

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ЦИФРОВОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

© 2021 г. С.П. Осипов^{1,*}, Е.Ю. Усачев², С.В. Чахлов^{1,**}, О.С. Осипов³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

²МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр. Вернадского, 78

³Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59

E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021; после доработки 24.09.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Предложена имитационная модель исследования структуры объекта методом послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии). Разработанная модель учитывает геометрическую схему контроля, параметры источника и блока регистрации гамма-излучения, оснащенного специальной системой коллиматоров. Имитационная модель способа реализована в виде программы в системе MathCad. Возможности имитационной модели и соответствующей программы продемонстрированы для алюминиевого барьера со сферическими локальными включениями.

Ключевые слова: геометрия одностороннего доступа, гамма-излучение, цифровая комптоновская радиография, комптоновская томография, распределение плотности, внутренняя структура.

DOI: 10.31857/S0130308221100079

ВВЕДЕНИЕ

Существует значимое ограничение, касающееся классических (трансмиссионных) реализаций цифровой радиографии (ЦР) и компьютерной томографии (КТ). Это ограничение касается взаимного пространственного расположения источника рентгеновского (гамма-, тормозного) излучения, далее источника излучения (ИИ), регистратора излучения (РИ) и объекта контроля (ОК). В трансмиссионных реализациях ЦР и КТ источник и регистратор излучения располагаются с противоположных сторон объекта контроля [1—6]. Такая модель геометрии контроля называется геометрией двустороннего доступа. Для многих технических объектов геометрия двустороннего доступа является нереализуемой. К подобным объектам относятся [7—10], например, крупногабаритные изделия с внутренними полостями с необходимостью контроля изнутри или изделия с толщиной, превышающей проникающую способность излучения по материалу изделия, с необходимостью контроля приповерхностных зон. Актуальность совершенствования и разработки методов и средств ЦР и КТ, основанных на анализе полей рассеянных фотонов, не вызывает сомнений. Среди различных реализаций упомянутых методов и систем выделяется послойная комптоновская радиография [11]. В работе [7] отмечается недостаточная эффективность подхода [11] к формированию комптоновских изображений слоев испытуемого объекта с помощью камеры обскуры. Совершенствование детекторов и систем коллиматоров первичного и вторичного излучения, а также развитие алгоритмов обработки полученной информации, существенно снижают роль отмеченного недостатка и переводят метод послойной цифровой комптоновской радиографии (ПЦКР) на более высокий уровень [12]. При проектировании систем ПЦКР возникает ряд сложностей, связанных с проверкой принципа технической реализуемости применительно к конкретной задаче проектирования. Здесь под конкретной задачей проектирования понимается совокупность требований, ограничений и ожиданий, сформулированных заказчиком или конечным потребителем проектируемых диагностических и измерительных систем. Проверка принципа технической реализуемости сводится к обоснованию технической возможности, то есть развернутому ответу на вопрос о существовании источников и регистраторов фотонного излучения, механических систем перемещения, объединение которых в единый комплекс позволит осуществлять исследование объектов с заданным уровнем качества. Качество трансмиссионных систем ЦР и КТ определяет ряд параметров, среди которых выделяют радиационную чувствительность (радиационный контраст), пространственное разрешение, вероятность обнаружения заданной неоднородности (дефекта, локального включения), точность измерения параметров объекта контроля, производительность контроля и т.п. Для систем ПЦКР, помимо оценки отмеченных выше параметров, следует ответить на вопрос об изменении этих параметров по глубине интересующего потребителя слоя (сечения).

Выбор элементов систем ПЦКР и оценка отмеченных выше параметров экспериментальным путем является затратным и не гарантирует решение задачи проектирования. В настоящее время имитационное моделирование становится базовым методом для обоснования возможности проектирования систем ЦР, КТ и комптоновской радиографии [13—15]. Необходимо разработать имитационную модель и программу, ее реализующую, для рассматриваемого типа систем.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПОСЛОЙНОЙ ЦИФРОВОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

Математическую модель формирования исходных изображений в ПЦКР определяет геометрическая схема сканирования объекта контроля. Для формирования искомых изображений будем придерживаться схемы сканирования, близкой к схеме из работы [8]. Ниже приведем ее краткое описание.

1.1. Геометрическая схема сканирования объекта контроля в цифровой комптоновской радиографии

Геометрическая схема сканирования объекта контроля в ПЦКР должна отвечать ряду требований, связанных с обеспечением требований заказчика, сформулированных в техническом задании на проектирование. Одним из основных требований является высокая производительность контроля, то есть интегральное время, затрачиваемое на формирование всей необходимой совокупности исходных изображений в ПЦКР. Очевидно, что максимальная производительность достигается в случае формирования всех необходимых исходных изображений за одно сканирование.

На рис. 1 приведена геометрическая схема сканирования ОК в ПЦКР. Система ПЦКР состоит из следующих основных технических и «виртуальных» элементов:

- источника фотонного излучения 1, в качестве которого могут быть использованы γ -радионуклиды, рентгеновские аппараты, ускорители электронов;
- щелевого коллиматора источника фотонов 2;
- специальным образом организованного коллиматора 3 регистратора фотонного излучения 4;
- механизма перемещения 5 объекта контроля 6 относительно фиксированных источника 1 и регистратора фотонного излучения 4 с системой коллиматоров 3;
- части пространства $\mathbb{R}^3$, ограничиваемого плоскостями 7 и 8 и «просматриваемого» коллиматорами регистратора;
- исследуемой области объекта контроля 9, которую можно считать источником вторичного фотонного излучения.

