для обработки цифровых изображений структур материалов предложена система, состоящая из цифровой фотокамеры, установленной на микроскопе, и компьютерной программы, осуществляющей моделирование изображения дифракционной картины сфотографированной структуры материала с целью определения на основе её анализа величин угловых и линейных геометрических параметров.

**В третьей главе** изложены алгоритмы реализации аналитической модели изображения дифракционной картины и измерения угловых и линейных геометрических параметров материалов с периодической структурой. Предложены алгоритмы обработки получаемых дифракционных картин на основе анализа диаграммы распределения интенсивности пикселей компьютерного изображения. Изложен разработанный алгоритм двойного Фурье-преобразования и указаны его преимущества перед обычным дифракционным методом.

Для двумерного дискретного поля, каковым является цифровое изображение, интеграл Френеля-Кирхгофа может быть записан в виде конечной суммы:

$$U_{k,l} = C \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi p\xi}{\lambda}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi q\eta}{\lambda}\right] u(\xi, \eta) \Delta^2 =$$

$$= C \Delta^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi kn\Delta^2}{\lambda L}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} u_{n,m} \exp\left[-\frac{2i\pi lm\Delta^2}{\lambda L}\right],$$

где  $U(x, y)$  – амплитуда светового сигнала во френгоферовой дифракционной картине;  $C$  – константа;  $\lambda$  – длина плоской монохроматической волны, освещающей объект;  $p$  и  $q$  – относительные координаты ( $p = x/L$  и  $q = y/L$ );  $L$  – расстояние от объекта до экрана ( $L \gg x, y$ );  $\xi$  и  $\eta$  – 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  $m$ ;  $\Delta$  – расстояние между соседними пикселями в компьютерном изображении.

Это выражение аналогично выражению для двумерного дискретного преобразования Фурье. Следовательно, для расчета интенсивности можно применить алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье. Ограничением алгоритма является необходимость использовать изображения с размерами  $2^t$ , где  $t$  – целое положительное число. В результате расчета получается цифровое изображение дифракционной картины такого же размера, как и исходное изображение. Интенсивность каждой точки (пикселя) результирующего изображения:

$$I_{k,l} = U_{k,l} U_{k,l}^*,$$

где  $k, l$  – индексы пикселя в результирующем изображении по горизонтали и вертикали.

Перед расчетом изображения дифракционной картины необходимо выполнить имитацию освещения исходного изображения структуры исследуемого материала лучом лазера, интенсивность света внутри которого убывает по экспоненциальному закону. Это необходимо для исключения резкой границы между светом и тенью в исходном изображении. Схема имитации светового пятна, образующегося при освещении структуры материала лучом лазера, приведена на рисунке 2.

