

О.В. КОФНОВ, Е.Л. ЛЕБЕДЕВ, А.В. МИХАЙЛЕНКО
**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ
МИЛЛИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ
ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ,
ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Кофнов О.В., Лебедев Е.Л., Михайленко А.В. Компьютерное моделирование дифракции миллиметровых электромагнитных волн для выявления внутренних дефектов изделий, выполненных по аддитивной технологии.

Аннотация. В статье предлагается компьютерная модель и описание метода использования электромагнитных волн с длиной 0,1-1 мм для выявления внутренних дефектов изделий, выполненных по аддитивным технологиям. С помощью предложенной модели демонстрируется возможность бесконтактного неразрушающего контроля качества по дифракционным картинам.

В настоящее время аддитивные технологии, и в частности печать на трехмерных принтерах, используют для получения изделия материалы, многие из которых свободно пропускают терагерцовое излучение (частота $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{12}$ Гц, длина волны 0,1-1 мм). В то же время дефекты, возникающие в изделиях при аддитивном производстве, имеют размеры того же порядка (0,1-1 мм), что и терагерцовые волны. Следовательно, при облучении изделий с такими дефектами монохромным миллиметровым излучением будет возникать дифракция Френеля.

Это позволяет использовать дифракционный метод контроля качества изделий, выполненных методом трехмерной печати. В статье описаны схема проведения контроля, алгоритм моделирования дифракционных картин с использованием выражения Релея — Зоммерфельда и компьютерная программа, реализующая указанный алгоритм. Приведены результаты определения размеров и расположения дефектов в изделиях по дифракционным картинам.

Рассматривается компьютерная модель такого дифракционного метода, который может быть реализован в виде аппаратно-программных средств, позволяющих автоматизировать процесс контроля, обеспечить его низкую себестоимость, безопасность (учитывая свойства электромагнитного излучения указанного диапазона длин волн) и может конкурировать с методами электромагнитной и звуковой томографии.

Ключевые слова: аддитивная технология, трехмерная печать, терагерцовое излучение, дифракционный метод, неразрушающий контроль, компьютерное моделирование, обработка изображения.

1. Введение. В настоящее время все большую роль в производстве изделий различного назначения играет использование аддитивных технологий. В общем смысле под аддитивной технологией понимается технология изготовления изделий послойным формированием их структуры [1]. Сегодня существует множество способов «послойного формирования» изделия при его изготовлении по аддитивной технологии, при этом наиболее распространенными являются следующие способы:

- стереолитография (SL — Stereolithography) [2];
- нанесение термопластов (FDM — 0151 Fused Deposition Modeling) [3];

– лазерное спекание порошковых материалов (SLS — Selective Laser Sintering) [4];

– изготовление объектов с использованием ламинирования (LOM — Laminated Object Manufacturing) [5].

Частным случаем аппаратной реализации аддитивных технологий являются 3D принтеры, реализующие указанные способы при трехмерной печати изделий. Данная технология позволяет изготовить детали и даже конструкцию, предварительно разработанную с помощью трехмерного компьютерного моделирования формы с заданными в электронном виде геометрическими параметрами и характеристиками и при необходимости различающимися по структуре и физико-химическим характеристикам слоями. В отличие от традиционных машиностроительных способов при такой технологии окончательное изделие получается не удалением лишнего материала (обработка резанием) и не формованием однородной структуры с целью получения требуемых контуров (литьё, обработка давлением и т.д.), а наращиванием (напылением) порошкообразного или жидкого вещества с последующим его закреплением. Это дает уникальную возможность получать изделия сложной формы с контролируемой неоднородностью по внутренней структуре, которую невозможно реализовать традиционными способами, например штамповкой или резанием. Это, в свою очередь, позволяет выполнять детали, которые раньше можно было изготовить лишь сборкой. Кроме того, «ажурная», но сложная форма деталей, выполненных по аддитивным технологиям, позволяет снизить их массово-габаритные характеристики без потери прочности по сравнению с деталями, выполненными традиционно.

Учитывая, что процесс трехмерной печати полностью автоматический, по переданной компьютером программе, без использования ручного труда в принципе, произведенная по такой технологии продукция имеет значительно меньшую себестоимость, чем при традиционном производстве, и допускает полную роботизацию производственного процесса. При этом по своим физико-механическим характеристикам (прочность, твердость, износостойкость и пр.) такие изделия, выполненные методом напыления, ничем не уступают деталям, изготовленным из цельных кусков (отливок, болванок, паковок) материала, а иногда и превосходят их. Здесь следует отметить, что речь в данном случае идёт не только о предметах, изготавливаемых из сталей и металлов, но и из полимеров, силикатов, смесей на основе целлюлозы и прочее [4]. Кроме того, при аддитивной технологии некоторые элементы, ранее изготавливаемые из металлических сплавов, целесообразнее изготавливать из неметаллов без потери их конструктивных свойств. Аддитивные технологии предлагается применять в таких от-

раслях промышленности, как автомобиле- и самолетостроении, электронике, медицине. Однако одним из ограничений широкого практического применения деталей, выполненных по аддитивной технологии, связано с наличием внутренних дефектов, которые образуются при спекании технологических слоев и являются особенностью данной технологии. Таковыми дефектами являются:

- поры, образованные при затвердевании или кристаллизации технологических слоев изделия;
- поры или микротрещины, образованные по причине локального отсутствия абсорбционного сцепления технологических слоев;
- микротрещины, возникшие при локальных температурных напряжениях в формируемой детали при ее производстве.

Размеры данных дефектов во многом определяются толщиной слоев, из которых формируются детали и составляют от ~ 0.1 до 1 мм. При этом размещение дефектов возможно в каждом последующем слое. Наличие указанных дефектов в ряде случаев не позволяет реализовать одно из основных преимуществ деталей, выполненных по аддитивным технологиям, а именно снизить их массово-габаритные характеристики без потери прочности по сравнению с деталями, выполненными традиционно.

