

О.В. КОФНОВ

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУР ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кофнов О.В. Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов.

Аннотация. Рассмотрены методы бесконтактного определения величин угловых и линейных геометрических параметров в структурах текстильных материалов. Разработаны алгоритм моделирования изображений дифракционных картин с использованием быстрого преобразования Фурье, алгоритм измерения угла кручения нити по цифровой фотографии её структуры, алгоритм измерения перекоса нитей в ткани и алгоритм измерения расстояния между соседними элементами структуры с использованием метода двойного преобразования Фурье.

Ключевые слова: алгоритм, текстиль, структура материала, модель дифракционной картины, преобразование Фурье, крутка нити, угол кручения, перекокс, ткань.

Kofnov O.V. A Model and Algorithms for Measurement of Geometric Parameters in Textile Structures.

Abstract. Non-contact methods measuring angular and linear geometric parameters in textile structures are considered. The diffraction pattern modeling algorithm based on the fast Fourier transform, the algorithm counting the yarn twist angle, the algorithm counting the skewness of the weft thread in fabric and the Double Fourier transform algorithm of determining the period of a material structure are developed.

Keywords: algorithm, textile, structure, diffraction pattern modeling, Fourier transform, yarn twist, twist angle, skewness, fabric.

1. Введение. Одной из важных особенностей текстильных материалов является то, что они представляют собой упорядоченное переплетение объектов малого размера (волокон и нитей) [1]. В частности, в крученой нити витки волокон закручиваются в определённом направлении, а ткань представляет собой переплетение нитей в строгом порядке, называемом раппортом. Таким образом, можно сказать, что структура большинства текстильных материалов обладает периодичностью микроскопических элементов, из которых она состоит [2]. К геометрическим параметрам такой микроструктуры можно отнести: диаметр текстильной нити; величину крутки нити (угол кручения); плотность ткани по основе и утку; петельный шаг и высоту петельного ряда трикотажного изделия; поверхностную плотность ткани/трикотажа; размер сквозных пор. От этих параметров в значительной степени зависят физические и технологические характеристики текстильных изделий: прочность, поверхностная плотность, воздухо- и водопроницаемость, износостойкость, а также внешний вид и потребительские свойства. Поэтому актуальной является задача измерения величин этих параметров как на стадии

контроля качества готового изделия, так и на более ранних стадиях производства.

ГОСТ 8846-87, 3812-72, 6611.3-2003 и ISO 2061:2010-12 определяют набор методов, применяемых в настоящее время для контроля геометрических параметров структуры текстильных материалов. Однако все эти методы либо требуют разрушения исследуемого образца, либо применения ручного труда (непосредственный подсчет элементов структуры лаборантом с использованием лупы или микроскопа). Таким образом, актуальной является задача разработки бесконтактных способов измерения и контроля количества и размеров повторяющихся элементов структур текстильных материалов.

К настоящему времени были разработаны методы и устройства оптического контроля качества производимых текстильных изделий, например, [3]. Следует отметить, что подобные приборы имеют высокую стоимость и сложны в эксплуатации. В [2] обосновываются преимущества одного из подклассов оптических методов контроля: дифракционного метода. Он заключается в получении дифракционной картины при освещении исследуемого образца текстильного материала лучом монохромного света. В частности, на практике подобный метод был реализован в [4]. Установка состоит из источника когерентного света, освещающего исследуемую нить, системы линз и зеркал, а также оптических датчиков, регистрирующих интенсивность света в результирующей дифракционной картине, имеющей вытянутую форму с ярко выраженными большой и малой осями. Угол кручения нити определяется как угол между большой осью, перпендикулярной продольной направляющей витков, и прямой, перпендикулярной оси нити.

Несомненным преимуществом дифракционного метода является то, что световые волны, отраженные от периодических элементов структуры, размеры которых сопоставимы с длиной волны используемого когерентного света, взаимодействуют между собой, что даёт в результирующей дифракционной картине упорядоченные ряды максимумов интенсивности. По взаимному расположению этих дифракционных максимумов можно определить истинные размеры и форму элементов исследуемой микроструктуры. К недостаткам следует отнести необходимость освещения образца источником когерентного света (лазер) и необходимость проецировать дифракционную картину на удалённый экран, что повышает громоздкость установки. Собственно, подобные недостатки присущи

всем аппаратным методам, физически моделирующим требуемый процесс.

Современное развитие вычислительной техники позволяет во многих случаях перейти к математическому моделированию физических процессов. Образец материала в таком случае можно заменить его компьютерным изображением (цифровой фотографией, сделанной с требуемым увеличением). Разработаны методы анализа подобных изображений тканей с помощью фильтров, основанных на быстром преобразовании Фурье [5], на преобразовании Хафа [6] и на сопоставлении изображений, сделанных с разных ракурсов [7]. В данной работе предлагается непосредственное математическое моделирование самого процесса дифракции. Это позволит применять уже апробированные аппаратные дифракционные методы [2] без необходимости физического воспроизведения дифракционной картины с помощью лазера и использовать предлагаемый способ анализа изображений не только для тканей, но и для всех видов текстильных материалов с периодической микроструктурой.

2. Постановка задачи. Задача бесконтактного оптического контроля геометрических параметров материалов с периодической структурой формулируется следующим образом.

Дано: материал со структурой, состоящей из повторяющихся элементов (витки, петли, волокна, нити в переплетении), размеры и расстояния между которыми сопоставимы с длинами волн света в оптическом диапазоне. Уже существуют апробированные методы получения дифракционных картин при освещении таких материалов лучом когерентного света и последующего определения по распределению максимумов интенсивности в таких картинах геометрических параметров поверхностных структур таких материалов. Однако эти методы требуют использования соответствующих оптических установок, включающих источник когерентного света (лазер), удаленный экран для проецирования дифракционной картины, светочувствительные датчики, фиксирующие расположение дифракционных максимумов.