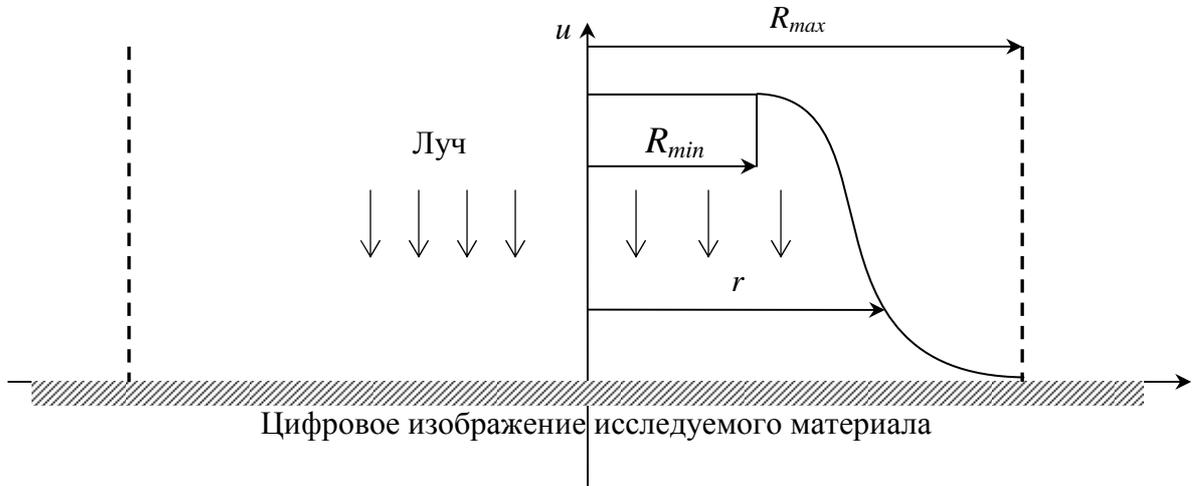


Рисунок 2 – Схема имитации светового пятна

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

$$u(\xi, \eta) = u_0(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{\sigma(R_{\min} - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2}{R_{\max}^2}\right],$$

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

При  $\xi^2 + \eta^2 > R_{max}^2$

$$u(\xi, \eta) = 0.$$

При  $\xi^2 + \eta^2 < R_{min}^2$  амплитуда постоянна и равна  $u_0$ .

Таким образом, алгоритм моделирования дифракционной картины может быть описан следующими шагами (**Алгоритм 1**).

**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, имитирующее освещение структуры материала монохромным лучом лазера. Экспоненциальное распределение интенсивности света в лазерном луче предотвращает образование дифракционных максимумов от границы изображения, искажающих дифракционную картину.

**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 быстрое преобразование Фурье и 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  $I$ , 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.

Анализируя асимметрию распределения интенсивности дифракционных максимумов в рассчитанном изображении можно не только определить направление крутки, но и величину угла кручения. Для этого используется специальный инструмент: диаграмма распределения интенсивностей (яркостей) пикселей компьютерного изображения дифракционной картины, построенная в полярных координатах (рис. 3).

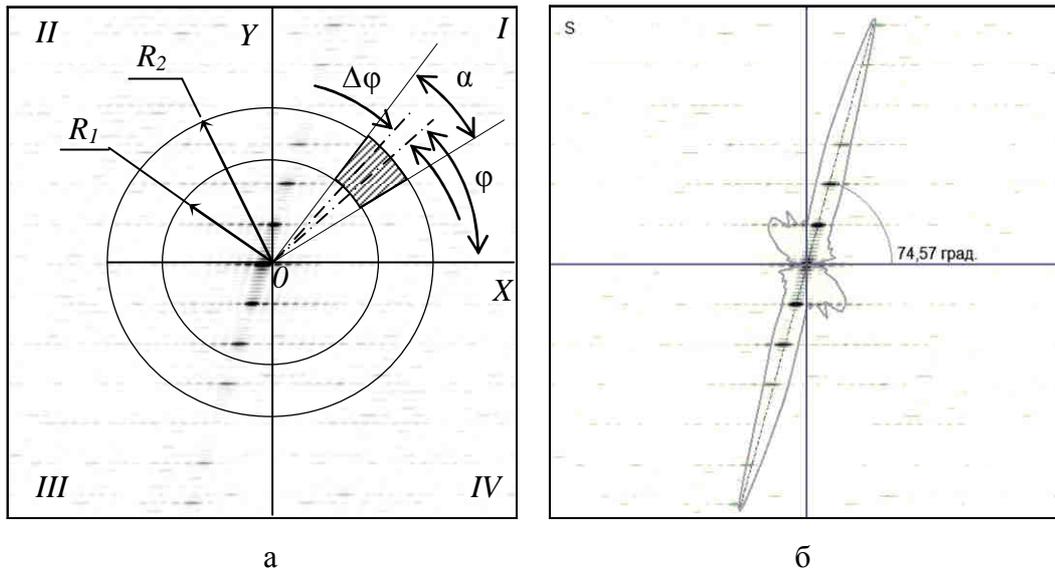


Рисунок 3 – Схема (а) и результат (б) построения диаграммы распределения интенсивностей для дифракционной картины крученой нити