Сегодня для обнаружения этих дефектов используются в основном ультразвуковые способы контроля, однако из-за расположения указанных дефектов один над другим, данный способ не всегда позволяет обнаружить все дефекты. Таким образом, актуальной является задача неразрушающего контроля внутренних дефектов структуры изделий, произведенных с использованием аддитивной технологии, в частности трехмерной печати.

2. Миллиметровые электромагнитные волны. В бесконтактных неразрушающих методах контроля качества широко используются рентгеновское и гамма-излучение, в частности способ рентгеновской томографии [6]. Сдерживающим фактором использования этих видов излучения является их опасность для человека. По этой же причине они не могут быть применены к биологическим объектам, производимым по аддитивным технологиям.

Терагерцовое излучение (частота $\nu = 3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ Гц, длина волны $\lambda = 0,1 - 1$ мм) является безопасным для человека. В настоящее время существуют мощные монохромные генераторы, позволяющие получить достаточно мощное монохромное излучение с миллиметровой и субмиллиметровой длиной волны [7-11]. Терагерцовое излучение используется в аэропортах в сканерах для поиска запрещённых предметов (оружия, взрывчатки), проносимых на борт самолетов [12-14]. Оно свободно проникает через такие материалы, как пластик, керамика, полимеры, целлюлоза, большинство биоматериалов [15, 16].

В качестве источника миллиметрового монохромного излучения может быть использован терагерцовый лазер на свободных электронах [17]. В качестве приемника целесообразно использовать болометрческую матрицу, предельную в [18]. Данный приемник позволяет получить двумерную картину излучения, прошедшего сквозь исследуемый материал без использования криогенных температур [19].

Следует отметить, что при длине волны монохромного терагерцового излучения порядка 1 мм оно должно дифрагировать на непрозрачных для него или отличающихся по оптической структуре внутренних элементах материалов с размерами того же порядка. К этим элементам могут относиться различные дефекты структуры материала: трещины, заполненные воздухом или водой, абсолютно непрозрачной для терагерцового излучения, вкрапления металлов в диэлектрик и прочее.

3. Дифракция на дефектах изделий, выполненных по аддитивной технологии. Решение классической задачи томографии вне зависимости от используемого для просвечивания объекта излучения связано выполнением съемки при облучении с разных ракурсов с последующим решением уравнений Радона для зафиксированных значений интенсивности сигнала в разных направлениях [20, 21]. Отсюда вытекают недостатки подобных томографических методов, связанные с заметными временными затратами на съемку и сложностью вычислений решений интегральных уравнений для последующей визуализации результатов.

Дифракционные методы контроля качества [22] позволяют, основываясь на явлении дифракции Фраунгофера, с достаточной степенью точности определять геометрические параметры (линейные и угловые) элементов структуры изделий. Однако эти методы, использующие в качестве источника излучения оптический лазер, позволяют фиксировать только видимые дефекты, расположенные обычно на поверхности материала. Кроме того, дифракционная картина в приближении Фраунгофера строится при условии, что расстояние до экрана значительно превышает линейные размеры как исследуемого элемента структуры, так и расстояния между получаемыми дифракционными максимумами. Это фактически позволяет считать расстояние между объектом и экраном бесконечно большим и фиксировать геометрические размеры элементов структуры материала только в двух измерениях (в плоскости исследуемого объекта, которая параллельна плоскости экрана с дифракционной картиной). Условием допустимости рассмотрения явления дифракции в приближении Фраунгофера является [23]:

$$ka^2 \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_q} \right) \ll 1, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, a — линейный размер рассеивающей свет неоднородности, D_q — расстояние от источника света до рассеивающей свет неоднородности, D_p — расстояние от нее до экрана, где проецируется дифракционная картина. Если же отказаться от прибли-

жения Фраунгофера и рассмотреть дифракцию Френеля при расстоянии от объекта до экрана, соизмеримое по величине как с размерами неоднородности внутри объекта, рассеивающей проходящее через него излучение, так и с длиной волны излучения:

$$ka^2 \left(\frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_q} \right) \gg 1, \quad (2)$$

то для построения модели изображения дифракционной картины можно воспользоваться выражением Релея — Зоммерфельда [24]:

$$U(P_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{S_i} U(P_I) \frac{\exp(ikr)}{r} \cos \theta dS, \quad (3)$$

где $U(P_0)$ — комплексная амплитуда излучения в точке P_0 на экране, $U(P_I)$ — комплексная амплитуда излучения в точке P_I внутри объекта, r — расстояние между точками P_0 и P_I , λ — длина волны излучения, θ — угол между нормалью из точки P_I к плоскости экрана и вектором r из точки P_0 в точку P_I , i — мнимая единица, S_i — поверхность, содержащая семейство точек P_I . Важной особенностью выражения (3) является использование в подынтегральном выражении расстояния r от точки неоднородности до точки на экране. Это означает, что полученная при облучении объекта дифракционная картина будет содержать информацию не только о высоте и ширине неоднородности, но и о ее глубине, а также о расстоянии от нее до экрана. В качестве такой неоднородности может выступать, например, трещина в толще материала. Для получения дифракционной картины используются электромагнитные волны такой длины, чтобы сам материал был для них прозрачен, а трещина выступала в качестве рассеивающего излучение препятствия.