Требуется: разработать алгоритмы измерения величин геометрических параметров структур текстильных материалов, использующие математическую модель процесса дифракции, построенную с помощью компьютерной программы. Эта же программа осуществляет анализ смоделированной дифракционной картины с целью определения зависимостей в расположении дифракционных максимумов и расчет на их основе истинных величин геометрических параметров исходной микроструктуры. Входными

данными являются цифровая фотография структуры материала, сделанная с необходимым увеличением, и массив допустимых диапазонов контролируемых величин, определённых на основе требований к качеству и технологическому процессу производства материала. Выходные данные: выводимое пользователю на экран компьютера изображение дифракционной картины, значения автоматически рассчитанных величин геометрических параметров и отчет о соответствии этих величин заданным критериям качества, определённым введёнными контрольными диапазонами. Таким образом, конечный пользователь системы получает наглядную информацию о процессе контроля, структуре и качестве исследуемого материала.

Задача сводится к математическому моделированию физического процесса, положенного в основу уже известных способов контроля параметров текстильных материалов. Такое моделирование стало возможным благодаря появлению технологии цифровой фотографии, позволяющей получать изображение объекта в виде массива точек (пикселей), характеризующихся яркостью по каждому из цветовых каналов. Цифровое изображение образца представляет собой таблично заданную двумерную функцию распределения яркости, которая прямо пропорциональна интенсивности излучения единицы поверхности объекта. От момента наблюдения (съёмки объекта) и до получения результата точность контроля геометрических параметров структуры текстильных материалов зависит только от точности вычислений компьютера при математическом моделировании процесса контроля.

Рассматриваемая система, описывающая процесс контроля величин геометрических параметров структуры текстильных материалов, представляет собой целостный объект, состоящий из частей (являющихся в свою очередь подсистемами) и связей между ними [8]. На этапе проектирования технологический процесс контроля представлен схемой (рисунок 1).

Изображение, выступающее в качестве входных данных структуры контролируемого материала, предварительно преобразуется в массив данных, на основе которых осуществляется компьютерное моделирование изображения дифракционной картины. По взаимному расположению дифракционных максимумов рассчитываются искомые величины линейных и угловых геометрических параметров структуры материала, которые сравниваются с заданными в качестве входных данных контрольными значениями.

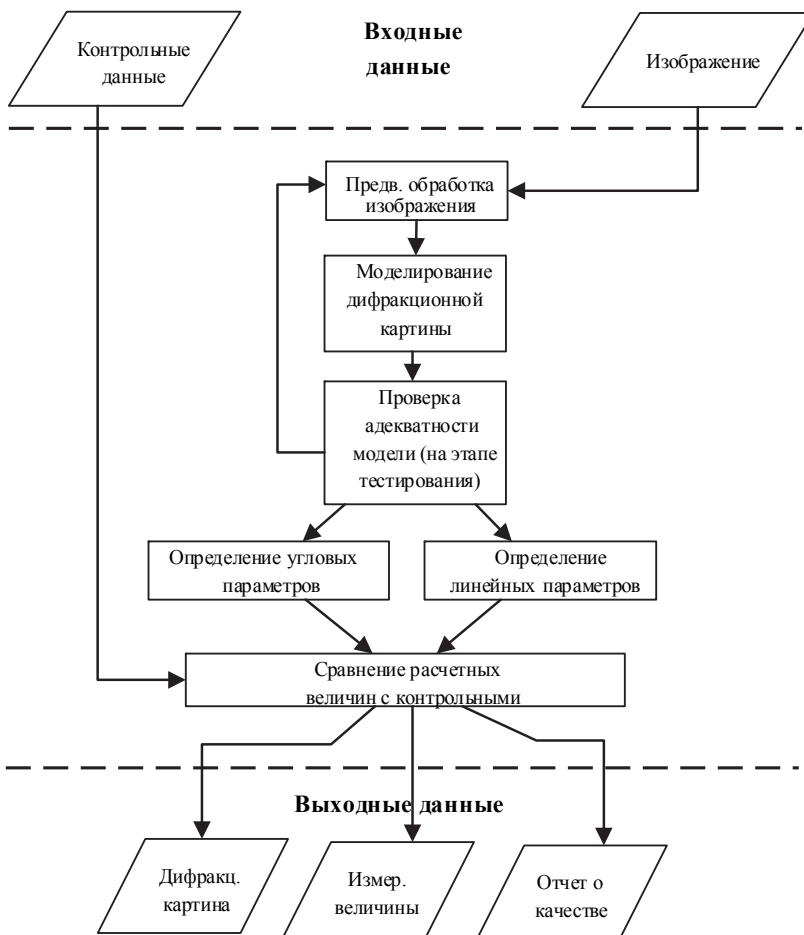


Рис. 1. Схема технологического процесса контроля геометрических параметров структуры материала

На этапе настройки системы (а такая настройка обязательно требуется, ибо результат всегда зависит от условий съемки, качественных характеристик материала и т.д.) предусмотрена отрицательная обратная связь между блоком проверки адекватности модели (который задействуется только на этапе тестирования) и блоком предварительной обработки изображения, необходимая для подбора таких параметров преобразования исходного изображения, при которых измерение искомым геометрических параметров структуры материала осуществляется с максимальной точностью. Использование отрицательной обратной связи

обеспечивает устойчивость процесса измерения, заключающуюся в минимальной погрешности при обработке изображений различных образцов материалов.

3. Математическое моделирование дифракции.

Компьютерное изображение исследуемого образца материала, полученное в результате цифровой фотосъемки, представляет собой функцию двух переменных:

$$I_0 = f(\xi, \eta), \quad (1)$$

где ξ и η – координаты точки в двумерной системе координат исходного изображения, I_0 – интенсивность светового сигнала, которая пропорциональна яркости точки. Здесь и в дальнейшем для модели процесса существенно только взаимное расположение точек на компьютерном изображении с максимальной по отношению к соседним точкам величиной интенсивности, поэтому абсолютная величина интенсивности светового сигнала в модели не учитывается.

Дифракцией света называют совокупность явлений, возникающих при огибании световой волной малых препятствий, сравнимых по размеру с длиной волны. Существуют аналитические решения задачи расчета дифракционной картины для образцов простых форм (одиночное отверстие, дифракционная решетка) [9] и численные решения для объектов сложных форм.