На рассчитанной дифракционной картине строится кольцо с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . Внутри кольца выделяется сектор с угловым размером  $\alpha$ . Рассчитывается суммарная интенсивность пикселей внутри этого сектора. Затем сектор сдвигается на угол  $\Delta\varphi$  и расчёт повторяется. В результате получается зависимость в суммарной интенсивности в секторе от угла  $\varphi$ , которая изображается в виде замкнутой кривой в полярных координатах. Для крученой нити эта кривая будет иметь чётко выраженный максимум, указывающий направление, перпендикулярное виткам нити.

Таким образом, угол кручения нити можно определить по алгоритму построения и анализа угловой диаграммы распределения интенсивности дифракционных максимумов (Алгоритм 2).

**Шаг 2.1.** Цифровая фотография нити ориентируется так, чтобы ось нити располагалась строго вертикально (рисунок 1).

**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  $\varphi$  от оси  $OX$  строится сектор, ограниченный внутренней и наружной границами кольца и с угловым размером  $\alpha$ . Определяется суммарная интенсивность дифракционных максимумов внутри сектора. Это значение откладывается на диаграмме интенсивности как величина радиус-вектора для угла  $\varphi$ .

**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.

Аналогичная диаграмма используется для определения перекоса уточной нити по дифракционной картине ткани (рис. 4).

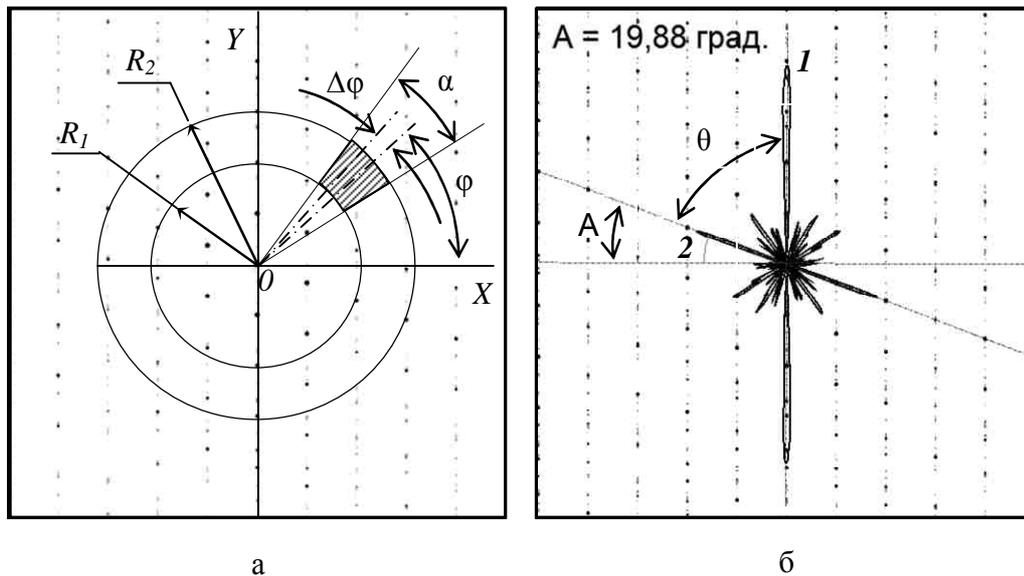


Рисунок 4 – Схема (а) и результат (б) построения диаграммы интенсивности для определения угла перекоса нитей в ткани

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  $I$  диаграммы и направлением на второй за ним по величине максимум  $2$  диаграммы соответствует углу между перекрещивающимися нитями в структуре образца.

С учетом вышесказанного, алгоритм определения величины перекоса между взаимно перпендикулярными нитями утка и основы ткани по её цифровому изображению (**Алгоритм 3**) 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  $I$  диаграммы на рисунке 4б).

