

С. А. ЗОЛОТАРЕВ<sup>1</sup>, П. С. САВЕНЯ<sup>1</sup>, К. А. ЖУКОВ<sup>1</sup>, М. А. СЕДНИНА<sup>2</sup>

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННЕЙ ДЕФЕКТНОСТИ СТенок МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

*Обсуждается возможность точной оценки толщины стенки трубы, измеренной непосредственно из реконструированного изображения трубы, восстановленного из всего лишь из нескольких рентгеновских проекций, сделанных в ограниченном угле обзора. Поскольку эффекты рассеяния излучения и ужесточения рентгеновского пучка искажают до 50% первичного излучения, игнорирование этих эффектов приводит к смазыванию изображения, сильным артефактам, и неточному определению размеров. Была разработана компьютеризированная методика, которая учитывает вклад рассеянного излучения, и ужесточения рентгеновского пучка. Итерационные методы Байесовской реконструкции затем используются для восстановления изображения трубы, с использованием объемного и поверхностно-ориентированного представления трубы. Применяя эти методы, погрешность оценки толщины стенки трубы может быть доведена до 300 мкм.*

### Введение

Исследование относится к области рентгеновского контроля труб и полых объектов, имеющих продольное осевое направление, и может быть использовано для осуществления томографической реконструкции, как их внутренней поверхности, так и изображений внутренних неоднородностей в стенках труб, а также для определения толщины вышеуказанных стенок. Наиболее близким техническим решением является рентгеновская система для неразрушающего контроля цилиндрических и трубчатых объектов, описанная в американском патенте US 8,774,349 [1]. В нем описано устройство для неразрушающего контроля труб путем просвечивания их рентгеновским источником, который может перемещаться как параллельно вдоль оси трубы, так и осуществлять вращательное движение вокруг оси параллельной оси трубы или совпадающей с продольной осью трубы. При вращении источника вокруг оси трубы максимальный угол поворота составляет 180 градусов плюс угол раскрытия конусного пучка. Таким образом, в последнем случае рентгеновская система позволяет осуществлять трехмерную коническую реконструкцию изображения участка трубы. Главным недостатком описанной технологии является то, что при движении рентгеновского источника вдоль продольной

оси трубы уже сама схема сбора рентгеновских данных ограничивает угол обзора контролируемого участка трубы диапазоном от примерно 45 градусов до 60 градусов. Это позволяет реконструировать примерное местоположение и приближенную форму только высококонтрастных деталей внутри стенки трубы (трещины, поры, шлаки в сварном шве). Реконструкция формы внешней и внутренней поверхности и ее пространственного расположения невозможны в силу слишком малого угла обзора. Целью работы является повышение точности определения толщины стенок труб и полых объектов, имеющих продольное осевое направление, также пространственного расположения, конфигурации и геометрических размеров внутренних дефектов для труб большого диаметра.

### 2. Описание алгоритма реконструкции изображения трубы

Поставленная цель достигается тем, что во – первых, для определения толщины стенок трубы предложено использовать разработанный авторами метод трехмерной оболочечной реконструкции внутренней поверхности труб, опубликованный в статье [2] и монографии [3]. Введем основные обозначения, которые будут использованы при дальнейшем описании используемого метода реконструкции.

Внутренняя оболочка задается узловыми точками в цилиндрической системе координат  $\rho(\varphi, y)$ , полученными дискретизацией по полярному углу  $\{\varphi_k : k = \overline{1, K}\}$ , и полярной оси  $\{y_l : l = \overline{1, L}\}$ , которая совпадает с осью ординат декартовой системы координат. Цилиндрическая система координат используется только для первоначальной дискретизации внутренней оболочки. Все дальнейшие операции выполняются в декартовой системе координат. Сетки по полярному углу и оси ординат будем считать равномерными. Заметим, что  $I = K * L$ . Далее рассмотрим нелинейное операторное уравнение