Известно, что дифракция Фраунгофера на микроструктурах позволяет реализовать подобную модель контроля. На удалённом экране после освещения периодического образца лучом монохроматического света отображаются ряды дифракционных максимумов. Таким образом, осуществляется такое преобразование функции интенсивности, которое эквивалентно построению модели дифракционной картины по информации об исходном изображении исследуемой структуры:

$$I = F(f(\xi, \eta), x, y), \quad (2)$$

где x и y – координаты точки модели в новой системе координат, связанной с дифракционной картиной; I – интенсивность сигнала в соответствующей точке модели дифракционной картины. Следует отметить, что масштаб систем координат (x, y) и (ξ, η) – разный.

В общем случае для моделирования дифракционной картины может быть использован интеграл Френеля-Кирхгофа [10]:

$$U(x, y) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(\xi, \eta) \exp[-i \frac{2\pi}{\lambda L} (x\xi + y\eta)] d\xi d\eta, \quad (3)$$

где U – амплитуда светового сигнала в точке с координатами (x,y) дифракционной картины; U_0 – амплитуда светового сигнала в точке изображения с координатами (ξ,η) ; λ – длина световой волны, м; L – расстояние от объекта до экрана, м ($L \gg x,y$); i – мнимая единица; C – некоторая константа, зависящая от положения источника света и точки наблюдения. Координаты (x,y) и (ξ,η) , как и прочие величины расстояний в формуле, измеряются в метрах.

Вместо комплексной величины амплитуды сигнала при моделировании изображения дифракционной картины используется вещественная величина интенсивности сигнала I в каждой точке изображения:

$$I = UU^* = \text{Re}(U)^2 + \text{Im}(U)^2, \quad (4)$$

где $U = \text{Re}(U) + i\text{Im}(U)$ и $U^* = \text{Re}(U) - i\text{Im}(U)$ – комплексно сопряженные числа; $\text{Re}(U)$ – вещественная часть амплитуды U , $\text{Im}(U)$ – мнимая часть амплитуды U .

В качестве исходных данных для моделирования используется цифровое изображение структуры материала, представляющее собой массив точек с некоторой яркостью (заданной величиной от 0 до 255), пропорциональной амплитуде светового сигнала. Результатом моделирования является массив интенсивностей светового сигнала в каждой точке дифракционной картины.

Для двумерного массива амплитуд светового сигнала в каждой точке дискретного компьютерного изображения интеграл (3) можно заменить конечной суммой:

$$U_{k,l} = C\Delta^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[\frac{-2i\pi kn\Delta^2}{\lambda L}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} u_{n,m} \exp\left[\frac{-2i\pi lm\Delta^2}{\lambda L}\right], \quad (5)$$

где M и N – ширина и высота компьютерного изображения соответственно; k и l , n и m – индексы пикселей соответствующего и исходного изображений по ширине и высоте; Δ – расстояние между пикселями, м.

Согласно [11] при компьютерном моделировании величины λ , L , N и Δ можно задать таким образом, что:

$$\frac{N\Delta^2}{\lambda L} = I, \quad (6)$$

при условии, что $N = M$, то есть изображение имеет форму квадрата.

Тогда выражение (5) можно переписать в виде:

$$U_{k,l} = C\Delta^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp\left[-\frac{2i\pi kn}{N}\right] \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} u_{n,m} \exp\left[-\frac{2i\pi lm}{M}\right], \quad (7)$$

сходном с формулой двумерного дискретного преобразования Фурье, где $u_{n,m}$ – относительная величина амплитуды сигнала, равная яркости пикселя в цифровой фотографии структуры образца материала. Выражение (6) также позволяет отказаться от использования размерностей и перейти к безразмерным относительным величинам.

В [11] показано, что если $M=N=2^t$, где t – целое положительное число, то для вычисления (7) может быть использован алгоритм, аналогичный алгоритму быстрого дискретного преобразования Фурье с оценкой быстродействия $O(N=M) = N^2 \log_2 N$ (вместо $O(N=M) = N^3$ при прямом суммировании (7)).

Перед построением модели дифракционной картины данные исходного цифрового изображения структуры материала предварительно обрабатываются. Изображение приводится к квадратному с одинаковым количеством пикселей по ширине и высоте, равным целой степени двойки (условие использования алгоритма быстрого преобразования Фурье) и преобразуется в монохромное, в котором яркость каждого пикселя определяется одной величиной.

Освещение структуры материала на цифровой фотографии лучом лазера имитируется следующим образом. Особенность луча лазера заключается в том, что интенсивность света в лазерном пятне круглого сечения убывает экспоненциально от центра пятна до его края и на границе пятна плавно обращается в ноль [2]. В [11] предложена следующая математическая модель освещения образца материала лазерным пятном (рисунок 2).

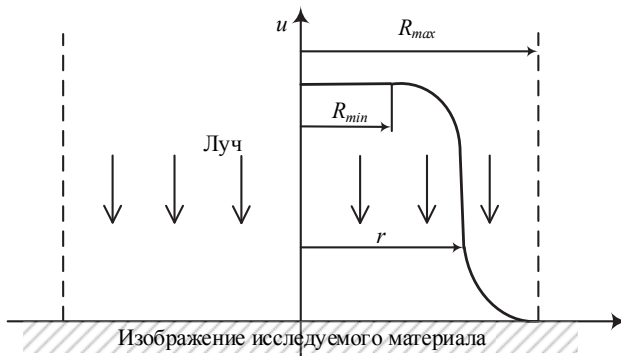


Рис. 2. Схема имитации светового пятна

Имитируемое пятно отличается от реального лазерного пятна тем, что характеризуется не одним, а двумя радиусами R_{\max} (радиус всего пятна) и R_{\min} (радиус внутренней части пятна, в пределах которого величина светового сигнала исходного изображения не меняется). Внутри кольца между R_{\min} и R_{\max} световой сигнал гасится до нуля по экспоненциальному закону.

Если обозначить относительную величину светового сигнала, пропорциональную яркости пикселя исходного изображения, как u_0 , то после наложения светового пятна она примет значение u в диапазоне $R_{\min}^2 \leq \xi^2 + \eta^2 \leq R_{\max}^2$:

$$u(\xi, \eta) = u_0(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{\sigma(R_{\min} - \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2}{R_{\max}^2}\right], \quad (8)$$

где σ – коэффициент, рассчитанный из условия убывания u до нуля на участке $[R_{\min}; R_{\max}]$. Координаты (ξ, η) относительно центра изображения могут быть вычислены через индексы пикселя n и m .