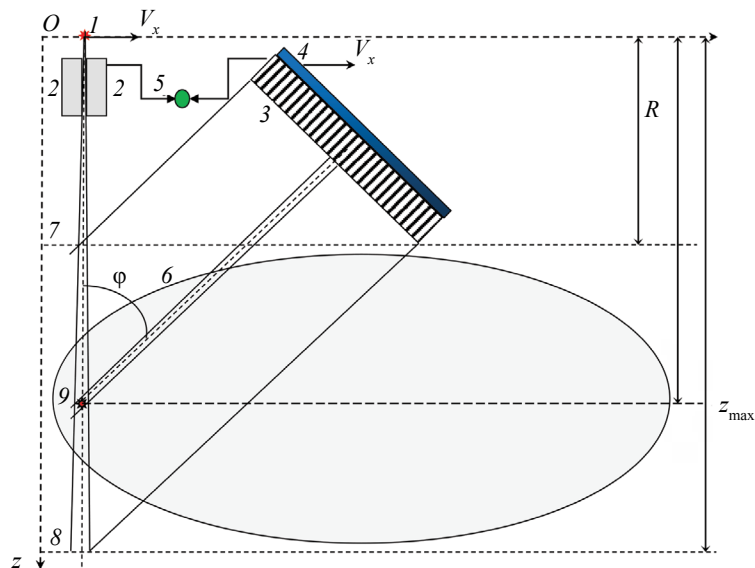


Рис. 1. Схема сканирования объекта контроля в комптоновской цифровой радиографии:

1 — источник фотонного излучения; 2 — щелевой коллиматор источника фотонов; 3 — коллиматор регистратора фотонов; 4 — регистратор фотонного излучения; 5 — механизм перемещения; 6 — объект контроля; 7, 8 — плоскости, ограничивающие часть пространства, «просматриваемого» коллиматорами регистратора; 9 — источник вторичного фотонного излучения.

Отметим, что контролируемая область объекта контроля может отличаться от всего объема ОК. Классическим примером такой ситуации является задача оценки внутренней структуры приповерхностного слоя объекта контроля [10, 16], находящегося в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации.

Для повышения производительности сканирования в проектируемых приборах, предназначенных для оценки внутренней структуры методом ПЦКР, в качестве регистраторов фотонного излучения используют панельные или матричные многоканальные детекторы [17, 18]. При ненадлежащей частоте опроса детекторов (времени формирования цифрового сигнала (ЦС) с единичного детектора регистратора излучения) при сканировании в ОК в направлении OX в формируемых изображениях могут наблюдаться «мертвые» зоны. Пусть коллиматоры регистратора имеют отверстия с квадратным сечением $a \times a$. Для толщины коллиматора l должно соблюдаться ограничение $l \gg a$. Для исключения (смягчения) влияния мертвых зон на качество контроля должно соблюдаться следующее условие:

$$V_X t < a \cos \varphi, \quad (1)$$

здесь φ — угол между осями коллиматоров РИ и щелевым коллиматором ИИ.

Для устранения пропуска мертвых зон в направлении, перпендикулярном направлению сканирования, проводят дополнительное сканирование (сканирования) со сдвигом в перпендикулярном направлении.

1.2. Базовые закономерности формирования цифровых радиографических изображений в комптоновской цифровой радиографии

Математические модели формирования цифровых радиографических изображений в системах послылой цифровой комптоновской радиографии базируются на закономерностях ослабления, рассеяния и регистрации фотонного излучения.

Для удобства свяжем ось z декартовой системы координат $OXYZ$ с центром излучающей поверхности ИИ (см. рис. 1). Плоскость δ ограничивает часть пространства, «просматриваемого» коллиматорами ИИ и РИ. Координата z изменяется в диапазоне от 0 до $z_{\max}$. Для геометрии сканирования, приведенной на рис. 1, слой центральной плоскости объекта контроля $z = z_0$ соотносится со своей группой детекторов.

Расстояние $z_{\max}$ от ИИ до плоскости $z = z_{\max}$ не изменяется в процессе сканирования.

Для четкого понимания процессов формирования и обработки информации в послылой цифровой комптоновской радиографии выберем в качестве излучателя фотонов моноэнергетический источник гамма-излучения с энергией E_0 .

При сканировании ОК узким (щелевым) пучком гамма-излучения линейкой детекторов, ассоциированных с плоскостью $z = z_0$, формируется цифровое комптоновское радиографическое изображение слоя:

$$N^{z_0} = \{N_s^{z_0}(x, y) | -A \leq x \leq A, -B \leq y \leq B\}. \quad (2)$$

Замечание 1. Цифровое изображение N^{z_0} сопоставляется со слоем z_0 , но в этом изображении содержится информация о слоях, лежащих выше.

В формуле (2) точка с координатами (x, y) для слоя z_0 совпадает с центром соответствующего рассеивающего объема $V^{z_0}(x, y)$.

Рассмотрим счетный режим регистрации гамма-излучения. Пусть источник гамма-излучения с энергией E является точечным. Источник излучает N_0 частиц в единицу времени на единицу площади на заданном расстоянии, например, 1 м. В качестве радиационных преобразователей (РП) регистраторов излучения могут быть использованы сцинтилляционные материалы (собственно сцинтилляторы и сцинтилляционная керамика) или полупроводники. Радиационные преобразователи характеризуются плотностью ρ_d , эффективным атомным материалом Z_d и толщиной h_d . Количество фотонов, рассеянных в объеме $V^{z_0}(x, y)$ в направлении соответствующего РП и зарегистрированных в нем за время t , оценивается с помощью следующей формулы:

$$N_s^{z_0}(x, y) \approx \text{int} \left(N_0 t \Omega^{z_0} V^{z_0}(x, y) \frac{d\sigma_{\text{KNT}}(E, \theta)}{d\Omega} \rho_e \Omega_s \exp(-P_n^{z_0}(x, y) - P_s^{z_0}(x, y)) \epsilon(E_s, h_d) \right), \quad (3)$$