4. Алгоритм моделирования дифракции Френеля. На рисунке 1 приведена схема оптической установки для получения дифракционной картины при вышеуказанных условиях. Параллельный пучок электромагнитных волн 1 облучает дефект 2, в грубом упрощении представляющий собой параллелепипед. На расстоянии L от контролируемого дефекта находится плоский экран 3, расположенный перпендикулярно пучку излучения, на который и проецируется дифракционная картина. Плоский угол θ между осью Z и вектором r . Перепишем выражение (3) в следующем виде:

$$U(x, y) = \frac{1}{i} \int_{-\infty}^{+\infty} \int U(\xi, \eta, L) \frac{\exp(ikr)}{r\lambda} \cos \theta d\xi d\eta, \quad (4)$$

где предполагается, что сечение пучка и размеры экрана бесконечны, толщина трещины (вдоль оси Z) крайне мала по сравнению с ее шириной (вдоль оси ξ) и высотой (вдоль оси η).

На рисунке 2 представлена упрощенная форма дефекта с указанием его геометрических размеров.

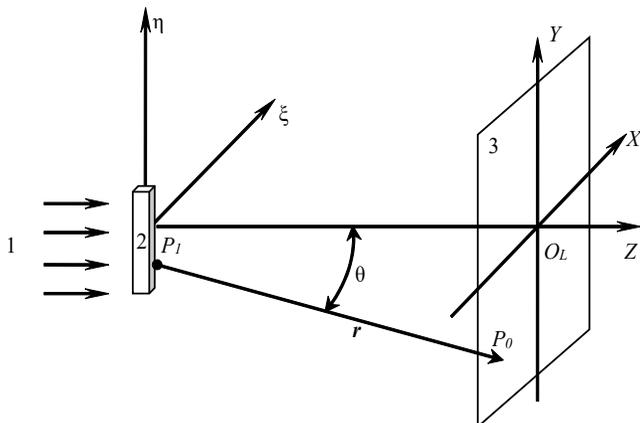


Рис. 1. Схема установки получения дифракционной картины: 1 — пучок излучения; 2 — дефект; 3 — экран

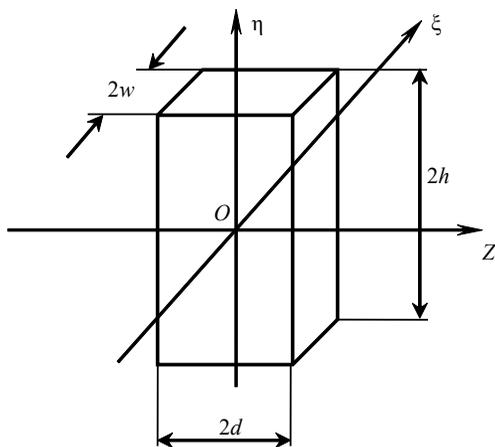


Рис. 2. Упрощенная форма контролируемого дефекта и его геометрические параметры

Оси координат пересекаются строго в центре параллелепипеда, который имеет ширину $2w$, высоту $2h$ и толщину $2d$. В данном случае не будем пренебрегать размерами дефекта вдоль оси Z . В реальности дефект будет представлять собой темное отверстие, то есть препятствие, внутри свободно пропускающее используемые волны материала. Однако, воспользовавшись теоремой Бабиня, дефект-препятствие

для расчета дифракционной картины можно трактовать как яркое отверстие, в пределах которого интенсивность сигнала $I=UU^*>0$ (U^* — величина, комплексно сопряженная с амплитудой сигнала U), а вне его $I=0$. В этом случае интеграл (4) можно переписать в виде:

$$U(x, y) = \frac{I}{i} \int_{L-d}^{L+d} \int_{-h-w}^h \int_{-w}^w \left[\frac{z}{r^2 \lambda} \cos \frac{2\pi r}{\lambda} + i \frac{z}{r^2 \lambda} \sin \frac{2\pi r}{\lambda} \right] d\xi d\eta dz, \quad (5)$$

где расстояние r от точки с координатами (x, y) на экране до точки внутри дефекта с координатами ξ и η , находящейся на расстоянии z от плоскости экрана:

$$r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}. \quad (6)$$

На рисунке 3 изображена схема изображения модели дифракционной картины. Соседние дифракционные максимумы M находятся на расстояниях Δ друг от друга.

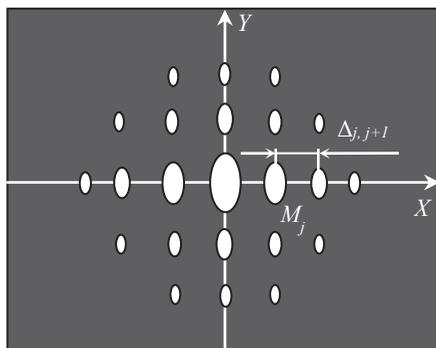


Рис. 3. Схема изображения дифракционной картины

Среднее расстояние между соседними дифракционными максимумами может быть определено по формуле:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \Delta_{j, j+1}}{j_{\max}}, \quad (7)$$

где $\Delta_{j, j+1}$ — расстояние между соседними дифракционными максимумами M_j и M_{j+1} ; j — индекс максимума, где $j=0$ — индекс центрального дифракционного максимума, j_{\max} — индекс последнего наблюдаемого (наиболее удаленного от центрального) дифракционного максимума. Вышеуказанное моделирование проводилось при следующих условиях.

Рассматривалась задача обнаружения дефектов в изотропном для терагерцового излучения материале при поперечном размере пучка излучения значительно меньше размеров изделия. Предполагается, что при проведении бесконтактного контроля качества изделия по данному методу источник излучения в виде терагерцового лазера с одной стороны, и матрица регистрации прошедшего излучения — с другой, будут расположены вплотную к контролируемому образцу для исключения прохождения излучения через иные среды, нежели материал изделия. Вышеуказанные условия необходимы для исключения влияния эффекта поляризации излучения в материале, а также исключения влияния границ изделия на дифракционную картину и преломления излучения при прохождении через границу между изделием и окружающей его средой (например, воздух). Алгоритм моделирования изображения дифракционной картины при прохождении монохромного излучения с миллиметровой длиной волны через изделие, выполненное из однородного изотропного материала и содержащее дефект (трещину), который приближенно может быть представлен в виде параллелепипеда, вытянутого вдоль оси Y (рисунок 1), состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Задаются размеры h , w , d дефекта (рисунок 2) и расстояние от центра дефекта до экрана с изображением дифракционной картины. Задается шаг интегрирования Δ .