$$A(\vec{R}(M)) = \vec{F},$$

где  $\vec{F}$  – совокупность измеренных рентгеновских лучевых сумм для  $N$  проекций:

$$\vec{F} = \{f_n^m\}; n = \overline{1, N};$$

где функция  $f_n^m(p)$  – измеренные лучевые суммы на  $n$ -ой проекции,

$\{p_j^n : j = \overline{1, J_n}\}$  – позиции пикселей  $n$ -ой проекции,

$\vartheta_n$  – угол проецирования для  $n$ -ой проекции,

$J = \sum_n J_n$  – суммарное число пикселей на всех проекциях.

Вектор  $\vec{R}(M)$  – радиус-вектор текущей точки внутренней поверхности трубы  $M(x, y, z)$ ,  $\{M_i : i = \overline{1, I}\}$  – позиции узлов решетки вышележающей внутренней поверхности. Оператор  $A$  связывает внутреннюю поверхность  $S$ , определяемую как годограф конца вектора  $\vec{R}(M)$  и проекции объекта, т.е.  $A(\vec{R}(M)) = \{(A(\vec{R}(M)))_n\}, n = \overline{1, N};$  здесь  $(A(\vec{R}(M)))_n = f_n^c(p)$  – расчетные лучевые суммы  $n$ -ой проекции. Для проецирования объекта контроля на плоскость детекторов мы будем рассматривать внутреннюю поверхность как совокупность элементарных поверхностных элементов  $S_u : u = \overline{1, U}, U = 2 * K * (L - 1)$ . Каждый такой элемент представляет собой треугольник, вершинами которого являются узловые точки дискретной решетки. Тогда  $S = \bigcup S_u, S_{u_1} \cap S_{u_2} = 0, u_1 \neq u_2$ . Отметим, что границы треугольника (т.е. его стороны и вершины) не обязательно принадлежат этому поверхностному элементу. Проекцию элемента поверхности  $S_u$  на детектор для некоторого

фиксированного положения пары источник-детектор  $n$  обозначим через  $\sigma_u^n$ . Разбиение поверхности осуществляется таким образом, что соприкасающиеся стороны соседних треугольников и их общие вершины будут принадлежать только одному из них. Такое разбиение всегда возможно и является неединственным. Оно может быть осуществлено двумя путями:

1) до начала реконструкции определенным образом маркируются границы каждого треугольника, затем, чтобы они не имели общих точек с границами соседних треугольников;

2) в процессе реконструкции принадлежность границ к элементу поверхности  $S_u$  определяется по проекции данного треугольника  $\sigma_u^n$  на текущем фильме. Это может быть установлено по топологической ориентации проекции поверхностного элемента  $\sigma_u^n$  на плоскости фильма. Далее осуществляется последовательный перебор всех элементов граничной оболочки и для каждого из них а) находится проекция треугольника  $S_u$  на текущую плоскость детекторов; б) устанавливаются границы треугольника  $\sigma_u^n$ ; в) определяются все пиксели  $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$ , центры которых лежат внутри треугольника  $\sigma_u^n$  или на его границах; г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей треугольника  $\sigma_u^n$  с поверхностью объекта.

После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию, либо убыванию параметра прямой, на которой лежит луч. Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, мы определим лучевую сумму  $f_n^c(p)$  для пикселя  $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$  определяющего данный луч. Таким образом, после обхода всех проекций мы определим все расчетные лучевые суммы. Функционал

$$\delta_n(\vec{R}(M)) = \sum_{p_i^n}^{p_{j_n}^n} (f_n^c(p) - f_n^m(p)) \left( / \sum_{p_i^n}^{p_{j_n}^n} f_n^m(p) \right)$$

измеряет отклонение внутренней поверхности  $S$ , заданной дискретной решеткой узлов  $M_i, i = \overline{1, I}$  от точной внутренней поверхности, для  $n$ -ой проекции. Среднее значение отклонения  $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) = \sum_n \delta_n(\vec{R}(M)) / N$ .