где $\text{int}(\arg)$ — целая часть аргумента $\arg$; Ω^{z_0} — телесный угол, определяемый объемом $V^{z_0}(x, y)$; $\Omega_s^{z_0}$ — телесный угол, вырезаемой детектором; E_s — энергия фотонов, рассеянных на угол $\theta = \pi - \varphi$; $\frac{d\sigma_{\text{KNT}}(E, \theta)}{d\Omega}$ — распределение фотонов по углу рассеяния (формула Клейна-Нишины-Тамма); ρ_e — плотность электронов; $P_n^{z_0}(x, y)$ — толщина ОК в д.с.п. для первичных фотонов по лучу, соединяющему центр излучающей поверхности ИИ с рассеивающим объемом; $P_s^{z_0}(x, y)$ — толщина ОК в д.с.п. для рассеянных фотонов по лучу, соединяющему центр рассеивающего объема $V^{z_0}(x, y)$ с центром соответствующего детектора РИ; $\varepsilon(E_s, h_d)$ — эффективность регистрации. Плотность электронов ρ_e определяется плотностью ρ , атомным номером Z , молярной массой M_Z и числом Авогадро N_A [18]:

$$\rho_e = \frac{\rho N_A Z}{M_Z}. \quad (4)$$

Выражение (3) объединяет несколько закономерностей взаимодействия гамма-излучения с веществом: ослабление нерассеянного и рассеянного излучения; вероятность рассеяния фотона под заданным углом; геометрическое ослабление для источников первичных и вторичных фотонов.

1.3. Формирование полутоновых послойных изображений в комптоновской цифровой радиографии

Продemonстрируем, как в рассматриваемом варианте комптоновской цифровой радиографии формируется полутоновое изображение $\mathbf{G}^{z_0}$ для слоя $z = z_0$. Формула, описывающая связь изображений $\mathbf{G}^{z_0}$ и $\mathbf{N}^{z_0}$, имеет вид:

$$\mathbf{G}^{z_0} = \left\{ G_s^{z_0}(x, y) = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \frac{N_s^{z_0}(x, y) - C_{\min}^{z_0}}{C_{\max}^{z_0} - C_{\min}^{z_0}} \mid -A \leq x \leq A, -B \leq y \leq B \right\}, \quad (5)$$

здесь $P_{\min}$, $P_{\max}$ — минимальный и максимальный уровни серого тона, удобные для визуального восприятия; $C_{\min}^{z_0}$, $C_{\max}^{z_0}$ — минимальные и максимальные значения яркости либо по изображению $\mathbf{N}^{z_0}$ (первый вариант), либо по всей совокупности изображений в целом (второй вариант). В первом варианте все изображения в случае наличия рассеивающих и нерассеивающих объемов контрастны. Второй же вариант позволяет проиллюстрировать степень увеличения ослабления первичного и рассеянного излучений по глубине ОК.

2. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛОЙНОЙ КОМПТОНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

Имитационная модель послойной комптоновской радиографии состоит из нескольких основных блоков: исходные данные модели; моделирование внутренней структуры ОК; формирование цифровых послойных радиографических изображений; визуализация послойных изображений комптоновской радиографии. Остановимся подробнее на вышеотмеченных блоках.

2.1. Исходные данные

Объем информации в блоке исходных данных определяется структурой исследуемого комплекса комптоновской радиографии, которая состоит из источника излучения с коллиматором, многоканального детектора с соответствующим коллиматором, устройства сканирования. В силу жесткости коллимации первичного и вторичного пучков излучения можно принять модель однократного рассеяния излучения.

2.1.1. Источник излучения с коллиматором

Для обеспечения высокой скорости моделирования рассмотрим источник моноэнергетического гамма-излучения.

Источник излучения применительно к рассматриваемому случаю можно характеризовать двумя параметрами: энергией излучения E_0 ; количеством фотонов n_0 , излучаемых за время t в телесном угле, соответствующем источнику вторичного излучения для конкретного канала детектора; углом φ_0 между осью пучка излучения и нормалью к плоскости γ (см. рис. 1), например, $\varphi_0 = 0^\circ$.

2.1.2. Детектор излучения с системой коллиматоров

Для обеспечения высокой производительности моделирования выберем счетный режим регистрации рассеянных фотонов. Будем считать каналы детектора идентичными.

Основными параметрами канала детектирования являются: материал радиационного преобразователя (плотность ρ и химическая формула); толщина РП; поперечные размеры РП $a \times b$; угол θ между нормалью к плоскости γ и осями коллиматоров каналов; время измерения t . Нормаль направлена в сторону, противоположную источнику излучения. Образец одной из таких систем коллиматоров приведен в работе [9].

2.1.3. Устройство сканирования

Формирование послойных изображений в комптоновской радиографии может быть реализовано с помощью дискретного или непрерывного сканирования. В первом случае устройство сканирования характеризуется шагом по оси x — h_x , а во втором случае — скоростью сканирования V_x . Следует отметить очевидную связь параметров для отмеченных вариантов:

$$h_x = V_x t. \quad (6)$$

Из (6) вытекает, что параметр h_x характеризует устройство сканирования.

2.2. Моделирование внутренней структуры объекта контроля

Независимо от конкретного способа радиационного исследования внутренней структуры объекта контроля считается полностью определенным, если известны распределения плотности ρ и эффективного атомного номера Z материала по объему ОК V , $V \subset \mathbb{R}^3$. Указанное условие описывается следующим выражением:

$$(\forall (x, y, z) \in V, \exists \rho(x, y, z) \wedge \exists Z(x, y, z)) \wedge (\forall (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \setminus V, \rho(x, y, z) = 0, Z(x, y, z) = 0). \quad (7)$$

В цифровой радиографии и рентгеновской компьютерной томографии как на стадии проектирования, так и на этапе оценки параметров систем широко используются фантомы правильной формы с локальными включениями в виде шаров и кубов, лучевые толщины которых могут быть оценены аналитически [19].

2.3. Формирование послойных цифровых комптоновских радиографических изображений

Алгоритм формирования цифровых послойных радиографических изображений основывается на обобщающем выражении (3). Это выражение нуждается в пояснениях и уточнениях, способствующих лучшему пониманию функционирования алгоритма и повышению его производительности.

