

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

Субтракционный метод получения изображения слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов

Ю.И. Дудчик, И.Н. Балухо, Н.Н. Кольчевский

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 15.05.2025

Принята к печати 25.08.2025

Просвечивание объектов рентгеновскими лучами с целью получение информации об их внутренней структуре или неоднородностях является важным методом неразрушающего контроля. В том случае, когда объект, например, место соединения полимерных труб для транспортировки жидкостей или газов, слабо поглощает рентгеновские лучи, контраст рентгеновского изображения объекта на фотоплёнке или на её цифровом аналоге является относительно низким. Цель работы состояла в разработке субтракционного метода получения изображений слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов с улучшенным контрастом при использовании лабораторных источников рентгеновского излучения. В рассматриваемом методе для получения рентгеновских изображений объектов используется рентгеновская трубка и цифровая 2-D рентгеновская камера для регистрации рентгеновского пучка. Объект располагается между рентгеновской трубкой и рентгеновской камерой. Метод включает получение двух цифровых изображений объекта при различных углах ориентации объекта к оси рентгеновского пучка и их последующую обработку путём субтракции (вычитания) изображений. Получены изображения различных слабопоглощающих рентгеновские лучи объектов (пчела, полимерная сетка, зерно риса) и проведена их компьютерная обработка путём субтракции изображений. Для просвечивания объекта рентгеновскими лучами использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом, напряжение на аноде трубки – 15 кВ, ток 10 мА. Для регистрации рентгеновского изображения объекта использовалась цифровая рентгеновская камера Photonic Science. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет $18 \times 12 \text{ мм}^2$, число пикселей равно 4008×2670 . Объект располагался вплотную к рентгеновской камере, чтобы улучшить разрешение снимка. Для осуществления субтракции регистрировались два снимка объекта, второй снимок делался при повороте объекта на 5° . Проведён расчёт контраста исходных и обработанных снимков. Проведённый анализ контраста полученных изображений показал, что применение разработанного субтракционного метода позволило повысить контраст изображения слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов примерно в два раза. Метод является относительно простым по сравнению с известным фазово-контрастным методом, и может быть использован в технической диагностике при просвечивании рентгеновскими лучами пластиковых, полимерных, композитных материалов и объектов.

Ключевые слова: рентгеновские лучи, цифровая рентгенография, контраст изображения

Адрес для переписки:

Дудчик Ю.И.
НИИПП имени А.Н. Севченко, БГУ,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Address for correspondence:

Dudchik Yury
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian
State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: dudchik@bsu.by

Для цитирования:

Ю.И. Дудчик, И.Н. Балухо, Н.Н. Кольчевский.
Субтракционный метод получения изображения
слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 235–244.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

For citation:

Yury Dudchik, Iren Balukho, Nikolai Kolchevsky.
Subtraction Method for X-Ray Imaging of Weakly Absorbing Objects.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):235–244. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

Subtraction Method for X-Ray Imaging of Weakly Absorbing Objects

Yury Dudchik, Iren Balukho, Nickolai Kolchevsky

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus*

Received 15.05.2025

Accepted for publication 25.08.2025

Abstract

The X-ray transmission of an object to get information about its internal structure or inhomogeneities is an important method of non-destructive testing. When an object, for example, a connection of polymer pipes for transporting liquids or gases, low absorbs X-rays, the contrast of the X-ray image of the object on the photo film or on digital analogue is relatively low. The aim of the work was to develop a subtractional method for obtaining images of low X-ray absorbing objects with improved contrast using laboratory X-ray sources. In the considered method, an X-ray tube and a digital 2-D X-ray camera for X-ray beam registration are used to capture X-ray images of objects. The object is placed between the X-ray tube and the X-ray camera. The method includes capturing two digital images of the object at different angles of the object orientation to the X-ray beam axis and then processing the images by subtracting them. Images of a number of objects with low absorption of X-rays (bee, polymer mesh, rice grain) were obtained and their computer processing by image subtraction was carried out. X-ray tube BSV-17 with copper anode was used for X-ray transmission of the object, voltage at the anode of the tube – 15 kV, current – 10 mA. A Photonic Science digital X-ray camera was used to capture the X-ray image of the object. The size of the working area of the X-ray camera is $18 \times 12 \text{ mm}^2$, the number of pixels is 4008×2670 . The object was placed close to the X-ray camera to improve the resolution of the image. Two images of the object were captured to realise the subtraction, the second image was taken with the object rotated by 5° . The contrast of the original and processed images was calculated. The analysis of the contrast of the resulting images showed that the use of the developed subtraction method allowed to increase the contrast of the image of objects with low absorption of X-rays about two times. The method is reasonably simple in comparison with the well-known phase-contrast method, and it can be used in technical diagnostics in the process of examination of plastic, polymer, composite materials and objects by X-rays.