Шаг 2. Выполняется обход поля изображения дифракционной картины с шагом в 1 пиксель.

Шаг 3. В каждой точке изображения с координатами (x_m, y_n) выполняется расчет комплексной амплитуды терагерцового сигнала по следующему алгоритму.

Шаг 3.1. Обнуляется начальное значение комплексной амплитуды в выбранной точке изображения на экране $U(x_m, y_n) = 0$.

Шаг 3.2. Внутри объема дефекта берется точка с координатами $(-w, -h, z_{\min})$ — левая нижняя наиболее удаленная точка внутри дефекта, если смотреть со стороны экрана.

Шаг 3.3. Рассчитывается расстояние r от точки (x_m, y_n) до точки $(-w, -h, z_{\min})$ внутри дефекта по формуле (6).

Шаг 3.4. Рассчитывается подинтегральное выражение формулы (5).

Шаг 3.5. Рассчитанное на шаге 3.4 значение добавляется к накапливаемому значению $U(x_m, y_n)$.

Шаг 3.6. Осуществляется переход в точку с координатами $(-w + \Delta, -h, z_{\min})$. Повторяются шаги 3.2-3.5. После этого происходит переход в точку $(-w + 2\Delta, -h, z_{\min})$ и так далее.

Шаг 3.7. После достижения точки $(w, -h, z_{\min})$ шаги 3.2-3.5 повторяются для точек $(-w, -h + \Delta, z_{\min})$, $(-w + \Delta, -h + \Delta, z_{\min})$, $(-w + 2\Delta, -h + \Delta, z_{\min})$ и так далее.

Шаг 3.8. После достижения точки (w, h, z_{\min}) шаги 3.2-3.5 повторяются для точек $(-w, -h, z_{\min}+\Delta)$, $(-w+\Delta, -h, z_{\min}+\Delta)$, ..., $(-w, -h+\Delta, z_{\min}+\Delta)$ и так далее. Таким образом, осуществляется интегрирование по формуле (5) по всему объему дефекта.

Шаг 4. В результате выполнения шагов 3.1-3.8 вычисляется комплексная амплитуда сигнала U для точки на экране с координатами x_m и y_n .

Шаг 5. Для всех точек экрана с шагом в 1 пиксель выполняются шаги 2-4. В результате вычисляется поле значений комплексных амплитуд сигнала на экране.

Шаг 6. По вычисленным на шаге 5 значениям комплексных амплитуд вычисляются значения интенсивности терагерцового сигнала в каждой точке экрана по формуле:

$$I(x_m, y_n) = U(x_m, y_n)U^*(x_m, y_n), \quad (8)$$

где $I(x_m, y_n)$ — интенсивность сигнала в точке экрана с координатами, $U(x_m, y_n)$ и $U^*(x_m, y_n)$ — амплитуда сигнала и величина, комплексно сопряженная с ней в этой же точке экрана.

5. Программа моделирования дифракционных картин. На листинге 1 представлена реализация алгоритма на языке C++.

```

for(int n=0, Y = -0.5*Ws; n<Vimage; n++, Y+=1.0)
{
    for(int m=0, X = -0.5*Hs; m<Himage; m++, X+=1.0)
    {
        Re = 0;
        Im = 0;
        for(double z = zmin; z <= zmax; z+=delta)
        {
            for(double y = -h; y <= h; y+=delta)
            {
                for(double x = -w; x <= h; x+=delta)
                {
                    Dx = x-X; Dy = y-Y;
                    r2 = Dx*Dx+Dy*Dy+z*z;
                    zOnr2lambda = z/(r2*lambda);
                    argCosSin = TwoPiOnLambda*sqrt(r2);
                    Re+=zOnr2lambda*cos(argCosSin);
                    Im+=zOnr2lambda*sin(argCosSin);
                }
            }
        }
        pfld->setSignal(m, n, Re, Im);
    }
}

```

Листинг 1. Моделирование дифракционной картины

Для моделирования дифракционных картин была разработана оригинальная компьютерная программа моделирования распределения комплексной амплитуды терагерцового сигнала в дифракционной картине. Первый и второй циклы выполняют попиксельный обход моделируемого изображения. Далее для каждой точки дифракционной картины выполняется численное интегрирование (5) в пределах контролируемого дефекта вдоль осей Z , Y и X с шагом δ . Результат интегрирования — комплексное число (Re , Im) — записывается для точки дифракционной картины с помощью метода *setSignal*.

После получения таким образом поля комплексных амплитуд *pfld* оно визуализируется в виде цифрового изображения. На рисунке 4 приведено в качестве примера изображение модели дифракционной картины для дефекта с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм, $w = 0,50$ мм, с расстоянием между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и при шаге интегрирования $0,05$ мм.

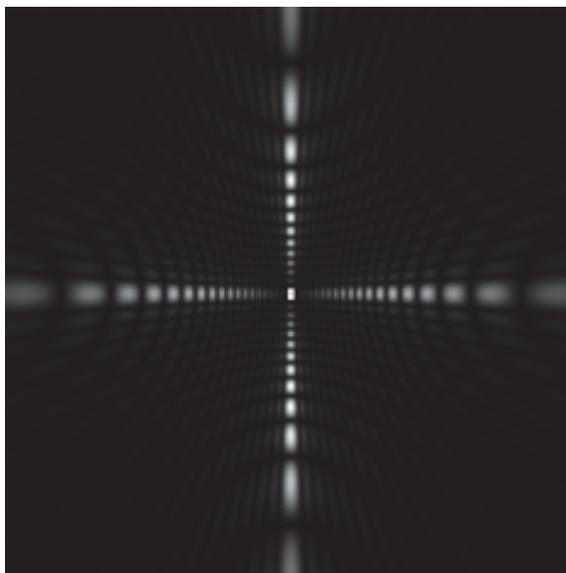


Рис. 4. Дифракционная картина дефекта с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм, $w = 0,50$ мм (расстояние между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и при шаге интегрирования $0,05$ мм)

Расстояния между соседними дифракционными максимумами определяются программно по методу, описанному в [25].