Пусть толщина зоны интереса равна H , здесь указанная зона располагается между плоскостями γ и δ , см. рис. 1. Рассмотрим особенности построения цифровых комптоновских изображений для k -го слоя, $k = 1..N_z$. Слой с номером k ассоциируется с центром слоя z_k :

$$z_k = \frac{h_z}{2} + (k-1)h_z, k = 1..K, h_z = \frac{H}{K}. \quad (8)$$

Искомое цифровое изображение слоя N^i представляет собой распределение числа рассеянных фотонов по сетке:

$$(x_i, y_j), x_i = (i-1)h_x, y_j = (j-1)h_y, i = 1..I, j = 1..J, \quad (9)$$

здесь h_x, h_y — шаги по осям x и y , $h_x < a$, $h_y = b$.

2.3.1. Ослабление первичного потока фотонов до i -го слоя

С учетом параметра n_0 , введенного выше, количество фотонов N_{ij}^k , дошедших до рассеивающего объема, находится с помощью выражения:

$$N_{ij}^k \approx n_0 e^{-P_i(i,j,k)}, \quad (10)$$

здесь $P_i(i, j, k)$ — толщина ОК в д.с.п. по лучу, соединяющему излучающую точку и центр источника вторичного фотонного излучения (x_i, y_j, z_k) .

Формула для оценки величины $P_i(i, j, k)$ для $\varphi = 0$ имеет вид:

$$P_i(i, j, k) = \int_0^{z_k - R} \rho(x_i, y_j, L + R) m(E_0, Z(x_i, y_j, L + R)) dL, \quad (11)$$

здесь R — расстояние от источника излучения до плоскости 7 (см. рис. 1); $m(E_0, Z(x_i, y_j, L))$ — массовый коэффициент ослабления гамма-излучения с энергией E_0 ; $Z(x_i, y_j, L)$ — эффективный атомный номер в точке с координатами (x_i, y_j, L) .

2.3.2. Доля фотонов, рассеянных в направлении детектора

Часть фотонов w_s , испытавших взаимодействие с веществом в объеме $V(x_i, y_j, z_k)$, рассеивается в направлении соответствующего детектора:

$$w_s \approx \frac{f_{\text{KNT}}(E_0, \theta) \rho(x_i, y_j, z_k) N_A Z(x_i, y_j, z_k)}{M(Z(x_i, y_j, z_k))} d\Omega_k, \quad (12)$$

здесь $f_{\text{KNT}}(E_0, \theta)$ — формула Клейна—Нишины—Тамма; M — молярная масса; N_A — число Авогадро; $d\Omega_i$ — телесный угол соответствующего детектора.

Следует отметить, что в случае выполнения равенства плотности нулю, то есть $\rho(x_i, y_j, z_k) = 0$, величина $w_{su} = 0$.

Формула для вычисления телесного угла $d\Omega_i$ имеет вид:

$$d\Omega_i = \frac{ab}{4\pi(z_i \cos(\varphi))^2}. \quad (13)$$

2.3.3. Ослабление и регистрация рассеянного излучения

Угол рассеяния θ для всех слоев один и тот же, поэтому и энергия рассеянных фотонов $E_s(E_0, \theta)$ одна и та же:

$$E_s(E_0, \theta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{511} \cdot (1 - \cos \theta)}. \quad (14)$$

Выражение для оценки количества рассеянных фотонов Ns_{ij}^k , зарегистрированных детектором, выглядит следующим образом:

$$Ns_{ij}^k \approx N_{ij}^k w_i e^{-P_s(i,j,k)}, \quad (15)$$

где $P_s(i, j, k)$ — толщина части ОК в д.с.п. по лучу, соединяющему центр источника вторичного фотонного излучения (x_i, y_j, z_k) и центр соответствующего детектора.

Величина $P_s(i, j, k)$ вычисляется по формуле:

$$P_s(i, j, k) = \int_0^{\frac{z_k - R}{\cos \varphi}} \rho(x_i + L \sin \varphi, y_j, z_k - L \cos \varphi) m(E_s, Z(x_i + L \sin \varphi, y_j, z_k - L \cos \varphi)) dL. \quad (16)$$

Совокупность формул (6)—(16) представляет собой имитационную модель формирования послойных цифровых комптоновских радиографических изображений. При наличии формульного описания ОК эта имитационная модель легко трансформируется в программу на MathCad. Выбор в пользу системы для математических вычислений MathCad обусловлен близостью ее языка и языка математики, что существенно упрощает понимание соответствующих программ и возможность их использования в учебном процессе.

3. ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом для имитационного моделирования был выбран однородный барьер из алюминия толщиной $H = 25$ мм, а в качестве источника гамма-излучения — радиоизотоп Cs-137 с энергией $E_0 = 661$ кэВ. Расстояние от источника до фронтальной поверхности барьера $R = 50$ мм. Угол $\varphi = 45^\circ$, $a = b = 0,2$ мм, $h_x = h_y = h_z = 0,15$ мм, $n_0 = 10^{14}$. В качестве радиационных преобразователей использованы сцинтилляторы CsI толщиной 1 мм.

Для иллюстрации рассмотрим объект с четырьмя сферическими включениями радиусом $r_{s1} = r_{s2} = r_{s3} = r_{s4} = 2$ мм, плотностью материала сфер $\rho_{s1} = \rho_{s2} = \rho_{s3} = \rho_{s4} = 1$ г/см³, координатами центров сфер

$$\begin{pmatrix} x_{s1} & x_{s2} & x_{s3} & x_{s4} \\ y_{s1} & y_{s2} & y_{s3} & y_{s4} \\ z_{s1} & z_{s2} & z_{s3} & z_{s4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30 \text{ мм} & 35 \text{ мм} & 40 \text{ мм} & 45 \text{ мм} \\ 6 \text{ мм} & 11 \text{ мм} & 16 \text{ мм} & 21 \text{ мм} \\ 55 \text{ мм} & 60 \text{ мм} & 65 \text{ мм} & 70 \text{ мм} \end{pmatrix}.$$

Эффективный атомный номер материала сфер близок к 13.