Keywords: X-rays, digital radiography, image contrast

Адрес для переписки:

Дудчик Ю.И.
НИИПФП имени А.Н. Севченко, БГУ,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Address for correspondence:

Dudchik Yury
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian
State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: dudchik@bsu.by

Для цитирования:

Ю.И. Дудчик, И.Н. Балухо, Н.Н. Кольчевский.
Субтракционный метод получения изображения
слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 235–244.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

For citation:

Yury Dudchik, Iren Balukho, Nickolai Kolchevsky.
Subtraction Method for X-Ray Imaging of Weakly Absorbing Objects.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):235–244. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-235-244

Введение

Рентгеновские лучи широко используются для просвечивания изделий с целью определения внутренних неоднородностей. Для этих целей используются, например, проекционные рентгеновские микроскопы. Для получения контрастного изображения объекта необходимо, чтобы различные участки объекта по-разному поглощали излучение. Это условие, как правило, не выполняется для материалов с элементами с небольшим порядковым номером – полимеров, пластиков, полимерных композитов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Изображения таких объектов получают методом фазового контраста [1]. В материалах, содержащих элементы с небольшим порядковым номером, показатель преломления рентгеновского излучения, как правило, больше, чем показатель ослабления. Поэтому задача состоит в том, чтобы выделить из общего потока излучения, формирующего изображение объекта, ту часть, которая получается в результате рассеяния излучения на границах раздела неоднородностей объекта. Известны несколько методов практической реализации метода фазового контраста: с использованием микрофокусных рентгеновских аппаратов, с использованием квазипараллельного рентгеновского пучка, с использованием кодирующей диафрагмы.

Метод фазового контраста с использованием квазипараллельного рентгеновского пучка основан на обнаружении включений, отличающихся показателем преломления и имеющих границы раздела с высокой кривизной. Основное преимущество этого метода состоит в экспериментальной простоте, так как для его реализации не требуется никаких дополнительных рентгенооптических элементов. Недостатком метода является то, что для получения изображения объектов требуются мощные источники излучения и длительная экспозиция. Метод фазового контраста может быть реализован и с использованием микрофокусных рентгеновских аппаратов (рентгеновских трубок) [2]. Считается, что фокусное пятно рентгеновской трубки должно иметь размер на уровне 5 мкм и меньше. Такие рентгеновские трубки являются дорогостоящими и маломощными. Для лабораторных источников указанное ограничение приводит

к неоправданно большим экспозициям при съёмке объекта.

Метод фазового контраста с использованием рентгеновских пучков с малой расходимостью и высокой интенсивности может быть реализован на синхротронных источниках излучения [3]. Малое число синхротронов (около 50 во всем мире) по сравнению с количеством рентгеновских аппаратов и дорогое время работы синхротрона являются основными факторами, определяющими актуальность и перспективность проведения исследовательских работ по поиску альтернативных методов получения изображения слабопоглощающих объектов в рентгеновских лучах, что и является целью работы.

Нами разработан метод субтракционной съёмки, который включает получение двух изображений объекта под различными углами к оси рентгеновского пучка и последующую цифровую обработку изображений путём вычитания одного изображения из другого. Как аналог этого метода, можно привести способ вычислительной субтракционной рентгенографии, который описан в патенте [4]. В [4] для улучшения контраста изображения объекта предлагается получать два изображения объекта при различных ускоряющих напряжениях на рентгеновской трубке. Далее, полученные изображения обрабатываются с использованием компьютера и результирующее изображение характеризуется улучшенным контрастом. Разрабатываемый метод также близок к методу рентгеновской стереографии, описанному нами в [5].

Обоснование метода субтракционного получения изображений объектов в рентгеновских лучах

Для понимания особенностей предлагаемого метода целесообразно рассмотреть формирование изображения объекта в виде полимерной полусферы в рентгеновских лучах. Полимер для примера выбран как материал слабо поглощающий рентгеновские лучи. На рисунке 1 показана схема формирования изображения полимерной полусферы на детекторе за счёт преломления рентгеновских лучей на границах раздела объекта при использовании параллельного рентгеновского пучка.