На рисунке 5 для сравнения приведена реальная дифракционная картина, появляющаяся на экране при освещении дефекта внутри однородной оптически прозрачной среды.

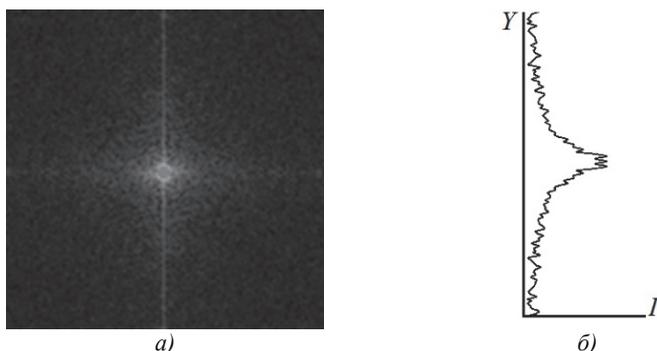


Рис. 5. Дифракционная картина реального дефекта с размерами $0,06 \times 1,91 \times 0,83$ мм (расстояние между контролируемым дефектом и экраном $L = 100,00$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,63$ нм)

Из приведенной на рисунке 5б диаграммы распределения интенсивности сигнала I видно присутствие дифракционных максимумов вдоль оси Y изображения, хотя и расположенных значительно чаще и не так четко выделяющихся на цифровой фотографии по сравнению с моделируемой дифракционной картине, что можно объяснить используемым источником излучения с более короткой волной.

6. Определение геометрических параметров внутренних дефектов по дифракционным картинам. С помощью программы моделирования дифракционной картины были построены и проанализированы изображения дифракционных картин для дефектов разных размеров.

В таблице 1 сведены средние расстояния между дифракционными максимумами в зависимости от размера исследуемых дефектов. Величины средних расстояний округлены до целых значений в миллиметрах.

Моделирование дифракционных картин проводилось при $L = 500$ мм, $\lambda = 0,1$ мм и шаге интегрирования $0,1$ мм.

Таблица 1. Зависимость среднего расстояния между дифракционными максимумами от размеров контролируемого дефекта

Трещина, размеры			Сред. расст. между диф. макс.	
d , мм	h , мм	w , мм	Δсред.гориз., мм	Δсред.вертик., мм
1,00	3,00	0,50	10	21
1,00	3,00	3,00	10	10
1,00	3,00	1,00	10	17
1,00	2,00	1,00	16	23
1,00	2,00	0,50	17	29

Для различных размеров дефекта наблюдались различные средние расстояния между дифракционными максимумами. Таким образом, составив библиотеку расчетных дифракционных картин, методом сравнения с картинами реальных объектов трехмерной печати можно определять характер внутренних дефектов. Как было указано выше, рассматриваемая в данной статье модель дифракции не учитывает возможной поляризации терагерцового излучения в материале изделия, выполненного по аддитивной технологии. Предполагается, что этот материал является изотропным с точки зрения распространения в нем миллиметровых волн. В случае поляризации излучения в материале, изготовленном, например, по технологии FDM, в расчетную модель по выражению (5) должны быть введены коэффициенты учета поляризации. Также в предложенном алгоритме моделирования могут быть учтены два и более дефектов. В этом случае интегрирование должно проводиться по нескольким областям, соответствующим моделируемым дефектам, что увеличивает объем вычислений и в дальнейшем поднимает проблему оптимизации алгоритма интегрирования. Следует также отметить, что предлагаемая компьютерная модель исходит из предположения, что при осуществлении дифракционного контроля качества с помощью терагерцового лазера поперечный диаметр его луча существенно меньше размеров изделия, что позволяет не учитывать в модели дифракции излучения на боковых границах изделия. С использованием программы [26] был проведен анализ интенсивности светового сигнала в моделируемом изображении дифракционной картины. Так как использовалось компьютерное изображение дифракционной картины дефекта, то интенсивность светового сигнала каждой точки (пикселя) изображения могло принимать целое значение от 0 до 255 (интенсивность центрального максимума). Полученные результаты сведены в таблицу 2.

Программа [26] вычисляла суммарную интенсивность всех пикселей изображения, среднюю интенсивность, то есть суммарную интенсивность, отнесенную к площади изображения, и дисперсию интенсивности для дефектов различного размера при длине волны $\lambda = 0,1$ мм, шаге интегрирования 0,01 мм и расстоянии от центра трещины до экрана $L = 100$ мм. Анализ суммарной и средней интенсивности показывает, что при одинаковых размерах сечения дефекта (ширина и высота) с увеличением его глубины снижаются суммарная и средняя интенсивности светового сигнала. Характерная зависимость средней интенсивности для трещины с $h = 1,00$ мм и $w = 0,50$ мм приведена на рисунке 6.