3.1. Результаты имитационного моделирования

На рис. 2 приведены цифровые комптоновские изображения слоев на глубине от 3 мм до 24 мм. При визуализации полутоновых изображений, сформированных с помощью (5), использовался смешанный вариант $N_{\min} = \min_{i,j,k} (Ns_{ij}^k)$, $C_{\max k} = \max(Ns^k)$. Этот вариант позволяет осуществить визуальное сравнение изображений. На приведенных изображениях более светлым тонам соответствуют большие количества зарегистрированных фотонов, а более темным — меньшие.

Из анализа приведенных данных можно сделать вывод о применимости разработанной имитационной модели для решения задачи проектирования систем ПЦКР для контроля объектов с односто-

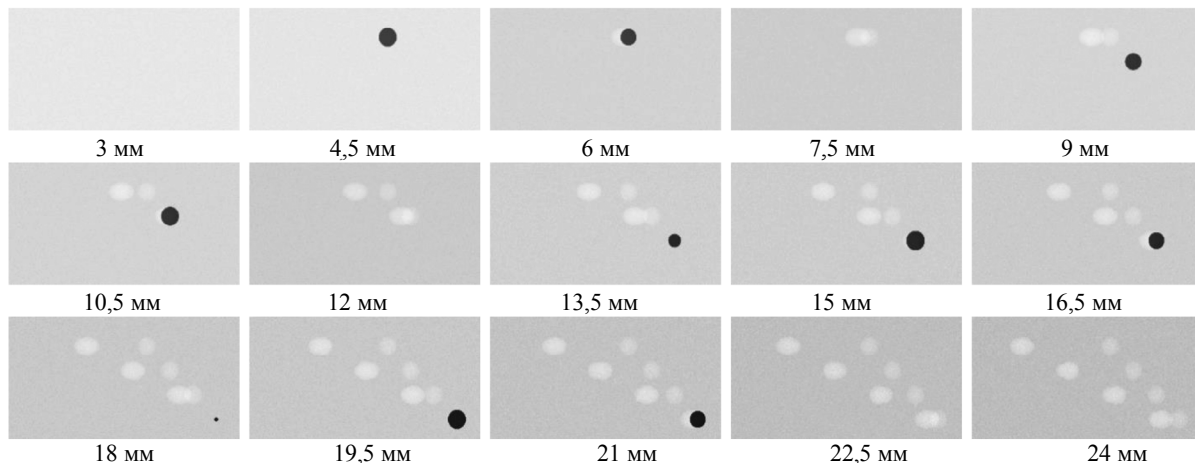


Рис. 2. Визуальные комптоновские изображения ОК из алюминия со сферическими включениями по слоям.

ронным доступом. Несмотря на корректировку яркости слоев при визуализации, фон изображений слоев темнеет с увеличением глубины слоев. Следует также отметить, что тени локальных включений наблюдаются на изображениях слоев, удаленных от источника вторичных фотонов. Результаты моделирования подтверждают основные выводы из статьи [12] относительно теней локальных включений. Наличие отмеченных теней локальных включений на изображениях нижних слоев является мешающим фактором. Впрочем, существуют алгоритмы, снижающие вклад отмеченных теней в итоговые изображения [12] и превращающие описанный выше метод в полноценный способ исследования пространственной структуры объекта контроля. Ниже приведем один из них.

3.2. Трансформация исходных изображений в распределения оценок плотности по слоям тестового объекта

Для иллюстрации приведем упрощенную версию алгоритма, близкую к подходу из [12]. Из формул (10), (12), (15) следует, что

$$Ns_{ij}^k \approx \frac{\rho(x_i, y_j, z_k) Z(x_i, y_j, z_k)}{M(Z(x_i, y_j, z_k))} \approx \frac{\rho(x_i, y_j, z_k)}{2}. \quad (17)$$

Воспользуемся тем, что индустриальные объекты имеют четкое описание внутренней структуры. Алгоритм основан на сравнении Ns_{ij}^k с калибровочными данными $\overline{Ns}_{ij}^k$, полученными по эталонному образцу, для которого $\rho(x_i, y_j, z_k) = \rho_0$. Для рассматриваемого случая эталонный объект представляет собой однородную алюминиевую пластину толщины H . Из (17) следует, что

$$\rho(x_i, y_j, z_k) \approx \rho_0 \frac{Ns_{ij}^k}{\overline{Ns}_{ij}^k}. \quad (18)$$

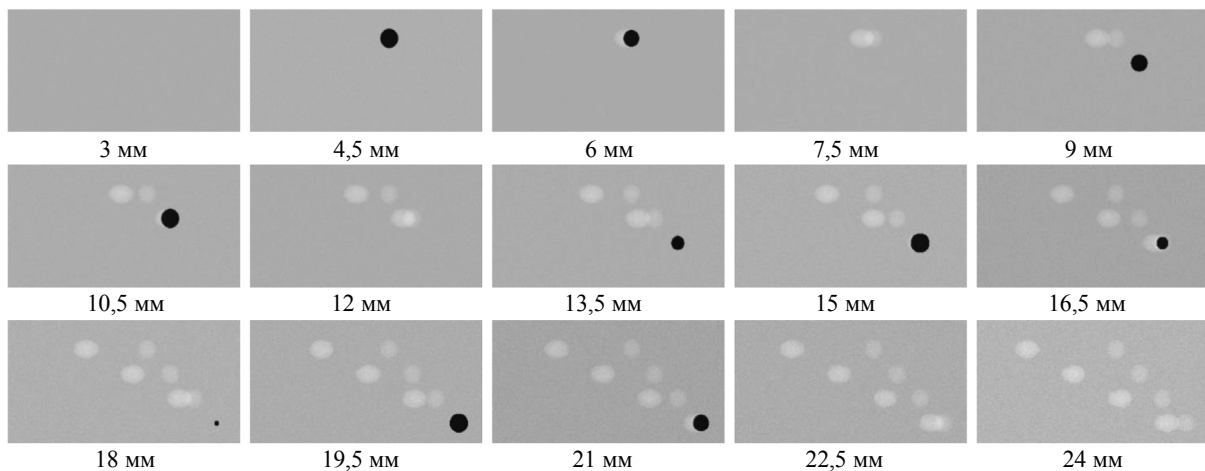


Рис. 3. Визуализация распределений оценок плотности по слоям тестового объекта.