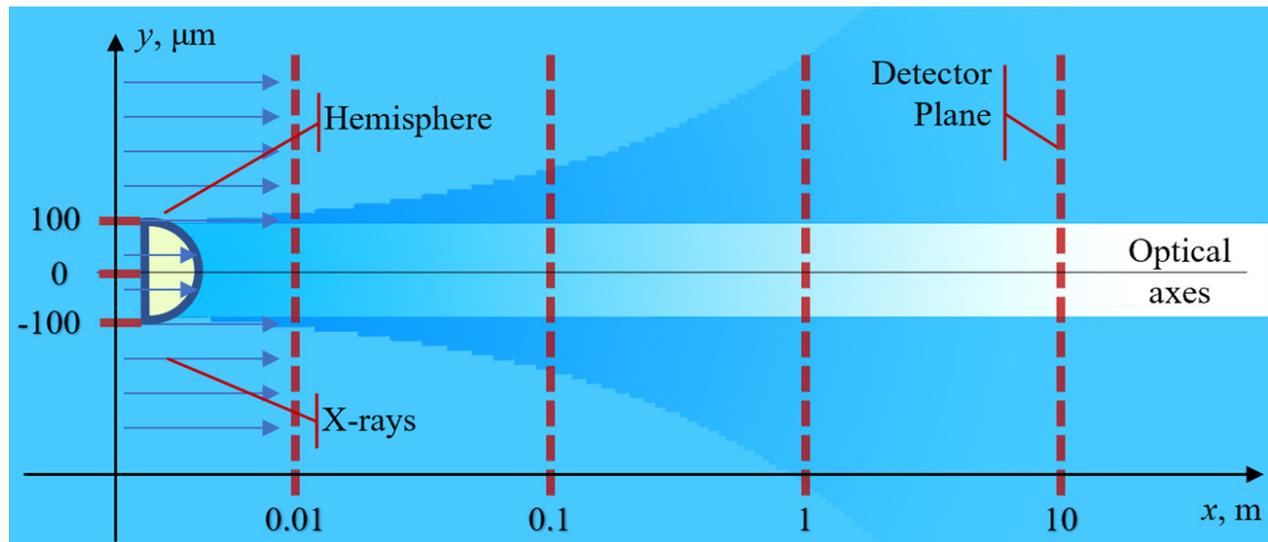


Рисунок 1 – Схематическое представление распределения интенсивности рентгеновского пучка в плоскости детектора на различных расстояниях до рассеивающей полимерной полусферы

Figure 1 – Schematic representation of the distribution of the X-ray beam intensity in the detector plane at different distances to the scattering polymer hemisphere

На рисунке 2 показаны результаты проведённых расчётов распределения интенсивности излучения на детекторе в зависимости

от расстояния между детектором и полимерной полусферой с радиусом кривизны поверхности 100 мкм.

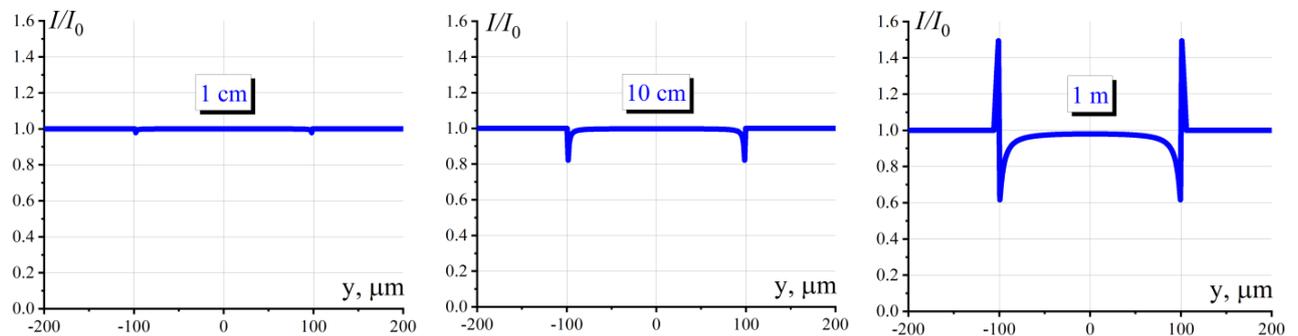


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности рентгеновского пучка в плоскости детектора от расстояния до оси оптической системы на различных расстояниях (0,01 м, 0,1 м, 1 м) от рассеивающей полимерной полусферы с радиусом кривизны поверхности 100 мкм

Figure 2 – Dependence of X-ray beam intensity in the detector plane on the distance to the optical system axis at different distances (0.01 m, 0.1 m, 1 m) from the scattering polymer hemisphere with a surface curvature radius 100 μm

Расчёты выполнены для параллельного рентгеновского пучка в приближении геометрической оптики, поглощение излучения в материале полусферы и дифракционные эффекты не учитывались. Расчёты проводились следующим образом. При прохождении параллельного рентгеновского пучка через полусферу падающие лучи отклоняются на малый

угол $\alpha(r)$ из-за преломления на поверхности в соответствии с законом Снеллиуса:

$$\alpha(r) \approx \frac{\delta \cdot r}{\sqrt{R^2 - r^2}}, \quad (1)$$

где δ – единичный декремент показателя преломления материала полусферы; r – высота луча относительно оптической оси; R – радиус

кривизны полусферы. Углы отклонения $\alpha(r)$ плавно меняются от 0 на оптической оси до максимального значения на границе объекта, что приводит к увеличению интенсивности рассеянного излучения

Расчёты показали, что для рассматриваемого случая, для того, чтобы зафиксировать различия в неоднородностях объекта на кривой распределения интенсивности рентгеновского пучка на детекторе, детектор целесообразно устанавливать на расстоянии более метра от объекта. Выбор относительно большого расстояния от объекта до детектора рентгеновского излучения объясняется малыми углами рассеяния (преломления) рентгеновского излучения. Хотя углы рассеяния зависят от длины волны излучения, формы и материала объекта, их малые значения приводят к существенным экспериментальным ограничениям метода. Например, если угол рассеяния рентгеновского излучения на неоднородностях объекта составляет 0,001 рад, то для получения фазово-контрастного

изображения объекта необходимо, чтобы расходимость первичного пучка была на порядок меньше, т.е. составляла не менее 0,0001 рад. Интенсивность рентгеновских пучков с такой небольшой угловой расходимостью мала при использовании рентгеновской трубки, и это ограничивает применение метода параллельных пучков в лабораторных условиях. Приведённые данные показывают сложность регистрации границ раздела объекта известным фазово-контрастным методом.