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

**Шаг 3.5.** Угол между направлениями из начала отсчета на максимумы  $I$  и  $2$  определяется как разность между угловыми координатами этих максимумов на диаграмме. Разница между  $90^\circ$  и этим углом равна величине перекоса нитей в переплетении.

Периодические расстояния в материале, такие как расстояние между соседними основными или уточными нитями в тканях, расстояния между петельными рядами или столбиками и пр., могут быть измерены по расстояниям между соседними дифракционными максимумами. После расчёта дифракционной картины как двумерного дискретного поля интенсивностей (первое преобразование Фурье) расстояния между соседними максимумами будут обратно пропорциональны расстояниям между периодическими элементами в структуре материала. Если теперь использовать полученное цифровое изображение в качестве исходных данных для расчета новой дифракционной картины (второе преобразование Фурье), то в результате будет получено цифровое изображение, где расстояния между соседними дифракционными максимумами будут прямо пропорциональны искомым периодам в микроструктуре.

После первого преобразования:

$$\Delta_{x1} = \lambda L / (KT_x); \Delta_{y1} = \lambda L / (KT_y),$$

где  $\Delta_{x1}$  и  $\Delta_{y1}$  – средние расстояния между дифракционными максимумами вдоль осей  $X$  и  $Y$ ;  $T_x$  и  $T_y$  – расстояния между элементами в периодической структуре материала;  $\lambda$  и  $L$  – длина волны света и расстояние между объектом и экраном, используемые при расчёте дифракционной картины;  $K$  – постоянный коэффициент.

После второго преобразования:

$$\Delta_{x2} = \frac{\lambda L}{K(\lambda L / (KT_x))} = \frac{\lambda L}{K} \frac{KT_x}{\lambda L} = T_x; \Delta_{y2} = \frac{\lambda L}{K(\lambda L / (KT_y))} = \frac{\lambda L}{K} \frac{KT_y}{\lambda L} = T_y.$$

Таким образом, при использовании способа двойного Фурье-преобразования расстояния между дифракционными максимумами в точности равны расстояниям между периодическими элементами структуры материала в исходном цифровом изображении. Учитывая приведенные преобразования и основываясь на алгоритме 1 моделирования дифракционной картины, способ двойного Фурье-преобразования для определения линейных геометрических параметров структуры материала реализуется с помощью следующего алгоритма (**Алгоритм 4**).

**Шаг 4.1.** Подготовить цифровую фотографию структуры материала к применению для построения дифракционной картины быстрого преобразования Фурье (шаги 1.1-1.4 алгоритма 1).

**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:  $\bar{\Delta}_x$  и  $\bar{\Delta}_y$ .

**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 съёмки исследуемой структуры.

Описанные алгоритмы расчёта и анализа дифракционных картин положены в основу экспериментального образца системы бесконтактного определения геометрических параметров материалов с периодической структурой.

**В четвертой главе** описан экспериментальный образец программно-аппаратной системы определения параметров структуры материалов и примеры его использования. Приведены результаты тестирования экспериментального образца системы для различных типов материалов.

На рисунке 5 приведена общая схема процесса определения геометрических параметров материалов с периодической структурой с использованием разработанной экспериментального образца бесконтактной системы (ЭОБС).



Рисунок 5 – Схема определения геометрических параметров материалов с периодической структурой на основе ЭОБС

Программная часть ЭОБС представляет собой объектно-ориентированное приложение, состоящее из следующих классов.

*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. Интенсивности в каждой точке дифракционной картины рассчитываются на основании вычисленных комплексных амплитуд 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.

Алгоритм двойного Фурье-преобразования реализуется следующим образом. Смоделированное по изображению структуры материала изображение дифракционной картины служит исходным изображением для построения изображения вторичной дифракционной картины по тому же алгоритму. Для анализа периодов структуры по вторичной дифракционной картине можно использовать форму *FmSlicerXY*.