Соответственно, для $\xi^2 + \eta^2 > R_{\max}^2$:

$$u(\xi, \eta) = 0, \quad (9)$$

и для $\xi^2 + \eta^2 < R_{\min}^2$:

$$u(\xi, \eta) = u_0(\xi, \eta). \quad (10)$$

Преобразование изображения структуры с помощью (8)-(10) преследует две цели. Во-первых, на изображении стирается резкая граница, образуемая краем изображения, что может приводить к искажению моделируемой дифракционной картины за счёт появления так называемых $N-1$ максимумов [12]. Во-вторых, при интегрировании по всей бесконечной поверхности световой волны амплитуда светового сигнала за пределами пятна всегда тождественно равна нулю.

Для измерения величин геометрических параметров структур текстильных материалов разработаны пять алгоритмов.

Алгоритм 1 предварительной обработки исходного цифрового изображения состоит из следующих шагов.

Шаг 1.1. Обрезать края изображения, превратив его в квадрат со стороной $N' = 2^t$, где t – максимальное целое число, удовлетворяющее условию $2^t \leq \min(M, N)$.

Шаг 1.2. Преобразовать изображение в монохромное.

Шаг 1.3. Смоделировать освещение центра изображения лучом лазера, рассчитав величину светового сигнала в каждой точке подготовленного изображения с использованием (8)-(10).

После предварительной обработки компьютерное изображение периодической структуры, представляющее собой двумерный массив комплексных чисел, каждое из которых соответствует амплитуде сигнала в соответствующей точке исходного изображения, преобразуется с помощью суммы (7). Для ускорения вычисления суммы используется алгоритм быстрого дискретного преобразования Фурье, модифицированный для рядов с отрицательными значениями индексов [11]. Результатом является численная модель дифракционной картины в виде массива комплексных чисел того же размера, что и массив исходного изображения, значение каждого элемента которого равно комплексной амплитуде светового сигнала в соответствующей точке дифракционной картины. Массив комплексных амплитуд может быть приведён к массиву интенсивностей сигналов с помощью выражения (4). Для последующего анализа расположения дифракционных максимумов может быть применён как непосредственно этот массив распределения интенсивности световых сигналов в построенной модели, так и его визуализация в виде цифрового изображения дифракционной картины, в которой яркость каждого пикселя прямо пропорциональна числовому значению элемента полученного массива интенсивностей сигналов.

Алгоритм 2 расчета дифракционной картины по цифровой фотографии структуры материала с использованием математической модели [11] может быть записан в виде следующих шагов обработки изображения.

Шаг 2.1. Подготовить компьютерное изображение структуры материала с помощью алгоритма 1.

Шаг 2.2. Скопировать величины яркостей световых сигналов в каждом пикселе подготовленного на шаге 2.1 изображения в двумерный массив комплексных чисел.

Шаг 2.3. Для двумерного массива, полученного на шаге 2.2, вычислить (7) с помощью быстрого преобразования Фурье [11].

Шаг 2.4. Для каждой комплексной величины из массива комплексных чисел, полученного на шаге 2.3, вычислить интенсивность I , используя (4), и результат записать в новый массив вещественных чисел. Полученный массив содержит интенсивности светового сигнала в каждой точке смоделированной дифракционной картины.

Шаг 2.5. Для визуализации результата моделирования построить новое цифровое изображение, где яркость каждого пикселя выражена целым числом от 0 до 255, пропорциональным значению соответствующего элемента массива интенсивностей, полученного на шаге 2.4.

4. Алгоритмы анализа дифракционных картин. С использованием предложенной математической модели [11] по алгоритму 2 были построены и проанализированы изображения дифракционных картин различных микроструктур. Анализ проводился с целью выявления закономерностей в расположении дифракционных максимумов для структур различной формы и последующего синтеза способов автоматического определения величин угловых и линейных геометрических параметров структур различных текстильных материалов по рассчитанному массиву интенсивностей световых сигналов.

Первоначально алгоритм моделирования дифракционных картин был апробирован на структурах простых форм, для которых существуют аналитические решения распределения интенсивностей в дифракционной картине, например прямоугольное отверстие (рисунок 3).

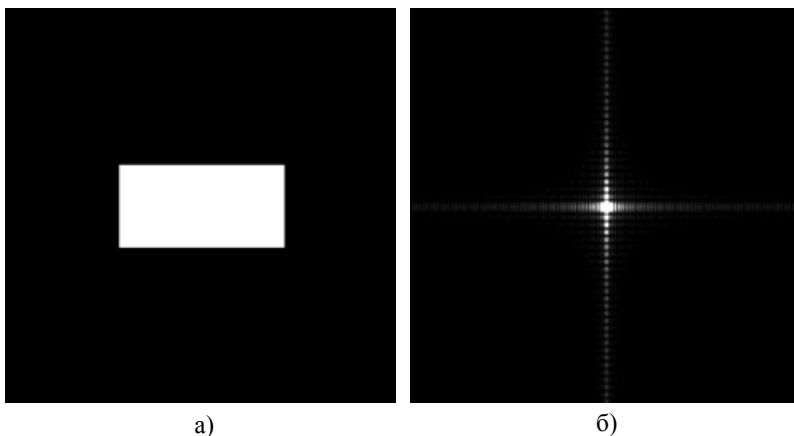


Рис. 3. Дифракция на прямоугольном отверстии: а) исходное изображение; б) смоделированная дифракционная картина

Существует аналитическое выражение для расчета интенсивности I для дифракционной картины от прямоугольного отверстия [9]:

$$I(x, y) = \frac{l_X^2 l_Y^2}{\lambda^2 L^2} \text{SINC}^2\left(\frac{l_X x}{\lambda L}\right) \text{SINC}^2\left(\frac{l_Y y}{\lambda L}\right), \quad (11)$$

где x и y – координаты точки на экране, отображающем дифракционную картину, м (точка начала системы отсчета располагается в центре изображения); l_X и l_Y – соответственно ширина и высота прямоугольного отверстия, м; λ – длина волны монохроматического света, освещающего отверстие, м; L – расстояние от отверстия до экрана, м; функция $\text{SINC}(\gamma) = (\sin\pi\gamma)/\gamma$. Величина интенсивности I является безразмерной (приведённой к величине самой яркой точки дифракционной картины – центрального максимума). Численное моделирование с помощью (7) и (11) показало, что рассчитанные обоими способами величины интенсивности совпадают. Модель дифракции с использованием модели (7) также была апробирована при проведении численного расчета модели дифракции на синусоидальных решетках и сравнении результата с аналитическим решением, предложенным в [9]. Исследование дифракционных картин крученых нитей показало, что дифракционные максимумы располагаются в направлении, перпендикулярном продольной направляющей витков нити (рисунок 4).