Чтобы устранить высокие требования к параллельности рентгеновского пучка и уменьшить экспозицию при съёмке объекта нами предложен следующий метод субтракционной съёмки. Суть метода поясняет рисунок 3, на котором показан объект в виде прямоугольника (1), на который падают рентгеновские лучи (2). Длина прямоугольника в направлении оси x равна $2a$, а толщина в направлении оси y равна b . Рентгеновские лучи падают на объект, который установлен под углом θ к оси y .

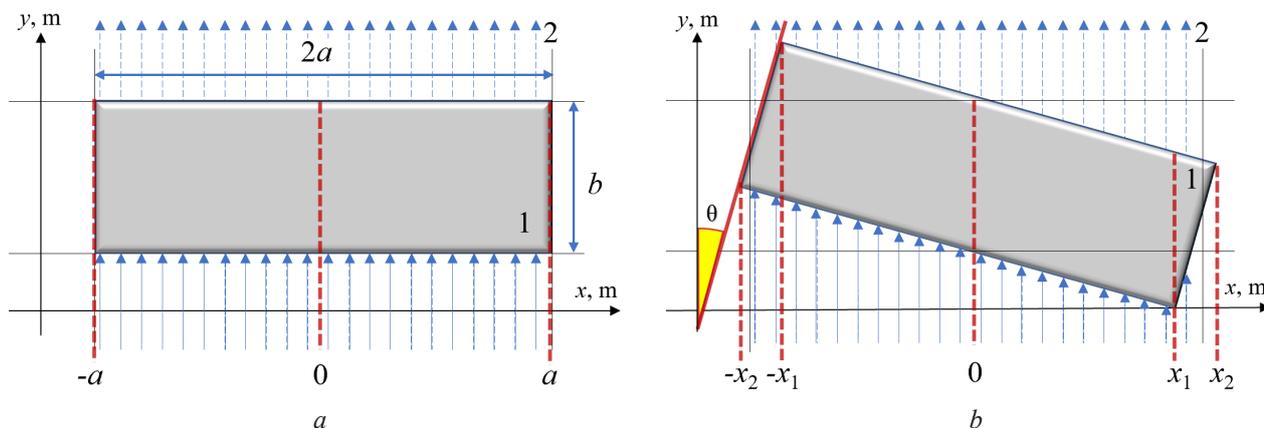


Рисунок 3 – Геометрия расположения объекта относительно рентгеновского пучка: a – перпендикулярно пучку $\theta = 0$; b – под углом θ к пучку. 1 – объект; 2 – рентгеновские лучи

Figure 3 – The geometry of the object's location in relation to the X-ray beam: a – perpendicular to the beam $\theta = 0$; b – at an angle θ to the beam. 1 – object; 2 – X-rays

В разрабатываемом методе предлагается получить два изображения объекта, который повернут на различные углы по отношению к рентгеновскому пучку. Интенсивность пучка I , прошедшего через объект, определяется как:

$$I = I_0 \cdot T, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность падающего пучка; T – пропускание объекта. Пропускание объекта T зависит от угла поворота объекта θ ,

при котором определяются координаты x_1 и x_2 , определяющие положение вершин прямоугольника (рисунок 3). Для объекта, установленного под углом $\theta = 0$, пропускание T_1 при $x \in [-a; a]$ равно:

$$T_1 = e^{-k \cdot b}, \quad (3)$$

где k – показатель ослабления рентгеновских лучей для материала объекта; b – толщина объекта.

Для лучей, которые не пересекают объект, пропускание равно $T = 1$. Контраст изображения объекта K определяется по Веберу [6] как:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (4)$$

где I_{\max} и I_{\min} – интенсивность прямого и прошедшего пучка соответственно, или яркость изображения и фона.

Для случая $\theta = 0$ контраст определяется ослаблением рентгеновских лучей:

$$K_1 = 1 - e^{-k \cdot b}. \quad (5)$$

Для объекта, установленного под углом $\theta > 0$ в области $x \in [-x_1; x_1]$ (рисунок 3), пропускание объекта для малых углов θ определяется как:

$$T_2 = e^{-k \cdot b \cdot (1 + \theta^2/2)} = e^{-kb} e^{-k \cdot b \cdot (\theta^2/2)} = T_1 e^{-k \cdot b \cdot (\theta^2/2)}. \quad (6)$$

Для случая $\theta \neq 0$ контраст K_2 определяется дополнительным ослаблением рентгеновских лучей в материале пластинки (рисунок 3b), повернутой на малый угол θ :

$$K_2 = 1 - e^{-k \cdot b \cdot (1 + \theta^2/2)} \approx 1 - e^{-k \cdot b} + k \cdot b \cdot \frac{\theta^2}{2} e^{-k \cdot b} \approx K_1 + k \cdot b \cdot \frac{\theta^2}{2} e^{-k \cdot b}. \quad (7)$$