Определение величины угла кручения производилось для изображений математических моделей нитей, для моделей нитей, скрученных из проволоки и для нитей, выпускаемых промышленностью. На рисунке 6 приведены исходное микроизображение и результат работы программы для синей нити марки "bestex" из полиэстера 40 Текс Z X 2.

Определение перекоса уточных нитей с помощью экспериментального образца системы производилось как для математических моделей, так и для образца реальной ткани. На рисунке 7 приведено исходное изображение ткани с уточным перекосом и результаты работы программы по определению перекоса.

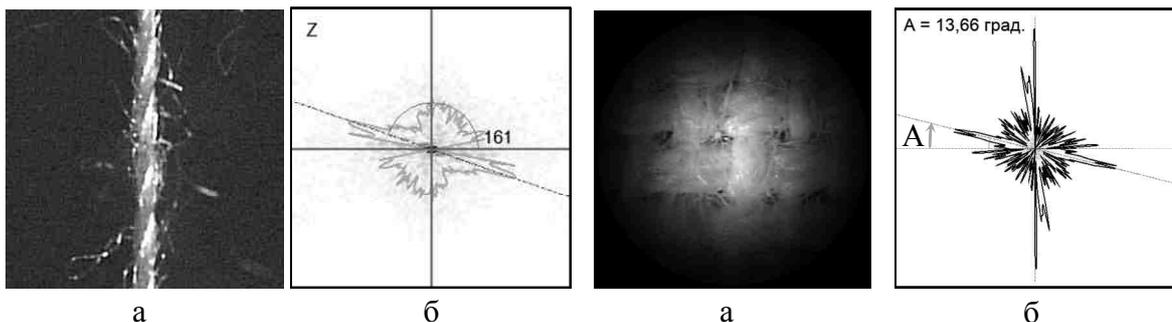


Рисунок 6 – Определение угла кручения:  
а) исходное изображение;  
б) результат расчёта угла кручения

Рисунок 7 – Расчет угла перекоса:  
а) исходное изображение;  
б) результат расчёта – диаграмма с вычисленным углом перекоса

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  $90^\circ$  считалось величиной перекоса нитей в ткани.

При двойном Фурье-преобразовании дифракционная картина, построенная по изображению материала, выступает в качестве исходного изображения для расчёта второй дифракционной картины. На рисунке 8 результат двойного Фурье-преобразования для ткани переплетения «тарган».