Таблица 2. Зависимость размеров центрального светового пятна и общих параметров интенсивности от размера дефекта в направлении распространения излучения

Трещина			Размеры центрального пятна		Параметры интенсивности пикселей изображения		
d, мм	h, мм	w, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Дисперсия	Сумм. интенсивн.	Сред. интенсивн.
0,50	1,00	0,50	9	11	30,316	29794	0,477
1,00	1,00	0,50	9	11	29,504	25089	0,398
1,50	1,00	0,50	7	10	29,433	22763	0,366
2,00	1,00	0,50	8	10	28,811	21223	0,341
2,50	1,00	0,50	9	11	28,188	20164	0,318
3,00	1,00	0,50	9	11	28,216	19230	0,306
1,00	3,00	0,10	9	4	12,557	12891	0,204
3,00	3,00	0,10	9	4	12,306	10812	0,171
1,00	3,00	0,25	9	4	12,051	12442	0,199
3,00	3,00	0,25	1	2	11,684	10512	0,166
1,00	3,00	1,50	9	7	10,584	11415	0,182
3,00	3,00	1,50	9	7	10,334	9817	0,156
1,00	3,00	2,00	9	6	11,746	12259	0,195
3,00	3,00	2,00	1	6	11,766	10585	0,171
1,00	3,00	2,50	9	10	11,373	12021	0,193
3,00	3,00	2,50	1	1	11,306	10453	0,169

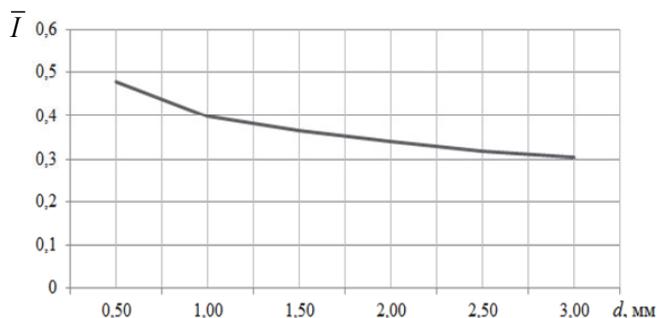


Рис. 6. Зависимость средней интенсивности светового сигнала от размера дефекта с параметрами $h = 1,00$ мм, $w = 0,50$ мм и $d \in [0,50; 3,00]$ мм в направлении распространения излучения

Выявленная зависимость позволяет, используя дифракционную картину, определять не только геометрические размеры сечения дефекта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, но и его глубину в направлении распространения излучения.

7. Определение расположения дефекта внутри изделия. Соизмеримость расстояний между источником излучения миллиметровых волн, объектом исследования и экраном означает возможность рассмотрения возникающей в этом случае дифракции в приближении Френеля. В этом случае на расположение дифракционных максимумов на экране влияют не только форма и размеры трещины, но и расстояние от трещины до экрана. Таким образом, появляется возможность определения примерного расположения дефекта на оси Z , то есть определения, в каком слое материала, полученном по аддитивной технологии, этот дефект находится.

В таблице 3 приведена зависимость среднего расстояния между соседними дифракционными максимумами, расположенными на оси X , от расстояния между трещиной внутри исследуемого объекта и плоскостью XU экрана с дифракционной картиной. Моделирование проводилось для трещины с размерами $d = 0,05$ мм, $h = 1,50$ мм и $w = 0,50$ мм при длине волны излучения $\lambda = 0,15$ мм и шаге интегрирования $0,05$ мм для величин расстояний между трещиной и экраном L от 70 мм до 100 мм.

Таблица 3. Зависимость среднего расстояния между дифракционными максимумами от расстояния L между трещиной и экраном

L , мм	$\bar{\Delta}$, мм
70,00	17,25
75,00	18,47
80,00	19,72
85,00	20,94
90,00	22,16
95,00	23,41
100,00	24,63

На рисунке 7 указанная зависимость изображена в виде графика.

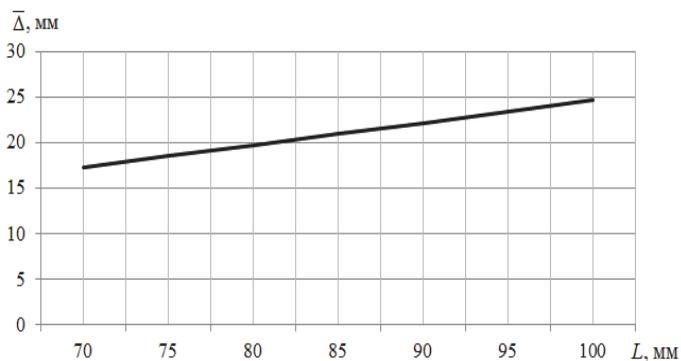


Рис. 7. Увеличение среднего расстояния между дифракционными максимумами с удалением трещины от экрана

Из приведенного графика следует, что с увеличением расстояния между трещиной и экраном, на котором проецируется дифракционная картина, возрастает и среднее расстояние между дифракционными максимумами.

8. Заключение. Приведенные данные свидетельствуют о том, что бесконтактную неразрушающую дефектоскопию изделий, изготовленных по аддитивной технологии из веществ, прозрачных для электромагнитного излучения с длинами волн 0,1-1 мм, можно осуществлять не только методом рентгеновской томографии, но и более безопасным (с точки зрения используемого излучения) и более простым (с точки зрения реализации) дифракционным методом, использующим терагерцовое монохромное излучение. Он позволяет в автоматическом режиме и с высокой скоростью, без проведения съемки с разных ракурсов и разрушения объекта исследования, не только выявлять наличие скрытого дефекта структуры в объекте, изготовленном по аддитивной технологии, но и оценивать его геометрические размеры и пространственное расположение в контролируемой детали. Для реализации предлагаемого метода достаточно источника когерентного излучения с фиксированной длиной волны в диапазоне от 0,1 до 1 мм и экрана, чувствительного к вышеуказанному излучению, с устройством преобразования интенсивности принятого сигнала в цифровой компьютерный формат.