Для рентгеновских лучей, пересекающих края прямоугольной пластинки, где x определяется условием $x \in [-x_2; -x_1] \cup [x_2; x_1]$ (рисунок 3), пропускание будет выше, чем в области $x \in [-x_1; x_1]$. Координаты x_2 , x_1 зависят от угла

наклона θ и толщины пластинки b . При повороте пластинки относительно геометрического центра на малый угол θ координаты $x_{1,2}$ равны:

$$x_{1,2} = a \pm \frac{b \cdot \theta}{2}. \quad (8)$$

При вычитании изображения объекта, полученного при угле $\theta = 0$, из изображения, полученного при $\theta \neq 0$, происходит перераспределение яркости результирующего изображения и появление тёмного фона (рисунок 4). Вычитание в областях $x \in [-x_2; -x_1]$ и $x \in [x_2; x_1]$ приведёт к уменьшению яркости изображения вплоть до отрицательных значений. На изображении объекта отрицательные значения яркости заменяются нулями, так как диапазон яркости изображения нормируется, начиная с нулевого значения яркости. Таким образом, значение параметра I_{\min} становится равным нулю, и, согласно формуле (5), контраст изображения увеличивается вплоть до единицы.

Метод субтракционной съёмки позволяет обнаруживать границы объектов, вблизи которых существенно изменяется пропускание объекта при угловом повороте. Нами проведён расчёт распределения интенсивности рентгеновского излучения в плоскости детекторе (фотоплёнки) в зависимости от угла поворота объекта (рисунки 4 и 5). Распределение интенсивности в плоскости детектора в зависимости от коэффициента поглощения объекта показано на рисунке 4.

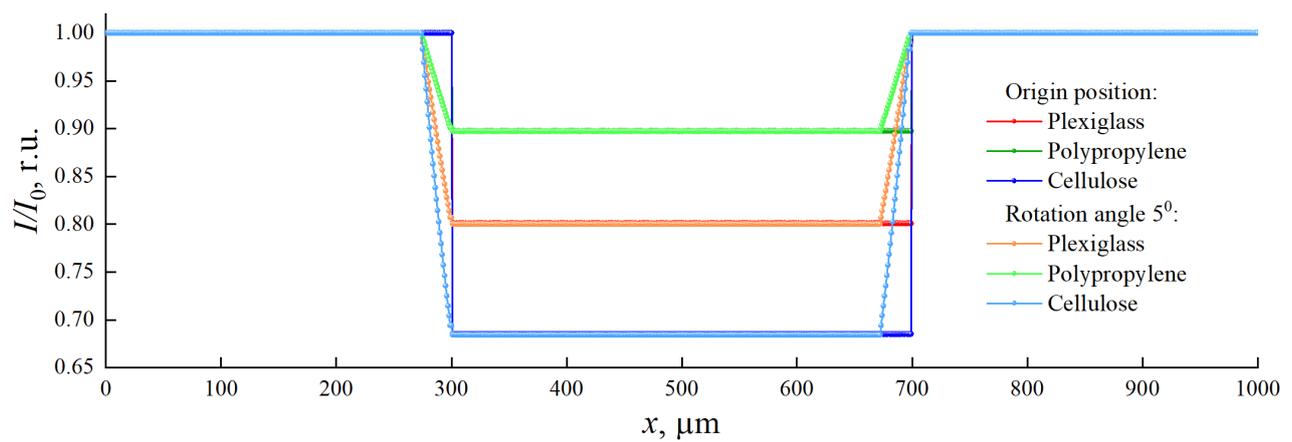


Рисунок 4 – Пространственное распределение интенсивности рентгеновского пучка в плоскости детектора после прохождения через пластины из различных материалов при угле поворота 5° относительно пучка. Толщина пластины 300 мкм

Figure 4 – Spatial distribution of X-ray beam intensity in the detector plane after passing through a plates made of different materials at a rotation angle of 5° relative to the beam. Thickness of the plate is equals to 300 μm