Преобразование (18) позволяет сделать оценку распределения плотности по объему W , но с сохранением теней локальных включений в нижерасположенных слоях. Достоинством преобразования (18) является то, что фоновые фрагменты соответствующих послойных изображений близки по тону. Иллюстрация этого вывода приведена на рис. 3. На рисунке меньшей плотности материала объекта контроля соответствуют более темные тона. Это сделано с целью более яркого визуального подчеркивания теней на изображениях нижерасположенных слоев.

3.3. Компенсация теней локальных включений

3.3.1. Классификация теней локальных включений

Алгоритм компенсации теней локальных включений базируется на жесткой определенности геометрии схемы контроля. В [12] приведена схема формирования теней в послойной комптоновской радиографии. Эти тени можно разделить на два вида.

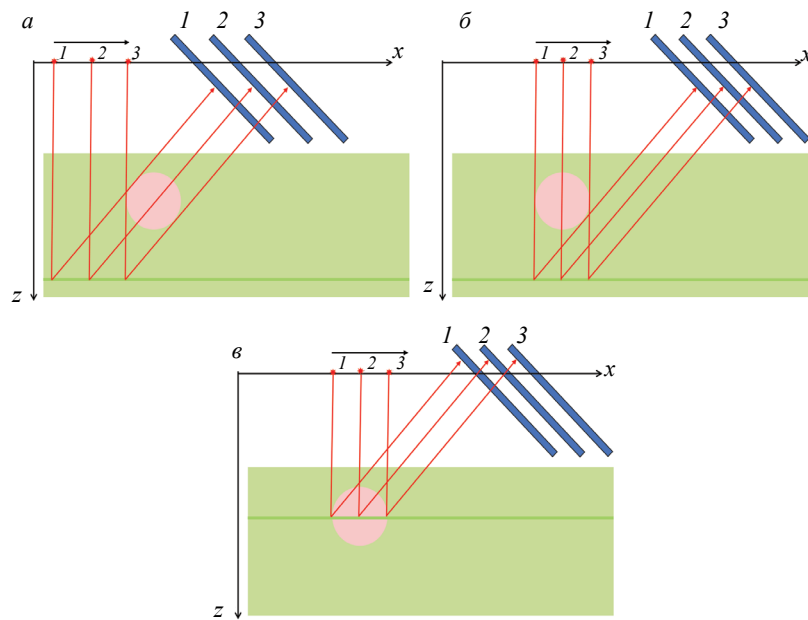


Рис. 4. Формирование изображений в послойной комптоновской цифровой радиографии:
 а — тени первого типа; б — тени второго типа; в — тени центрального слоя локального включения.

Иллюстрации схем формирования изображений теней и центрального слоя локального включения приведены на рис. 4. На рисунке стрелкой отмечено направление перемещения источника и детектора излучения. Напомним, что расстояние ИИ и ДИ является неизменным. Слой, формирующий изображение, выделен светло-зеленым цветом. Цифрами 1, 2, 3 на рисунке обозначены характерные согласованные положения системы источник-детектор. Из анализа схемы следует, что тени первого вида связаны в основном с трансформацией потока вторичного (рассеянного) излучения локальным включением, а тени второго вида — преимущественно с трансформацией локальным включением потока первичного излучения.

Особенностью теней первого вида является их расположение на изображениях нижних слоев непосредственно под изображением локального включения при первом его появлении на изображениях слоев. Напомним, что просмотр формируемых изображений осуществляется в направлении сверху вниз. Тени же второго рода с увеличением глубины слоя отдаляются от тени первого рода. Это подтверждается изображениями слоев на рис. 3. Очевидно, что размеры теней первого вида совпадают с размерами проекций локальных включений на исследуемый слой. Размеры же теней второго вида в направлении x существенно больше, чем размеры теней первого вида. Нумерация теней связана с последовательностью появления изображений теней локальных включений. Отсчет для каждого слоя ведется слева направо.

3.3.2. Алгоритм компенсации теней локальных включений

В [12] предложен один из наиболее эффективных алгоритмов компенсации теней локальных включений в анализируемой реализации комптоновской радиографии (томографии). Этот алгоритм базируется на связи положения локального включения, определяемого по трансформированным послойным комптоновским изображениям, и теней первого и второго вида. Используя общую идею алгоритма, модифицируем его с целью обеспечения высокой производительности вычислений. Приведем кратко основные этапы модифицированного алгоритма. Для более ясного понимания рассматриваются сферические включения.

Этап 1. Определение параметров локального включения.

Пусть в результате совместной обработки послойных изображений обнаружены все локальные сферические включения и найдены векторы оценок координат центров $\mathbf{x}_s^*$, $\mathbf{y}_s^*$, $\mathbf{z}_s^*$ и радиусов $\mathbf{r}_s^*$.

Этапы с первого по четвертый выполняются для всех локальных включений.

Этап 2. Определение глубины слоя, с которого начинается формирование тени.

Пусть имеется обнаруженное включение с параметрами x_s^* , y_s^* , z_s^* и r_s^* .

Вычисляется глубина слоя $z_{\lim 1}$, начиная с которой наблюдается тень первого вида от локального включения. Изображение слоя $z = z_L$ включает в себя тень локального включения первого вида, если выполняется условие:

$$z_L \geq z_{\lim 1} = z_s^* - r_s^* \sin \varphi. \quad (19)$$

Тень второго вида начинает наблюдаться со слоя, расположенного ниже плоскости $z = z_s^*$. Отсюда следует, что формула для вычисления глубины соответствующего слоя $z_{\lim 2}$ имеет вид:

$$z_{\lim 2} = z_s^*. \quad (20)$$

Этап 3. Условия отнесения точки с координатами (x, y, z_L) к теням первого или второго вида.