Далее осуществляется деформация внутренней поверхности трубчатого объекта. Для этого осуществляется последовательный перебор всех узловых точек граничной поверхности  $M_i, i = \overline{1, I}$ . Через каждую узловую точку  $M_i$  проводим  $N$  лучей, которые пересекут соответствующую плоскость детекторов в пикселях  $p_n^n, n = \overline{1, N}$ . Для вышеуказанных пикселей вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых проекционных интегралов  $\Delta f_n(p) = f_n^c(p) - f_n^m(p)$ . Потом находим взвешенную среднюю разность

$$\Sigma(M_i) = \sum_n \Delta f_n(p) * \cos(\psi_i^n) / N,$$

где  $\psi_i^n$  – это угол между проекциями на плоскость перпендикулярную оси ординат (напомним, что конический источник вращается вокруг оси ординат) луча проведенного через данный узел  $M_i$  от источника расположенного под углом  $\vartheta_n$  и радиус-вектора  $\vec{R}(M_i)$ . Величина смещения узла  $M_i$  будет равна

$$h(M_i) = \lambda^{(0)} * \Sigma(M_i),$$

$$0 < \lambda^{(0)} < 1,$$

где  $\lambda^{(0)}$  – величина параметра релаксации для 1-й итерации. Смещение производится вдоль перпендикуляра, опущенного из данного узла  $M_i$  на ось ординат. Если в среднем рассчитанные лучевые суммы больше, чем измеренные, то смещение  $h(M_i)$  будет положительным. Это приведет к увеличению расстояния между узлом и осью ординат, т.е. толщина стенки трубчатого объекта станет меньше. Смещение внутренней поверхности осуществляется для всех

узловых точек  $M_i, i = \overline{1, I}$  одновременно. После смещения всех узловых точек  $M_i$  мы получим новую дискретную решетку  $M_i^{(1)}, i = \overline{1, I}$ . Для  $(q+1)$ -ой итерации будем иметь соответственно:

$$\Sigma(M_i^{(q)}) = \sum_n \Delta f_n^{(q)}(p) * \cos(\psi_i^n) / N,$$

$$h(M_i^{(q)}) = \lambda^{(q)} * \Sigma(M_i^{(q)}),$$

$$0 < \lambda^{(q)} < 1.$$

После внесения очередного массива поправок  $h(M_i^{(q)}), i = \overline{1, I}$  мы получим очередное приближение  $\vec{R}(M_i^{(q+1)}), i = \overline{1, I}$ . Итерационный процесс останавливается, если для трех последовательных итераций не удастся получить лучшее приближение. То есть, если справедливы неравенства

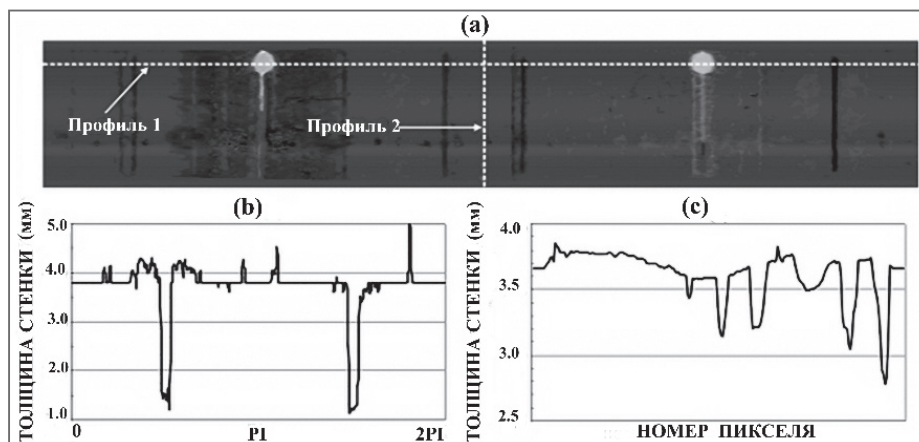
$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-1)}))$$