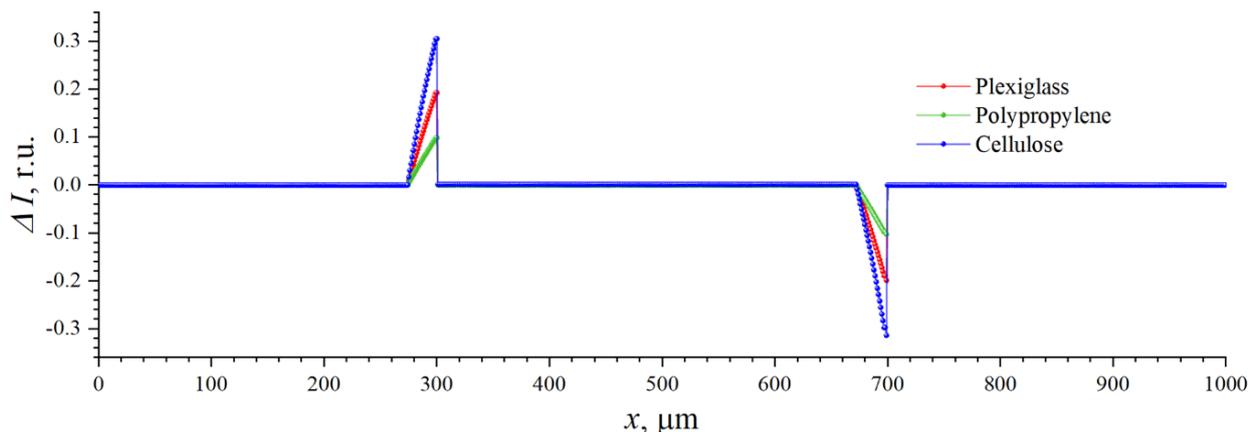


Рисунок 5 – Пространственное распределение яркости изображения объекта в плоскости детектора после вычитания по методу субтракционной съёмки

Figure 5 – Spatial brightness distribution of the object image in the detector plane after processing by subtractive imaging method

В качестве объектов выбраны пластины из следующих материалов: C_3H_6 (полипропилен, плотность $\rho = 0,90 \text{ г см}^3$) – зелёная линия; $C_6H_{10}O_5$ (целлюлоза, $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$) – синяя линия; $C_5O_2H_8$ (плексиглас, $\rho = 1,18 \text{ г/см}^3$) – красная линия. В расчётах угол поворота выбран равным 5° , длина пластины – 400 мкм, толщина пластины – 300 мкм. Расчёты проводились для рентгеновских лучей с энергией 8 кэВ. Коэффициенты поглощения материалов μ для 8 кэВ фотонов выбраны из таблиц [7]: $\mu_1 = 0,00074 \text{ мкм}^{-1}$ (плексиглас), $\mu_2 = 0,00036 \text{ мкм}^{-1}$ (полипропилен), $\mu_3 = 0,0011 \text{ мкм}^{-1}$ (целлюлоза).

На рисунке 5 показано пространственное распределение яркости изображения объекта в плоскости детектора ΔI , полученное в результате вычитания двух изображений объекта в рентгеновских лучах (исходного и повёрнутого) по методу субтракционной съёмки. Результат субтракционной обработки двух изображений ΔI с пиками, определяющими границы объекта (рисунок 5), содержит положительные и отрицательные значения, как показано на рисунке 5. Положительные значения ΔI фактически соответствует светлым элементам изображения, отрицательные – тёмным элементам. Появление тёмных и светлых элементов на изображении увеличивает контраст изображения и позволяет различить границы объекта.

Расчёт контраста изображения при субтракционной съёмке

Контраст, в классическом понимании, характеризует различия в яркости (цвете) фоновых и основных объектов, за счёт чего удаётся различить объекты на изображении. Контраст с точки зрения цветового восприятия представляет собой соотношение светлых и тёмных частей изображения [6]. Контраст является одной из характеристик, которая напрямую связана с качеством изображения и его разрешением. Контраст с точки зрения рентгенографии может также содержать в себе информацию о структуре просвечиваемого объекта, его элементном составе.

Существует целый ряд возможных способов определения контраста, зависящих от значения, которое подразумевается под ним, и от подхода для его расчёта. Контраст по Веберу (формула 4) применим лишь для изображений, где отсутствуют абсолютные значения яркостей, и в случае метода субтракционной съёмки формула (4) имеет ограниченное применение, поскольку коэффициент K получается равным 1. Для описания контраста цифрового изображения, содержащего множество ярких и тёмных объектов, предлагается использование формулы для вычисления глобального контраста K_{GL} [7–9]:

$$K_{GL} = \frac{2\sigma_D}{G-1} = \frac{2\sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i - D_{cp})^2 / N}}{G-1}, \quad (9)$$

где G – максимально возможное число градаций (для 8-битного полутонового изображения $G = 256$); D_{\max} , D_{\min} – максимальное и минимальное значение яркости пикселей изображения (участка изображения, на котором выполняется оценка контраста); σ_D – стандартное отклонение яркости (интенсивности) пикселей. Указанные параметры можно определить с помощью специализированных графических редакторов.

Следует отметить, что в формуле (9) контраст K_{GL} представляет собой безразмерную величину, а параметр σ_D также является среднеквадратичным значением контрастности (среднеквадратичный контраст) [8]. Формула (9) применяется для изображений с большим количеством яркостных переходов для вычисления общей статистической оценки контраста цифрового изображения.