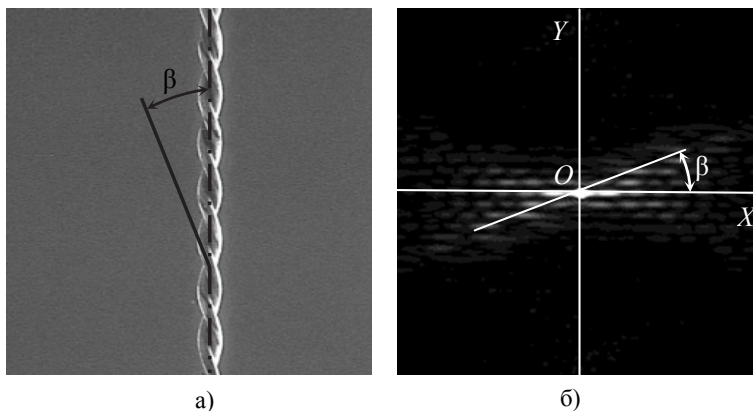


Рис. 4. Дифракция света на крученой нити: а) исходное изображение; б) дифракционная картина

Если ось нити на исходной фотографии расположена вертикально (рисунок 4а), то величина угла кручения β равна углу между горизонтальной осью координат и линией, проведённой из центра изображения через середины дифракционных

максимумов (рисунок 4б). В [13] для определения величины угла β предлагается использовать диаграмму распределения интенсивности дифракционных максимумов в полярных координатах (рисунок 5).

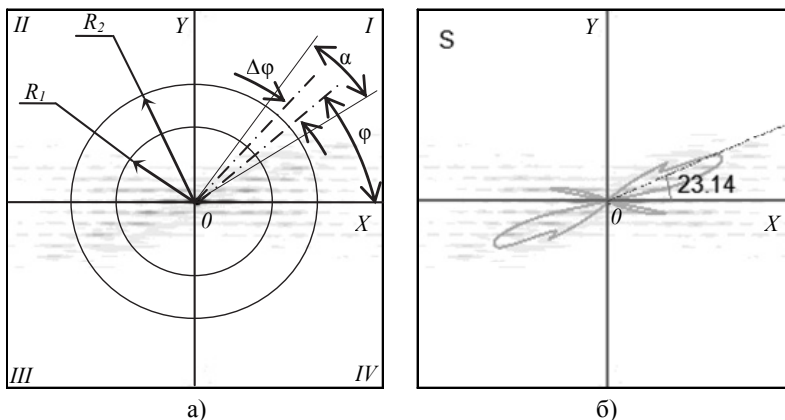


Рис. 5. Построение диаграммы распределения интенсивностей для дифракционной картины крученой нити

Алгоритм 3 построения диаграммы распределения интенсивности и последующего определения величины угла кручения нити с использованием способа, предложенного в [13], состоит из следующих шагов.

Шаг 3.1. Цифровая фотография нити ориентируется так, чтобы ось нити располагалась строго вертикально (рис. 4а).

Шаг 3.2. Моделируется дифракционная картина по алгоритму 2.

Шаг 3.3. 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 .

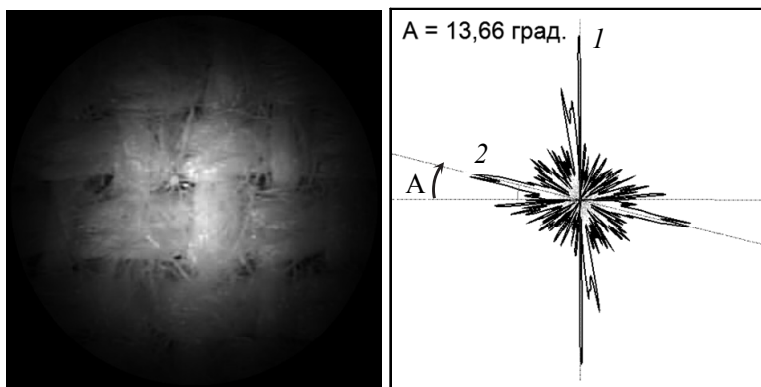
Шаг 3.4. Сектор, построенный на шаге 3.3, сдвигается на угол $\Delta\varphi$. Как и на шаге 3.3, рассчитывается суммарная интенсивность дифракционных максимумов внутри сектора после сдвига. Это значение откладывается на диаграмме как величина радиус-вектора для угла $(\varphi+\Delta\varphi)$.

Шаг 3.5. Повторяется шаг 3.4 для $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. При этом конец радиус-вектора опишет кривую диаграммы.

Шаг 3.6. Построенная на шаге 3.5 диаграмма имеет 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 равен искомому углу кручения.

С использованием алгоритма 3 выполнены измерения угла кручения нитей из полиэстера и смеси хлопка и вискозы, выпускаемых отечественной промышленностью.

Аналогичная диаграмма может быть использована для определения величины перекоса уточной нити в ткани (рисунок 6). В этом случае на построенной поверх смоделированной дифракционной картины диаграмме распределения интенсивностей в полярных координатах присутствуют два ярко выраженных максимума 1 и 2 (рисунок 6б) [14]. Эти пики диаграммы соответствуют расположению наборов дифракционных максимумов от уточных нитей и нитей основы. При строго перпендикулярном расположении нитей в переплетении угол между направлениями из центра изображения на эти два пика диаграммы равен 90° . В противном случае отклонение величины этого угла от 90° равно величине перекоса.