Точка с координатами (x, y, z_L) относится к тени первого вида, если луч рассеянного излучения, исходящий из этой точки, пересекает локальное включение. Точка относится к тени второго вида, если луч первичного излучения, проходящий через отмеченную точку, пересекает локальное включение. Очевидно, что и в первом, и во втором случае отнесение точки к тени первого или второго вида определяется расстояниями d_1 и d_2 от центра сечения по y сферического локального включения до соответствующих лучей (прямых).

Выражения для вычисления d_1 и d_2 выглядят следующим образом:

$$d_{1,2} = \frac{|A_{1,2}x_s + B_{1,2}z_s + C_{1,2}|}{\sqrt{A_{1,2}^2 + B_{1,2}^2}}, \quad (21)$$

где $A_{1,2}$, $B_{1,2}$, $C_{1,2}$ — параметры уравнений прямых, записанных в каноническом виде

$$AX + BZ + C = 0.$$

Связь параметров $A_{1,2}$, $B_{1,2}$, $C_{1,2}$ и параметров схемы контроля задается уравнением:

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan \varphi & -x - z_L \tan \varphi \\ 1 & 0 & -x \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Точка с координатами (x, y, z_L) относится к теням первого или второго вида, если

$$d_{1,2}^2 < r_s^{*2} - (y - y_s^*)^2. \quad (23)$$

Этап 4. Вычисление толщин локального включения по лучам.

В случае выполнения одного или двух условий (23) толщина (толщины) локального включения по лучу (лучам) h находится по формуле:

$$h = 2\sqrt{r_s^{*2} - (y - y_s^*)^2} d^2. \quad (24)$$

Этап 5. Вычисление корректирующих множителей.

Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения m_0 и m_s материалом ОК для энергий E_0 и E_s определяются по таблицам ослабления гамма-излучения [20] либо оцениваются экспериментально.

Формула для оценки корректирующего множителя $k_1(x, y, z)$ применительно к рассматриваемому примеру и первому виду теней имеют вид:

$$k_1(x, y, z) = \exp(m_s(\rho - \rho_0) h_1(x, y, z)). \quad (25)$$

Выражение для вычисления корректирующего множителя $k_2(x, y, z)$ для второго вида теней выглядит аналогично:

$$k_2(x, y, z) = \exp(m_0(\rho - \rho_0) h_2(x, y, z)). \quad (26)$$

Формула для определения соответствующего коэффициента $k_3(x, y, z)$ для случая наложения теней первого и второго вида выглядит следующим образом:

$$k_3(x, y, z) = \exp(m_s(\rho^* - \rho_0^*)h_1(x, y, z) + m_0(\rho^* - \rho_0^*)h_2(x, y, z)). \quad (27)$$

Отметим, что значения коэффициентов k_1, k_2, k_3 вне соответствующих теней равны 1.

Этап 6. Коррекция исходных изображений.

Коррекция исходных изображений осуществляется по формуле:

$$Ns_{ij}^{*k} = Ns_{ij}^k \times k(x_i, y_j, z_k). \quad (26)$$

Этап 7. Определение пространственного распределения плотности.

Оценка скорректированного пространственного распределения плотности $\rho^*(x_i, y_j, z_k)$ вычисляется как

$$\rho^*(x_i, y_j, z_k) = \rho_0 \frac{Ns_{ij}^{*k}}{Ns_{ij}^k}. \quad (27)$$

На рис. 5 приведена совокупность изображений слоев тестового объекта после компенсации теней локальных включений.

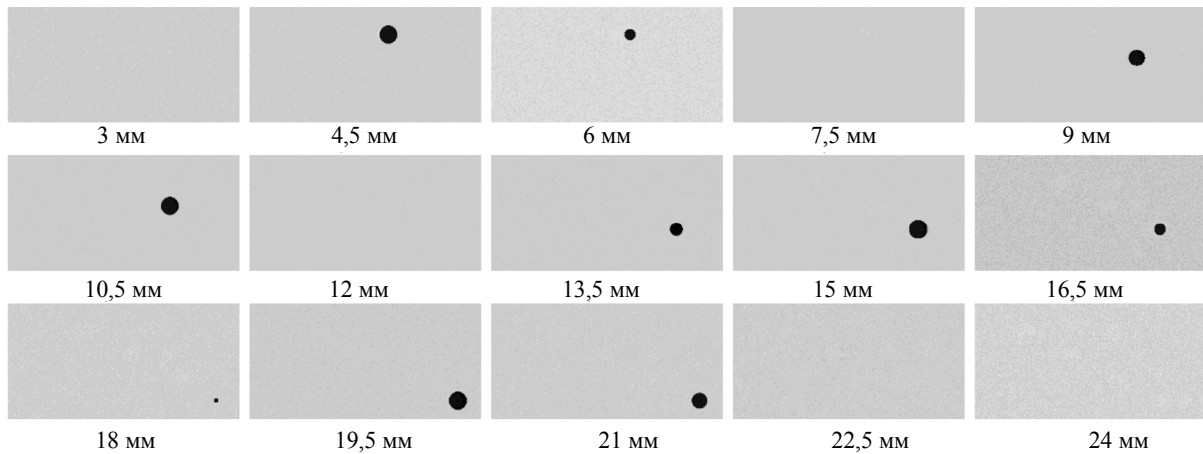


Рис. 5. Итоговые распределения оценок плотности по слоям тестового объекта.

Сравнение изображений, приведенных на рис. 3 и 5, позволяет судить о высокой эффективности алгоритма компенсации теней локальных включений в частности и имитационной модели послойной комптоновской радиографии в целом. Ореолы остаточных теней практически не наблюдаются. Для рассматриваемого алгоритма имитационного моделирования погрешность оценки плотности материала локального включения не превосходит $0,1 \text{ г/см}^3$.

Анализируемый способ позволяет оценить распределение плотности по объему объекта испытаний, поэтому можно считать рассмотренную реализацию послойной цифровой комптоновской радиографии разновидностью цифровой комптоновской томографии.

Замечание 2. Для ускорения процесса вычислений при моделировании предлагаемый алгоритм может быть дополнен блоком масштабирования [21], позволяющим заменить интегралы в (11), (16) суммами по учащенной сетке (x_i, y_j, z_k) .