Экспериментальные исследования

Для реализации метода субтракционной съёмки были получены изображения объектов в рентгеновских лучах. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка с медным анодом, напряжение на аноде 15 кВ, ток 10 мА. Для регистрации рентгеновского изображения объекта использовалась цифровая рентгеновская камера Photonic Science. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет $18 \times 12 \text{ мм}^2$, число пикселей равно 4008×2670 . Размер пикселя камеры составляет 4,5 мкм. В исследованиях объект размещался вплотную к выходному окну рентгеновской камеры, источник излучения располагался на расстоянии около 500 мм до камеры, т. е. был реализован режим контактной съёмки [10]. При съёмке использовался режим биннинга рентгеновской камеры, равный 2×2 , при котором происходило объединение 4-х пикселей камеры в один. В качестве объектов исследования были выбраны: пчела, полимерная сетка и зерна риса. Делалось два снимка объекта, второй снимок делался при повороте объекта на 5° .

Для обработки полученных изображений объектов в рентгеновских лучах использовался программный пакет ImageJ: были определены

параметры полученных изображений: максимальное и минимальное значения яркости пикселей, среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение. С использованием указанного программного пакета также проводилась процедура вычитания изображений. На основании полученных данных по формуле (9) был проведён расчёт контраста исходных и обработанных изображений.

На рисунке 6 приведены полученные рентгеновские изображения различных объектов: пчелы, полимерной сетки, зёрен риса, и изображения указанных объектов, полученные методом субтракционной обработки. Снимок пчелы характеризуется контрастом $K_0 = 0,242$, а снимок по методу субтракционной съёмки характеризуется контрастом $K = 0,543$. Видно, что контраст увеличен более чем в 2,4 раза. Контраст начального изображения полимерной сетки составляет $K_0 = 0,585$, а в методе субтракционной съёмки $K = 0,651$. Контраст исходного изображения зёрен риса составлял $K_0 = 0,370$, в методе субтракционной съёмки $K = 0,622$.

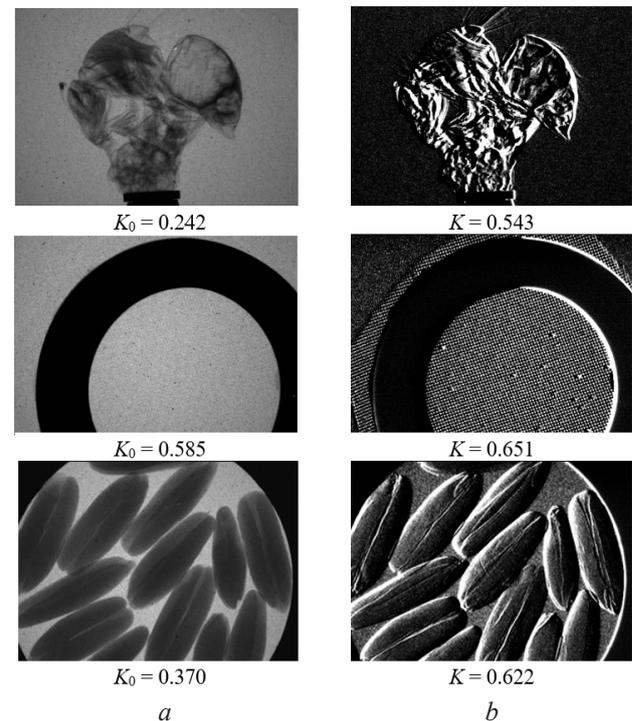


Рисунок 6 – Экспериментальные рентгеновские изображения пчелы, сетки и зёрен риса (a) и обработанные субтракционным методом (b)

Figure 6 – Experimental X-ray images of bee, mesh and rice grains (a) and processed by subtractive method (b)

Видно, что изображения, обработанные методом субтракционной съёмки, имеют большой контраст; структурные границы с более высоким в сравнении с окружающей средой показателем поглощения оказываются чёрными и белыми на нейтральном сером фоне, т. е. обнаруживается значительно больше структурных деталей по отношению к начальным изображениям. Изображения, полученные субтракционным методом, напоминают фазово-контрастные изображения объектов, однако в данном методе они получаются значительно проще и при меньшей экспозиции. Таким образом, применение субтракционного метода получения рентгеновских изображений позволяет увеличить их информативность.

Заключение

Разработан субтракционный метод получения рентгеновских изображений объектов, который позволяет улучшить контраст изображения объектов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Метод реализован с использованием рентгеновской трубки с медным анодом и цифровой 2-D рентгеновской камеры для визуализации рентгеновского пучка. Метод включает получение двух цифровых изображений объекта при различных углах ориентации объекта к оси рентгеновского пучка и их последующую обработку путём субтракции (вычитания) изображений. Получены изображения различных слабо поглощающих рентгеновские лучи объектов, таких как пчела, полимерная сетка, зерно риса, и проведена их компьютерная обработка изображений. Проведён расчёт контраста исходных и обработанных снимков. Исходный рентгеновский снимок пчелы характеризуется контрастом 0,242, снимок по методу субтракционной съёмки, контрастом 0,543. Контраст исходного изображения зёрен риса составлял 0,370, в методе субтракционной съёмки 0,622. Проведённый анализ контраста полученных изображений показал, что применение разработанного субтракционного метода позволило повысить контраст изображения слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов примерно в два раза. Метод является относительно простым по сравнению с известным фазово-контрастным методом, его

реализация не требует получения квази-параллельного рентгеновского пучка, экспозиция при съёмке объекта составляет несколько секунд в отличие от десятков минут при фазово-контрастном методе. Метод может быть использован в технической диагностике при просвечивании рентгеновскими лучами пластиковых, полимерных, композитных материалов и объектов. В дальнейшем перспективно применить разработанный метод для получения объёмных изображений объектов методом рентгеновской томографии.