а) б)
Рис. 6. Определение перекоса в тканях

Алгоритм 4 определения величины перекоса между нитями утка и основы ткани по цифровому изображению согласно способу, описанному в [14], состоит из следующих шагов.

Шаг 4.1. Осуществляется расчет (моделирование) дифракционной картины по цифровой фотографии образца ткани, сделанной с двадцатикратным увеличением, по алгоритму 2.

Шаг 4.2. Для рассчитанной дифракционной картины строится диаграмма распределения интенсивности в полярных координатах (шаги 3.3–3.5 алгоритма 3).

Шаг 4.3. Осуществляется поиск максимума диаграммы (наиболее удалённой от начала отсчета точки l диаграммы на рисунок 6б).

Шаг 4.4. В диапазоне углов диаграммы $[\psi; \pi + \psi]$, где ψ – угловая координата максимума диаграммы l , осуществляется поиск второго по величине максимума 2.

Шаг 4.5. 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.

С использованием алгоритма 4 осуществлялся контроль перекоса уточных нитей в процессе сушки на ширильной машине плащевой ткани и полотна.

При освещении лучом монохроматического света объекта с периодической структурой расстояния между соседними дифракционными максимумами обратно пропорциональны расстояниям между элементами этой структуры. Например, для синусоидальной дифракционной решетки [9]:

$$D_X = f\lambda L, \quad (12)$$

где D_X – расстояние между соседними дифракционными максимумами, м; f – частота решетки, обратно пропорциональная расстоянию между соседними штрихами ($f=1/T$), m^{-1} ; λ – длина волны, м; L – расстояние от решетки до экрана, на котором наблюдается дифракционная картина, м.

В [11] расстояния между периодическими элементами структуры текстильного материала и расстояния между дифракционными максимумами в смоделированной дифракционной картине определяются выражениями:

$$T_X = \frac{K}{D_X}; T_Y = \frac{K}{D_Y}, \quad (13)$$

где T_X – расстояния между соседними элементами структуры вдоль горизонтальной оси OX (например, между соседними нитями утка в ткани), м; T_Y – расстояния между соседними элементами структуры вдоль вертикальной оси OY (например, между соседними нитями

основы в ткани), м; D_X и D_Y – соответственно расстояния между соседними дифракционными максимумами в горизонтальном и вертикальном направлениях, м; K – коэффициент, учитывающий разрешение цифрового фотоаппарата, усиление микроскопа и расстояние от объектива до исследуемого материала [11], м².

В [15] предложено применить повторно алгоритм расчета дифракционной картины к дифракционной картине, смоделированной по исходному цифровому изображению структуры материала. Так как в обоих преобразованиях для вычисления суммы (7) применялся алгоритм быстрого дискретного двумерного преобразования Фурье, этот способ был назван авторами способом «двойного Фурье-преобразования».

Пусть T_X и T_Y – расстояния между соседними периодическими элементами структуры на исходном цифровом изображении текстильного материала. Тогда с учетом (13) расстояния между дифракционными максимумами на смоделированной дифракционной картине:

$$T_{X1} = \frac{K}{T_X}; T_{Y1} = \frac{K}{T_Y}, \quad (14)$$

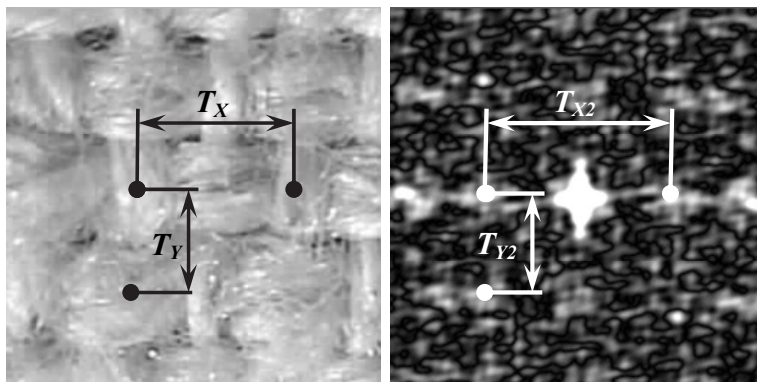
где T_{X1} – расстояния между соседними дифракционными максимумами вдоль горизонтальной оси OX , м; T_{Y1} – расстояния между соседними дифракционными максимумами вдоль вертикальной оси OY (например, между соседними нитями основы в ткани), м; K – некоторый коэффициент, м².

Результатом моделирования дифракционной картины является двумерный массив интенсивностей точек изображения. Повторное применение к нему алгоритма моделирования дифракционной картины в предположении, что коэффициент K не изменился, так как не менялись условия съемки, позволяет определить расстояния между дифракционными максимумами на второй дифракционной картине:

$$T_{X2} = \frac{K}{T_{X1}} = \frac{K}{K/T_X} = T_X; T_{Y2} = \frac{K}{T_{Y1}} = \frac{K}{K/T_Y} = T_Y, \quad (15)$$

где T_{X2} и T_{Y2} – расстояния между соседними дифракционными максимумами во второй модели соответственно вдоль горизонтальной и вертикальной осей координат, м.

Таким образом, после двух последовательных построений дифракционных картин с использованием алгоритма преобразования Фурье расстояния между соседними дифракционными максимумами в точности равны расстояниям между периодическими элементами на исходном изображении структуры материала (рисунки 7).



а б
Рис. 7. Метод «двойного» преобразования Фурье

Алгоритм 5 измерения расстояний между периодическими элементами структуры текстильного материала, разработанный на основании способа [15], описывается следующими шагами.

Шаг 5.1. Подготовить цифровую фотографию структуры материала по алгоритму 1.

Шаг 5.2. Выполнить расчет сумм (7) для каждого пикселя подготовленного изображения с использованием алгоритма быстрого дискретного преобразования Фурье (шаги 2.2-2.4 алгоритма 2 расчета дифракционной картины по цифровой фотографии структуры материала). В результате получено цифровое изображение дифракционной картины и двумерный массив интенсивностей, рассчитанных с помощью (4).

Шаг 5.3. Повторить шаги 2.3-2.4 алгоритма 2 для полученного на шаге 5.2 цифрового изображения дифракционной картины. В результате построено новое изображение дифракционной картины и двумерный массив интенсивностей точек в ней.