Визуальное сопоставление результатов симуляции и результатов экспериментов [12] подтверждают эффективность предложенного алгоритма имитационного моделирования послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии) на всех этапах формирования и трансформации изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана имитационная модель послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии), предназначенная для исследования структуры объекта. Предложенная модель учитывает геометрическую схему контроля, параметры источника и блока регистрации гамма-излучения, оснащенного специальной системой коллиматоров. Возможность применения имитационной модели продемонстрирована для алюминиевого барьера со сферическими локальными включениями. Имитационная модель послойной цифровой комптоновской радиографии (томографии) и реализующая ее программа на MathCad могут быть использованы на стадии проектирования соответствующих систем, а также в учебном процессе в качестве виртуального комплекса послойной комптоновской радиографии (томографии). Разработанная имитационная модель легко адаптируется для источников рентгеновского и тормозного излучения и допускает учет когерентного рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chotas H.G., Dobbins III J.T., Ravin C.E. Principles of digital radiography with large-area, electronically readable detectors: a review of the basics // *Radiology*. 1999. V. 210. No. 3. P. 595—599. <https://doi.org/10.1148/radiology.210.3.r99mr15595>
2. Korner M., Weber C.H., Wirth S., Pfeifer K.J., Reiser M.F., Treitl M. Advances in digital radiography: physical principles and system overview // *Radiographics*. 2007. V. 27. No. 3. P. 675—686. <https://doi.org/10.1148/rg.273065075>
3. Logan C.M., Schneberk D.J., Shull P.J., Martz H.E. X-ray Imaging: fundamentals, industrial techniques and applications. CRC Press, 2016.
4. Kalender W.A. X-ray computed tomography // *Physics in Medicine & Biology*. 2006. V. 51. No. 13. P. R29—R43. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/r03>
5. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA : SPIE, 2009.
6. Thompson A., Maskery I., Leach R.K. X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review // *Measurement Science and Technology*. 2016. V. 27. No. 7. No. article 072001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/7/072001>
7. Kolkoori S., Wrobel N., Zscherpel U., Ewert U. A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT & E International*. 2015. V. 70. P. 41—52. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.09.008>
8. Kelley J., Cui S., Baciak J. Measurement of the modulation transfer function for a backscatter radiography system used in nondestructive examination // *Radiation Physics and Chemistry*. 2019. V. 155. P. 202—208. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.10.004>
9. Balamesh A., Salloum M., Abdul-Majid S. Feasibility of a new moving collimator for industrial backscatter imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2018. V. 29. No. 3. P. 143—155. <https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1281465>
10. Yumashev V.M., Samosadnyi V.T., Kadilin V.V., Mishchenko A.Y. Possibilities of transmission radiation tomography and tomography based on backscattered radiation // *Atomic Energy*. 2015. V. 119. No. 1. P. 64—67. <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0030-6> [Юмашев В.М., Самосадный В.Т., Кадилин В.В., Мищенко А.Ю. Возможности трансмиссионной радиационной томографии и томографии на обратно-рассеянном излучении // *Атомная энергия*. 2015. Т. 119. № 1. С. 56—57.]
11. Strecker H. Scatter imaging of aluminium castings using an X-ray fan beam and a pinhole camera // *Materials Evaluation*. 1982. V. 40. No. 10. P. 1050—1056.
12. Ham Y.S., Poranski C.F., Greenawald E.C. A practical algorithm for reconstruction from X-ray backscatter data // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer, Boston, MA, 1996. P. 449-455. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0383-1_57
13. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Kairalapov D.U., Sirot'yan E.V. Numerical modeling of radiographic images as the basis for correctly designing digital radiography systems of large-sized objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 2. P. 136—149. <https://doi.org/10.1134/S1061830919020050> [Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиrot'ян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений — основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // *Дефектоскопия*. 2019. No. 2. С. 43—55.]
14. Darvish-Molla S., Spurway A., Sattarivand M. Comprehensive characterization of ExacTrac stereoscopic image guidance system using Monte Carlo and Spektr simulations // *Physics in Medicine & Biology*. 2020. V. 65. No. 24. No. article 245029. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab91d8>
15. Jamshidi V., Davarnejad R. Simulation of corrosion detection inside wellbore by X-ray backscatter radiography // *Applied Radiation and Isotopes*. 2019. V. 145. P. 116—119. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.026>

16. *Abdul-Majid S., Balamesh A.* Single side imaging of corrosion under insulation using single photon gamma backscattering // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2014. V. 25. No. 3. P. 172—185. <https://doi.org/10.1080/09349847.2013.869376>
17. *Yaffe M.J., Rowlands J.A.* X-ray detectors for digital radiography // *Physics in Medicine & Biology*. 1997. V. 42. No. 1. P. 1—39. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/42/1/001>
18. *Yun S., Kim S.H., Kim D.W., Kim H.K.* Detective quantum efficiency of a phosphor-coupled photodiode array detector for use in digital X-ray tomosynthesis systems // *NDT & E International*. 2017. V. 92. P. 130—135. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.08.003>
19. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Simulation modelling in digital radiography with allowance for spatial outlines of test objects // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56 No. 8. P. 647—660. <https://doi.org/10.1134/S1061830920080082> [*Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю.* Имитационное моделирование в цифровой радиографии с учетом пространственных форм объектов контроля // *Дефектоскопия*. 2020. No. 8. С. 35—48.]
20. *Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K.* XCOM: Photon cross sections database, NIST standard reference database 8 (XGAM). <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X>
21. *Osipov S.P., Prischepa I.A., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Algorithms for modeling the formation and processing of information in X-ray tomography of foam materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 3. P. 238—250. <https://doi.org/10.1134/S1061830921030050> [*Осипов С.П., Прищепа И.А., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю.* Алгоритмы моделирования и обработки информации в рентгеновской томографии пеноматериалов // *Дефектоскопия*. 2021. № 3. С. 53—65.]