Благодарности

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Список использованных источников

1. Endrizzi, M. X-ray phase-contrast imaging / M. Endrizzi // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. – 2018. – Vol. 878, Section A. – P. 88–98.
DOI: 10.1016/j.nima.2017.07.036
2. Mayo, S.C. X-ray phase-contrast microscopy and microtomography / S. C. Mayo [et al.] // Optics Express. – 2003. – Vol. 11, № 19. – P. 2289–2302.
DOI: 10.1364/OE.11.002289
3. Yokawa, K. Synchrotron Radiation-based X-ray phase-contrast imaging of the aortic walls in acute aortic dissection / K. Yokawa, M. Hoshino N. Yagi, Y. Nakashima, K. Nakagawa, Y. Okita, K. Okada, T. Tsukube // JVS-Vascular Science – 2020 – Vol. 1. – P. 81–91.
DOI: 10.1016/j.jvssci.2020.06.002
4. Патент RU 2200469C2, МПК А61В 6/03. Способ вычислительной субтракционной рентгенографии: № 2200469C2: заявлено 15.12.2000: опубл. 20.03.2003 / Тарасов А.И.; заявитель: Тарасов А.И. – 5 с.
5. Дудчик, Ю.И. Получение изображения объектов в рентгеновских лучах методом стереофотографии / Ю.И. Дудчик // Приборостроение-2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 19–20
6. Кадничанский, С.А. Оценка контраста цифровых аэрофото- и космических снимков / С.А. Кадничанский // Геодезия и картография. –

2018. – № 3. – С. 46–51.

DOI: 10.22389/0016-7126-2018-933-3-46-51

7. Henke, B.L. X-ray interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92 / B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1993. – Vol. 54, № 2. – P. 181–342.

DOI: 10.1006/adnd.1993.1013

8. Haun, A. Perceived contrast in complex images / A.M. Haun, E. Peli // Journal of Vision – 2013;13(3):1–23. **DOI:** 10.1167/13.13.3

9. Голуб, Ю.И. Исследование локальных оценок контраста цифровых изображений при отсутствии эталона / Ю.И. Голуб, Ф.В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 2. – С. 4–11. **DOI:** 10.21122/2309-4923-2019-2-4-11

10. Рентгеновские компьютерные методы исследований структурной целостности семян и их значение в современном семеноведении / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова [и др.] // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, № 4. – С. 627–638. **DOI:** 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18

Acknowledgments

The work was partially supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of task 3.12 of the SPSR «Mechanics, Metallurgy, Diagnostics in Mechanical Engineering», subprogram «Technical Diagnostics».

References

1. Endrizzi M. X-ray phase-contrast imaging. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2018;878:88-98. **DOI:** 10.1016/j.nima.2017.07.036

2. Mayo SC. [et al.]. X-ray phase-contrast microscopy and microtomography. Optics Express. 2003;11(19):2289–2302.

2003;11(19):2289–2302.

DOI: 10.1364/OE.11.002289

3. Yokawa K. [et al.]. Synchrotron Radiation-based X-ray phase-contrast imaging of the aortic walls in acute aortic dissection // JVS-Vascular Science. 2020;1:81-91. **DOI:** 10.1016/j.jvssci.2020.06.002

4. Patent RU 2200469C2, IPC A61B 6/03. Method for applying computer subtraction radiography : № 2200469C2: filing date 15.12.2000 : publ. date 20.03.2003 / Tarasov A.I. ; applicant: Tarasov A.I. – 5 p.

5. Dudchik YuI. Obtaining the image of objects in X-rays by stereophotography method. Instrument Engineering-2019: proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference, 13-15 Nov. 2019, Minsk, Belarus / ed.: O.K. Gusev (chairman) [et al.]. Minsk: BNTU, 2019:19-20 p.

6. Kadnichanskiy SA. Contrast evaluation of digital aerial and satellite images. Geodesy and Cartography. 2018;3:46–51.

DOI: 10.22389/0016-7126-2018-933-3-46-51

7. Henke BL, Gullikson EM, Davis JC. X-ray interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92. Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993;54(2):181-342.

DOI: 10.1006/adnd.1993.1013

8. Haun A, Peli E. Perceived contrast in complex images. Journal of Vision. 2013;13(13):3:

DOI: 10.1167/13.13.3

9. Golub YuI, Starovoitov FV. Study of local assessments of contrast for digital images. System analysis and applied information science. 2019;2:4-11.

DOI: 10.21122/2309-4923-2019-2-4-11

10. Arkhipov MV. [et al.]. X-Ray Computer Methods for Studying the Structural Integrity of Seeds and Their Importance in Modern Seed Science. Technical Physics. 2019;89(4):627–638.

DOI: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18