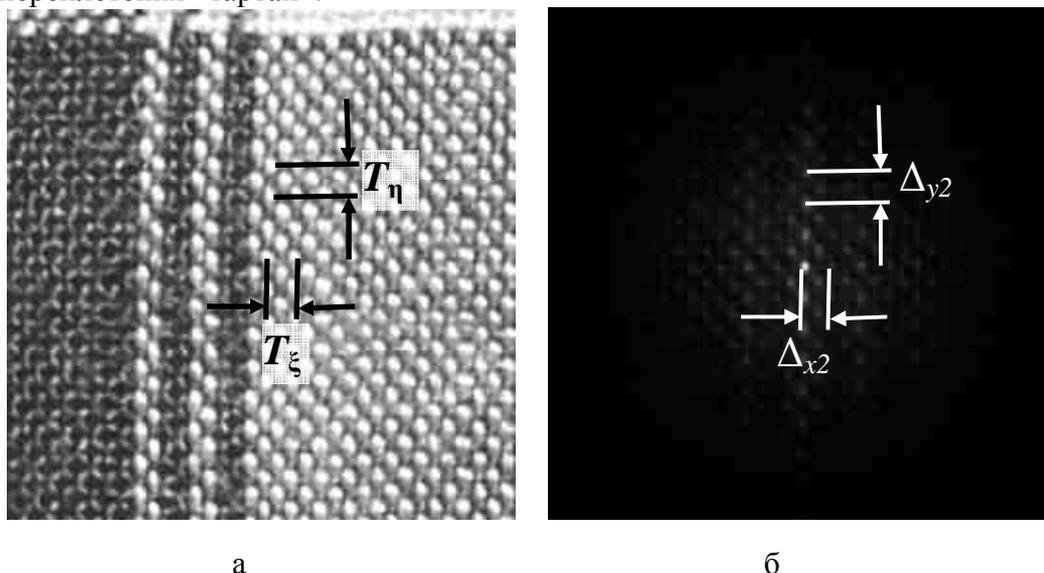


Рисунок 8 – Применение двойного Фурье-преобразования к изображению переплетения «тарган»: а) исходное изображение ткани; б) дифракционная картина после двух Фурье-преобразований

В завершение приведено сравнение точности измерений угла кручения нити по её дифракционной картине с использованием алгоритма построения диаграммы распределения интенсивностей в полярных координатах со способом непосредственного измерения угла под микроскопом. Измерения проводились для нитей, выпускаемых ОАО «Прядильно-ниточный комбинат им. С.М. Кирова» (г. Санкт-Петербург). Результаты сравнительных измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов определения величины угла кручения способом непосредственного измерения и по дифракционной картине

Тип нити	Условное обозначение	Угол кручения $\bar{\beta}$ , градусы		$\alpha_{\text{выч.}}$ для $t$ -статистики при $P_{\text{дов.}}=0,95$ ( $\alpha = 0,05$ )
		Непосредственное измерение	По дифракционной картине	
Хлопчатобумажные	10ХБ	34,05	35,01	0,109
Армированные (лавсан+лавсан)	35ЛЛ	23,34	22,99	0,473
	45ЛЛ	27,05	27,01	0,939
	70ЛЛ	34,55	34,70	0,788
Армированные (лавсан+хлопок)	44ЛХ	27,64	27,52	0,734
	65ЛХ	19,85	20,01	0,839
	100ЛХ	18,01	18,99	0,143

Проверялась гипотеза о статистической незначимости разницы в измерениях угла кручения способом непосредственного измерения угла кручения под микроскопом и вынесенным на защиту способом по дифракционной картине с использованием диаграммы распределения интенсивности. Показано, что на одинаковых выборках

измерений при одной и той же доверительной вероятности разница в измерениях угла кручения нити для способа, использующего выносимый на защиту алгоритм построения диаграммы распределения интенсивности в полярных координатах, и способа непосредственного измерения угла кручения является статистически незначимой, что говорит о высокой точности предлагаемого способа при его низкой трудоёмкости и дешевизне используемого оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования решена важная научно-практическая задача автоматической обработки цифровых изображений материалов с периодической структурой и определения величин их геометрических параметров, обеспечивающая за счет минимизации ручного труда снижение расходования изготавливаемого материала на проведение измерений и отказ от дорогостоящих оптико-электронных устройств; в том числе получены следующие основные научные 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.

**Полученные результаты** соответствуют областям исследования п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации,

управления, принятия решений и обработки информации» и п. 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки РФ**