Шаг 5.4. Проанализировать расположение максимумов интенсивностей в полученной на шаге 5.3 модели дифракционной картины с помощью любого алгоритма поиска экстремумов функции, заданной таблично. По найденным координатам дифракционных максимумов определить средние расстояния между ними вдоль горизонтальной и вертикальной осей: T_{x2} и T_{y2} .

Шаг 5.5. Согласно (15) определённые на шаге 5.4 средние расстояния между дифракционными максимумами равны средним расстояниям между элементами периодической структуры материала на цифровой фотографии в пикселях. Далее полученные величины

умножаются на коэффициент разрешения цифрового фотоаппарата, использованного для съемки исследуемой структуры.

С помощью алгоритма 5 выполнено определение расстояния между петельными рядами и столбиками для чулочных изделий, а также определение расстояния между соседними нитями в ткани с переплетением «тартан».

5. Заключение. 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. Линейные размеры периодических элементов структуры материала определяются по расстояниям между главными дифракционными максимумами с помощью любого алгоритма поиска экстремумов. Угловые размеры (углы кручения нити и перекоса в ткани) определяются с помощью диаграммы распределения интенсивностей дифракционных максимумов, построенной в полярных координатах.

Разработаны алгоритмы дифракционных способов контроля геометрических параметров структуры текстильных материалов, которые могут быть реализованы с помощью компьютерной программы, обрабатывающей исходное цифровое изображение материала, сделанное с достаточным увеличением. Предложенные алгоритмы отличаются простотой реализации и не требуют значительных вычислительных ресурсов. Для определения точности измерений с помощью указанных алгоритмов использовались нити, выпускаемые ОАО «Прядильно-ниточный комбинат им. С.М. Кирова» (г. Санкт-Петербург). Точность измерения угла составила $\pm 1^\circ$ при вычисленном уровне значимости статистики Стьюдента (t -критерия) $\alpha_{\text{выч.}} < 0,05$. Благодаря использованию высокопроизводительных алгоритмов предлагаемый комплекс может применяться для оперативного измерения геометрических параметров текстильных материалов в процессе их производства. Ввод в качестве исходных данных границ допустимых диапазонов измеряемых параметров и контроль вхождения измеряемых величин в эти диапазоны позволяет использовать данную систему для автоматического контроля качества производимого материала по геометрическим параметрам его структуры.

Литература

1. *Шустов Ю.С.* Основы текстильного материаловедения: учебное пособие // М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина: Совьяж Бево. 2007. 302 с.

2. *Шляхтенко П.Г.* Оптические методы контроля параметров волоконсодержащих материалов. Контроль структуры текстильных материалов // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 347 с.
3. *Kretschmar S.D., Furter R.* Uster© Tester 5-S800. Application Report // Uster: Uster Technologies AG. 2009. 40 p.
4. *Durand B.* Process And Device For Measuring The Twist Of A Textile Yarn // Patent US. no. 5210594. 1993.
5. *Calvimontes A., Badrul Hasan M.M., Dutschk V.* Effects of Topographic Structure on Wettability of Woven Fabrics // Woven Fabric Engineering. Rijeka: Sciyo. 2010. pp. 71–92.
6. *Pan R.* Automatic Inspection of Woven Fabric Density of Solid Colour Fabric Density by the Hough Transform // Fibres & Textiles in Eastern Europe. 2010. vol.18. no. 4(81). pp. 46–51.
7. *Лутсгартен Н.В., Сокова Г.Г., Сергеев А.С.* Бесконтактный способ анализа структуры ткани // Патент РФ. № 2131605. 1999. Бюл. № 16.
8. *Переудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ // М.: Высшая школа. 1989. 360 с.
9. *Гудмен Дж.У.* Введение в Фурье-оптику // М.: Мир. 1970. 364 с.
10. *Борн М.* Основы оптики // М.: Наука. 1973. 720 с.
11. *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. 2013. №7. С. 20–27.
12. *Shlyakhtenko P.G., Shkuropat S.N., Nefedov V.P.* Computer analysis of models of optical images of plain weaves // Journal of Optical Technology. 2007. vol. 74. pp. 476–478.
13. *Шляхтенко П.Г., Кофнов О.В.* Способ определения угла крутки нити // Патент РФ. № 2534720. 2014. Бюл. № 30.
14. *Shlyakhtenko P.G., Kofnov O.V., Sukharev P.A.* Method of determining the skewness of the weft thread in fabric // Journal of Optical Technology. 2014. vol. 81. Issue 2. pp. 111–113.
15. *Шляхтенко П.Г., Кофнов О.В., Рудин А.Е.* Способ измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов // Патент РФ. № 2508537. 2014. Бюл. № 6.

References

1. Shustov Y.S. *Osnovy tekstil'nogo materialovedeniya: uchebnoe posobie* [Basics of Textile Materials: Textbook]. Moscow: MGTU A.N. Kosygina: Sov'yazh Bevo. 2007. 302 p. (In Russ.).
2. Shlyakhtenko P.G. *Opticheskie metody kontrolya parametrov voloknosoderzhashchih materialov. Kontrol' struktury tekstil'nyh materialov* [Optical methods of controlling the parameters of fiber materials. Controlling of the structure of textile materials]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. 347 p. (In Russ.).
3. *Kretschmar S.D., Furter R.* Uster© Tester 5-S800. Application Report. Uster: Uster Technologies AG. 2009. 40 p.
4. *Durand B.* Process And Device For Measuring The Twist Of A Textile Yarn. Patent US. no. 5210594. 1993.
5. *Calvimontes A., Badrul Hasan M.M., Dutschk V.* Effects of Topographic Structure on Wettability of Woven Fabrics. *Woven Fabric Engineering*. Rijeka: Sciyo. 2010. pp. 71–92.