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-2)}))$$

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-3)})).$$

### 3. Примеры реконструкции изображений промышленных объектов

В БАМ (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung или БАМ, Берлин) была произведена реконструкция внутренней поверхности тестовой трубы из нержавеющей стали. Внешний диаметр трубы был равен 112 мм. Толщина стенки равнялась 3.6 мм. Внутренняя поверхность трубы имела впадины и выпуклости различных размеров. Число итераций равнялось 10–15. Функционал невязки минимизировался



(a) – Развертка трубы вместе с геометрическим расположением двух профилей

(b) – Профиль трубы по окружности – (Профиль 1) (c) – Профиль трубы вдоль продольной оси – (Профиль 2)

Рисунок 1 – Внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу

до значения 0.0785. В сравнении с реальным тестовым объектом было установлено, что погрешность реконструкции была порядка 2%, а величина артефактов – 1%. Среднее отклонение реконструированного переменного внутреннего радиуса трубы от истинного значения в тех местах, где не было выступов и впадин равно 100 мкм. На рис. 1 показана реконструированная внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу.

После реконструкции внутренней поверхности для труб большого диаметра с целью определения толщины стенок производится рентгеновское сканирование вышеупомянутой трубы согласно схеме, приведенной на рис. 2.

Идея данного подхода заключается в том, что реконструкция осуществляется по неполным данным, согласно схеме, приведенной на рис. 2. Для этого в программе реконструкции задаются размеры областей рентгеновских проекций, находящиеся на краях двумерных цифровых изображений, сформированных плоскими матрицами детекторов, которые не будут использоваться в процессе реконструкции. Приведем пример использования вышеприведенной схемы сбора рентгеновских данных. Для проверки возможности реализации предлагаемой методики сначала был рассчитан спектр рентгеновской трубки для напряжения 320 кВ. Было смоделировано трехмерное модельное изображение трубы с внешним диаметром 120 мм и внутренним диаметром 104 мм. В центре трубы был смоделирован сварной шов, который на 2 мм выступал наружу и внутрь трубы. В центральную часть сварного шва были введены дефекты, которые представляли собой трещины различной конфигурации шириной в один воксель и круглая пора размером в два вокселя. Изображение сечения трубы в месте расположения дефектов представлено на рис. 3.

На модельные проекции дополнительно был наложен шум амплитудой 4%.

Далее на рис. 4 показано реконструированное изображение поперечного слоя трубы, в котором находятся дефекты, полученное по полным данным.

На рис. 5 показано изображение поперечного слоя трубы, для реконструкции по тем же модельным проекциям, но без использования прямоугольных областей, находящихся на расстоянии 68 пикселей слева и справа от краев трубы.