1. Кофнов О.В. Моделирование процесса контроля периодических структур с применением автоматизированных систем // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение, т.58, №10, 2015. – с. 855-858.
2. Кофнов О.В. Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 5(42). – с. 90-111.
3. Шляхтенко П.Г., Кофнов О.В., Сухарев П.А. Метод определения перекоса уточной нити в ткани // Оптический журнал, Т.82, №2, 2014 – с. 76-79 (2012 JCR 0.311).
4. Shlyakhtenko, P G; Kofnov, O V; Sukharev, P A. Method of determining the skewness of the weft thread in fabric // Journal of Optical Technology, Vol. 81 Issue 2, pp.111-113 (2014).
5. O.V. Kofnov, P. G. Shlyakhtenko. Measuring the Angle of Twist of a Fiber on the Basis of its Computer Image // Fibre Chemistry: Volume 45, Issue 5 (2014), Page 317-321.
6. Кофнов О.В., Шляхтенко П.Г. Измерение угла кручения нити по её компьютерному изображению // Химические волокна, №5, 2013 – с. 57-61 (2012 JCR 0.269).
7. Шляхтенко П.Г., Пименов В.И., Кофнов О.В. Использование двумерного дискретного преобразования Фурье для компьютерного анализа материала с повторяющейся структурой // Автоматизация и современные технологии, №7, 2013. – с. 20-27.
8. Кофнов О.В., Шляхтенко П.Г., Рудин А.Е. Использование двойного Фурье-преобразования для контроля параметров геометрической структуры текстильных материалов // Известия вузов. Технология легкой промышленности. №3, 2013 – с. 23-26.
9. Сухарев П.А., Шляхтенко П.Г., Рудин А.Е., Кофнов О.В. Безаппаратный метод дифракционного контроля параметров текстильных материалов по компьютерным изображениям их поверхности // Известия вузов. Технология легкой промышленности. №1, 2013 – с. 23-25.
10. Кофнов О.В., Сухарев П.А., Шляхтенко П.Г. Безаппаратный метод автоматического определения направления крутки нити по её компьютерному микроизображению // Известия вузов. Технология легкой промышленности. №2, 2013 – с. 79-81.

### **Статьи в прочих изданиях, научных сборниках, тезисы докладов**

11. Сухарев П. А., Шляхтенко П. Г., Рудин А. Е., Кофнов О. В. Безаппаратный метод компьютерного Фурье анализа изображений поверхности для контроля параметров текстильных материалов // Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике: сборник докладов всероссийской НТК. — Димитровград, 2012. — С. 4–7.
12. Oleg V. Kofnov, Pavel G. Shlyakhtenko. Analysis of Computed Diffraction Pattern Diagram for Measuring Yarn Twist Angle. Textiles and Light Industrial Science and Technology, 2014, 3(1), 1-5. doi: 10.14355/tlist.2014.0301.01.
13. Shlyakhtenko, P.; Kofnov, O. Double Two-Dimensional Discrete Fast Fourier Transform for Determining of Geometrical Parameters of Fibers and Textiles. Fibers 2013, 1, 36-46.
14. Кофнов О.В. Способ двойного Фурье-преобразования в задачах контроля структуры текстильных материалов // Инновации молодежной науки: тез. докл.

Всерос. науч. конф. молодых ученых / С.-Петербургск. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2014. – с. 229.

15. Кофнов О.В. Система компьютерного моделирования дифракции для измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. №2, 2014 – с. 38-45.
16. Кофнов О.В., Пименов В.И. Автоматический анализ периодических структур материалов на основе расчетных моделей дифракционных картин // 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.

#### **Патенты на изобретения**

1. 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.
2. 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.

#### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

1. Шляхтенко П.Г., Кофнов О.В., Нефедов В.П. Программа предварительной обработки изображения материала для дальнейшего исследования его периодической структуры безаппаратным методом. RU ОБПБТ № 3(80). Программы для ЭВМ. Рег. номер 2012614450 (18.05.2012)
2. Шляхтенко П.Г., Кофнов О.В., Нефедов В.П. Программа Фурье обработки микроизображений поверхности текстильных материалов для определения значений периодических параметров исследуемой структуры. RU ОБПБТ № 4(81). Программы для ЭВМ. Рег. номер 2012618350 (14.09.2012)
3. Кофнов О.В., Шляхтенко П.Г. Программа для определения направления крутки нити по дифракционной картине. RU ОБПБТ № 1(82). Программы для ЭВМ. Рег. номер 2013610621 (09.01.2013)
4. Кофнов О.В., Шляхтенко П.Г. Программа для измерения угла крутки нити по её компьютерному изображению. RU ОБПБТ № 2(83). Программы для ЭВМ. Рег. номер 2013614141 (24.04.2013)