6. Pan R. Automatic Inspection of Woven Fabric Density of Solid Colour Fabric Density by the Hough Transform. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2010. vol. 18. no. 4(81). pp. 46–51.
7. Lustgarten N.V., Sokova G.G., Sergeev A.S. *Beskontaktnyj sposob analiza struktury tkani* [The contactless method of analyzing the structure of the fabric]. Patent RF. no. 2131605. Bul. no. 16. (In Russ.).
8. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedenie v sistemnyj analiz* [Introduction to systems analysis]. M.: Vysshaya shkola. 1989. 360 p. (In Russ.).
9. Gudmen J.W. *Vvedenie v Fur'e-optiku* [Introduction to Fourier optics]. M.: Mir. 1970. 364 p. (In Russ.).
10. Born M. *Osnovy optiki* [Principles of optics]. M.: Nauka. 1973. 720 p. (In Russ.).
11. Shlyahenko P. G. Pimenov V.I., Kofnov O.V. *Ispol'zovanie dvumernogo diskretnogo preobrazovaniya Fur'e dlya kompyuternogo analiza materiala s povtoryayushchejsya strukturoj* [Use of two-dimensional discrete fourier transform for the computer analysis of a material with repeating structure]. *Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii – Automation and modern technology*. 2013. vol. 7. pp. 20–27. (In Russ.).
12. Shlyakhtenko P.G., Shkuropat S.N., Nefedov V.P. Computer analysis of models of optical images of plain weaves. *Journal of Optical Technology*. 2007. vol. 74. pp. 476–478.
13. Shlyahenko P.G., Kofnov O.V. *Sposob opredeleniya ugla krutki niti* [A method of determining the yarn twist angle] Patent RF. no. 2534720. 2014. Bul. no. 30. (In Russ.).
14. Shlyakhtenko P.G., Kofnov O.V., Sukharev P.A. Method of determining the skewness of the weft thread in fabric. *Journal of Optical Technology*. 2014. vol. 81. Issue 2. pp. 111–113.
15. Shlyahenko P.G., Kofnov O.V., Rudin A.E. *Sposob izmereniya geometricheskikh parametrov struktury tekstil'nyh materialov* [A method of measuring geometric parameters of the structure of textile materials. Patent RF. no. 2508537. 2014. Bul. no. 6. (In Russ.).

Кофнов Олег Владимирович — соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры механической технологии текстильных материалов, Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна. Область научных интересов: технология производства текстильных материалов, машинное зрение, обработка астрономических каталогов, программирование на Java и C#. Число научных публикаций — 14. kofnov@mail.ru; Большая Морская ул., 18, Санкт-Петербург, 191186; р.т.: +7(812)9413288.

Kofnov Oleg Vladimirovich — Ph.D. student of fibrous materials mechanical technology department, St. Petersburg State University of Technology and Design. Research interests: textile technology, machine vision, astronomical catalogs processing, Java and C# programming. The number of publications — 14. kofnov@mail.ru; 18, Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg 191186, Russia; office phone: +7(812)9413288.

РЕФЕРАТ

Кочнов О.В. **Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов.**

В настоящей статье рассматриваются моделирование дифракционного процесса контроля геометрических параметров структуры текстильных материалов и алгоритмы измерения величин этих параметров. Известны методы контроля, в которых дифракционная картина получается при освещении образца материала лучом лазера. Геометрические параметры структуры материала определяются по расположению дифракционных максимумов.

Предлагается вместо этого использовать математическое моделирование явления дифракции. В качестве исходных данных выступает цифровое изображение структуры текстильного материала. Расчет дифракционной картины для этого изображения осуществляется с использованием интеграла Френеля-Кирхгофа. Предложен алгоритм такого расчета, основанный на двумерном дискретном преобразовании Фурье. Результатом расчета является массив интенсивностей света в каждой точке дифракционной картины.

По расположению максимумов интенсивности в дифракционной картине, построенной для крученой нити, можно определить угол кручения нити. От величины угла кручения зависит прочность нити. Для определения угла кручения используется диаграмма распределения интенсивности в дифракционной картине, построенная в полярных координатах. Предложен алгоритм построения диаграммы и измерения угла кручения нити.

Аналогичная диаграмма может быть использована для определения угла перекося уточной нити в ткани. Такой перекося является дефектом ткани и связан с неисправностью оборудования. Предложен алгоритм определения величины перекося с использованием диаграммы распределения интенсивности в полярных координатах.

В дифракционной картине, смоделированной для изображения материала, расстояния между дифракционными максимумами обратно пропорциональны расстояниям между периодическими элементами структуры материала. Если выполнить то же преобразование для полученной дифракционной картины, то во второй дифракционной картине расстояния между дифракционными максимумами равны периодическим расстояниям на цифровом изображении структуры материала. Это упрощает контроль за этими величинами. Предложен алгоритм двух последовательных расчетов дифракционных картин с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье и определения периодических расстояний между элементами структуры.

SUMMARY

Kofnov O.V. **Model and Algorithms for Measurement of Geometric Parameters in Textile Structures.**

The model of diffraction and the algorithms for measuring of geometric parameters in textile are considered. There are a few methods based on diffraction after illuminating the textile by a laser. Geometric parameters of that structure can be determined after measuring distances between maximums in the diffraction pattern.

Instead of using a real diffraction process the mathematical modeling of diffraction patterns are proposed. The source data about lights in the structure can be extracted from the digital image of textile. The diffraction pattern model can be constructed using Fresnel-Kirchhoff diffraction formula. The algorithm of diffraction pattern digital image calculation is proposed. This algorithm is based on the two-dimensional discrete Fourier transform. In result the two-dimension intensity array in every pixel of the diffraction image is produced.

The placement of diffraction maximums provides the measurement of the twist angle of yarn. It is extremely important because the yarn strength depends on the twist angle. This angle can be measured in the intensity diagram of a yarn diffraction pattern which is drawn in polar coordinates. The algorithm of this diagram construction and angle measurement is developed.

The same diagram can be used to determine the skewness of the weft thread in fabric. It is a defect of fabric. The algorithm of the skewness determination is proposed.

After the first transform the digital image of textile to the diffraction pattern image the distances between diffraction maximums are reciprocally proportional to distances in the periodical structure of the source object so additional calculations are required. After the second transform the distances between them are equal to distances between repeating elements in the source material. The offered algorithm combines two two-dimensional discrete fast Fourier transforms to calculate a diffraction pattern from a diffraction pattern image of material under consideration.