Компьютерное моделирование дифракции миллиметровых волн позволяет получить изображения дифракционных картин для дефектов различных размеров, конфигурации и расположения внутри исследуемого объекта, что позволяет построить зависимости для определения

параметров дефекта на основании средней интенсивности светового сигнала и среднего расстояния между дифракционными максимумами. По этим зависимостям можно будет оценить характер и параметры реальных дефектов при сопоставлении моделируемых эталонных изображений с истинными дифракционными картинками, полученными при облучении терагерцовым лазером изделия, изготовленного по аддитивной технологии (решение обратной задачи).

При этом нет необходимости производить съемку объекта с нескольких ракурсов, как этого требует использование томографических методов, с последующим ресурсоемким решением достаточно сложных уравнений Радона. Информацию о расположении и геометрических размерах дефекта в трехмерном пространстве можно получить из анализа расположения дифракционных максимумов. Полученной таким образом информации достаточно для утверждения о присутствии дефекта в готовом изделии и принятия решения о более точном определении его местоположения и границ с помощью томографии либо вскрытии изделия и его перепечатывания, начиная с дефектного слоя, или оценки прочностных характеристик изделия с учетом присутствия дефекта и принятия решения о допустимости его использования либо отбраковки.

Литература

1. Григорьев С.Н., Смуров И.Ю. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. 2013. № 10(180). С. 76–82.
2. Lee M.P. et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography // Scientific Reports. 2015. vol. 5. no. 9875.
3. Han S. et al. Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. vol. 2017. Article ID 2095137.
4. Shirazi S.F.S. et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing // Science and Technology of Advanced Materials. 2015. vol. 16. no. 3(033502).
5. Gu B.K. et al. 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications // Bio-materials Research. 2016. vol. 20. no. 12.
6. Клюев В.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / под ред. В. В. Клюева // М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
7. Zhang X. C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics // Springer Science & Business Media. 2010. 246 p.
8. Carr G.L. et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons // Nature. 2002. vol. 420. pp. 153–156.
9. Кулипанов Г.Н. Лазеры на свободных электронах: новый этап развития // Наука в Сибири. 2010. № 50(2785). С. 4.
10. Tan P. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // Science China Information Sciences. 2012. vol. 55. Issue 1. pp. 1–15.
11. Kulipanov G.N. et al. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. vol. 5. Issue 5. pp. 798–809.
12. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs // Materials Today. 2008. vol. 11. Issue. 3. pp. 18–26.

13. *Leahy-Hoppa M.R.* Terahertz For Weapon And Explosive Detection // WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. 2012. vol. 54. pp. 207–220.
14. *Воронин С.А., Сохабеев В.М.* Использование терагерцовых технологий в до-смотровой технике обеспечения авиационной безопасности // Научный вестник ГОСНИИ ГА. 2012. № 2(313). С. 116–121.
15. *Lee Y.-S.* Principles of Terahertz Science and Technology // Springer Science & Business Media. 2009. 340 p.
16. *Gatesman A.J. et al.* Terahertz Behavior of Optical Components and Common Materials // Technical rept. Massachusetts Univ Lowell Submillimeter-Wave Tech Lab. 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/228718575_Terahertz_Behavior_of_Optical_Components_and_Common_Materials (дата обращения: 31.12.2017).
17. *Bolotin V.P. et al.* A project of accelerator-recuperator for Novosibirsk high-power FEL // Physics of particles and nuclei letters. 2006. vol. 3. pp. S40–S42.
18. *Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Кочкарев Д.В., Кузнецов М.В.* Способ изготовления детекторов терагерцового диапазона // Патент РФ 2545497. 2015.
19. *Коротав В.В. и др.* Основы тепловидения // СПб: НИУ ИТМО. 2012. 122 с.
20. *Марусина М.Я., Казначеева А.О.* Современные виды томографии. Учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2006. 132 с.
21. *Deans S.R.* The Radon Transform and Some of Its Applications // Courier Corporation. 2007. 295 p.
22. *Кофнов О.В.* Система компьютерного моделирования дифракции для измерения геометрических параметров структуры текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2014. № 2. С. 38–45.
23. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория поля. т.2 // М.: Наука. 1988. 509 с.
24. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику // М.: Мир. 1970. 364 с.
25. *Кофнов О.В.* Модель и алгоритмы измерения геометрических параметров структур текстильных материалов // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 5(42). С. 90–111.
26. *Михайленко А.В., Лебедев Е.Л., Кофнов О.В.* Программа обработки данных цифровых изображений // 2017. № 2017611188.

Кофнов Олег Владимирович — к-т техн. наук, научный сотрудник кафедры информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна (СПбГУПТД). Область научных интересов: технология производства материалов, машинное зрение, обработка астрономических каталогов, программирование на Java и C#. Число научных публикаций — 17. kofnov@mail.ru; Большая Морская ул., 18, Санкт-Петербург, 191186; р.т.: +7(812)9413288.

Лебедев Евгений Леонидович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: бесконтактные методы контроля качества. Число научных публикаций — 64. zlebedev@yandex.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7812)347-9511.

Михайленко Александр Владимирович — адъюнкт кафедры контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: бесконтактные методы контроля качества. Число научных публикаций — 11. tihaxis@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-9511.

O.V. KOFNOV, E.L. LEBEDEV, A.V. MIKHAILENKO
**COMPUTER SIMULATION OF THE DIFFRACTION OF
 MILLIMETER ELECTROMAGNETIC WAVES TO DETECT
 INTERNAL DEFECTS OF PRODUCTS MADE USING ADDITIVE
 TECHNOLOGY**

Kofnov O.V., Lebedev E.L., Mikhailenko A.V. Computer Simulation of the Diffraction of Millimeter Electromagnetic Waves to Detect Internal Defects of Products Made using Additive Technology.

Abstract. The article describes the computer model of using electromagnetic waves with lengths from 0.1 mm to 1 mm for detection of internal defects of products made by additive technology.

Now additive technology and 3D printing use materials transparent for terahertz waves (frequency $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{12}$ Hz, wave length 0.1-1 mm). At the same time, defects in 3D printed products have sizes like a terahertz wave's length. Thus the Fresnel diffraction can be observed during illumination of a product with the same defects by monochromatic milliwaves.

Thereby the simulated diffraction method for 3D printed products quality checking can be applied. In this article the checking scheme, the diffraction pattern modeling algorithm using the Rayleigh – Sommerfeld integral, and the computer programme for this algorithm are described. The determination of sizes and positions of defects in products using diffraction patterns is shown.

The proposed diffraction method is fully automated and low-cost, uses safety electromagnetic radiation and can compete with tomography methods.

Keywords: additive technology, 3D printing, terahertz, diffraction, non-destructive quality checking, computer modeling, image processing.

Kofnov Oleg Vladimirovich — Ph.D., researcher of the information technology department, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (SPbSUITD). Research interests: technology, machine vision, astronomical catalogs processing, Java and C# programming. The number of publications — 17. kofnov@mail.ru; 18, Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg 191186, Russia; office phone: +7(812)9413288.

Lebedev Eugeny Leonidovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of quality control and testing of weapon department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: non-contact quality control methods. The number of publications — 64. zlebedev@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7812)347-9511.

Mikhailenko Aleksandr Vladimirovich — Ph.D. student of quality control and testing of weapon department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: non-contact quality control methods. The number of publications — 11. tihaxis@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-9511.

References

1. Grigor'ev S.N., Smurov I.Y. [Prospects for the development of innovative additive production in Russia and abroad]. *Innovacii – Innovations*. 2013. vol. 10(180). pp. 76–82. (In Russ.).
2. Lee M.P. et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography. *Scientific Reports*. 2015. vol. 5. no. 9875.
3. Han S. et al. Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. vol. 2017. Article ID 2095137.
4. Shirazi S.F.S. et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2015. vol. 16. no. 3 (033502).

5. Gu B.K. et al. 3-dimensional bioprinting for tissue engineering applications. *Bio-materials Research*. 2016. vol. 20. no. 12.
6. Klyuev V.V. et al. *Nerazrushayutshiy kontrol I diagnostika. Pod red. V.V. Klyueva* [Non-destructive quality checking and diagnosis. Edited by V.V. Klyuev]. M.: Mashinostroenie. 1995. 488 p. (In Russ.).
7. Zhang X. C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics. Springer Science & Business Media. 2010. 246 p.
8. Carr G.L. et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons. *Nature*. 2002. vol. 420. pp. 153–156.
9. Kulipanov G.N. [Free-electron lasers: the new stage of development]. *Nauka v Sibiri – Science in Siberia*. 2010. vol. 50(2785). pp. 4. (In Russ.).
10. Tan P. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications. *Science China Information Sciences*. 2012. vol. 55. Issue 1. pp. 1–15.
11. Kulipanov G.N. et al. Novosibirsk free electron laser – facility description and recent experiment. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015. vol. 5. Issue 5. pp. 798–809.
12. Davies A.G. et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*. 2008. vol. 11. Issue 3. pp. 18–26.
13. Leahy-Hoppa M.R. Terahertz For Weapon And Explosive Detection. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. 2012. vol. 54. pp. 207–220.
14. Vorinin S.A., Sohabeev V.M. [Using the terahertz technology for air safety control devices]. *Nauchn'y vestnik GOSNII GA – Scientific bulletin of the Civil Aviation State Research Institute*. 2012. vol. 2(313). pp. 116–121. (In Russ.).
15. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer Science & Business Media. 2009. 340 p.
16. Gatesman A.J. et al. Terahertz Behavior of Optical Components and Common Materials. Technical rept. Massachusetts Univ Lowell Submillimeter-Wave Tech Lab. 2006. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228718575_Terahertz_Behavior_of_Optical_Components_and_Common_Materials (accessed: 31.12.2017).
17. Bolotin V.P. et al. A project of accelerator-recuperator for Novosibirsk high-power FEL. *Physics of particles and nuclei letters*. 2006. vol. 3. pp. S40–S42.
18. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Kochkarev D.V., Kuznetsov M.V. *Sposob izgotovleniya detectorov terahertzovogo diapazona* [Method of producing terahertz detectors]. Patent RF. no. 2545497. 2015. (In Russ.).
19. Korotayev V.V. et al. *Osnovy teplovideniya* [The basis of thermography]. SPb: ITMO. 2012. 122 p. (In Russ.).
20. Marusina M.Ya., Kaznacheeva A.O. *Sovremenn'ye vidy tomographii* [The modern tomography types]. SPb: ITMO. 2006. 132 p. (In Russ.).
21. Deans S.R. The Radon Transform and Some of Its Applications. Courier Corporation. 2007. 295 p.
22. Kofnov O.V. [Diffraction Simulation System for Measuring Geometrical Parameters of Structure of Textile Materials]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna – Vestnik of Saint Petersburg state university of technology and design*. 2014. vol. 2. pp. 38–42. (In Russ.).
23. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. Teoriya polya* [Theoretical physics. Field theory]. M.: Nauka. 1988. 509 p. (In Russ.).
24. Goodman J.W. *Introduction to Fourier optics*. McGraw-Hill book company. 1968. 287 p. (Russ. ed.: Gudm Dzh. *Vvedeniye v Fourier optiku*. M.: Mir. 1970. 364 p.).
25. Kofnov O.V. [Model and Algorithms for Measurement of Geometric Parameters in Textile Structures.]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 5(42). pp. 90–111. (In Russ.).
26. Mikhailenko A.V., Lebedev E.L., Kofnov O.V. *Programma obrabotki dannyh tzirovyyh izobrazheniy* [The program for digital images processing]. 2017. no. 2017611188. (In Russ.).