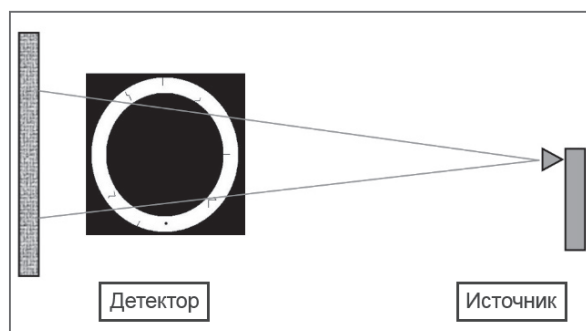


Рис. 2. Схема сканирования трубы ограниченным рентгеновским пучком

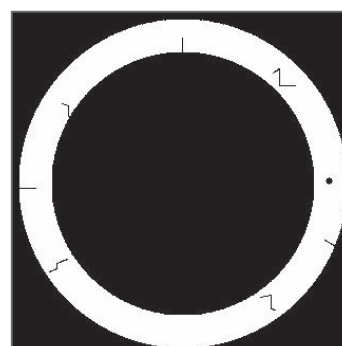


Рис. 3. Сечение модельной трубы в месте расположения дефектов

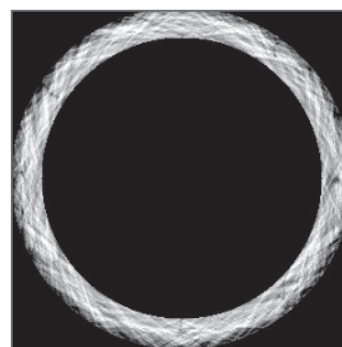


Рис. 4. Изображение поперечного слоя трубы, реконструированное по рентгеновским данным для полного рентгеновского пучка



Рис. 5. Изображение поперечного слоя трубы, реконструированное по рентгеновским данным для ограниченного рентгеновского пучка

### Заключение

Сравнение изображения, реконструированного по рентгеновским данным для ограниченного рентгеновского пучка с исходным модельным изображением (см. рисунок 3) показало, что пространственное положение, конфигурация и геометрические размеры дефектов восстановлены с достаточной для практических целей точностью.

Техническим результатом осуществления предлагаемого способа является

повышение точности определения толщины стенок труб и полых трубчатых объектов, имеющих продольное осевое направление, а также пространственного расположения, конфигурации и геометрических размеров внутренних дефектов для труб большого диаметра даже при наличии существенной модельной неопределенности на проекциях краев трубы (эффект ужесточения рентгеновского пучка плюс дополнительное рассеяние).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 8774349 США, МКИ G01N 023/04. Устройство и способ неразрушающего контроля объектов контроля цилиндрической или трубчатой формы с помощью рентгеновских лучей / Yxlion International GmbH, Гамбург (Германия). – № 13/142442; Заявлено 21.12.2009; Опубл. 08.07.2014; – 9 с., 3 л. ил.
2. **Золотарев С.А., Венгринович В.Л., Тиллак Г.-Р.** 3-х мерная реконструкция внутренней поверхности двухсвязного бинарного объекта по малому числу проекций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2001. – № 2. – С. 8–11.
3. **Венгринович В.Л., Золотарев С.А.** Итерационные методы томографии // – Минск: «Белорусская наука», – 2009. – 227 с.

### REFERENCES

1. Pat. US 8774349, IPC G01N 023/04. An apparatus and method for non-destructive inspection and testing of objects of cylindrical or tubular shape by using an X-ray radiographic / YXLON International GmbH, Hamburg (Germany). – № 13/142442; Stated 21.12.2009; Publ. 07/08/2014; – 9 with 3 l. yl.
2. **Zolotarev S.A., Vengrinovich V.L., Tillack G.R.** Three-Dimensional Reconstruction of the Inner Surface of a two-bound binary object by a small number of projections – Kiev, 2001. – number 2 – pp. 8–11.
3. **Vengrinovich V.L., Zolotarev S.A.** Iterative methods of tomography // – Minsk „Belarusian Science“ – 2009. – 227 p.

Поступила  
01.08.2020

После доработки  
21.08.2020

Принята к печати  
01.09.2020

ZOLOTAREV S. A.<sup>1</sup>, SAVENIA P. S.<sup>1</sup>, ZHUKOV K. A.<sup>1</sup>, SEDNINA M. A.<sup>2</sup>

## METHOD OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF THICKNESS AND INTERNAL DEFECTIVITY OF THE WALLS OF METAL PIPE

*The possibility of an accurate estimation of the pipe wall thickness measured directly from the reconstructed image of the pipe, reconstructed from only a few X-ray projections made in a limited viewing angle, is discussed. Since the effects of radiation scattering and X-ray beam hardening distort up to 50% of the primary radiation, ignoring these effects leads to blurred images, strong artifacts, and inaccurate sizing. A computerized technique has been developed that takes into account the contribution of scattered radiation and the hardening of the X-ray beam. Iterative Bayesian reconstruction techniques are then used to reconstruct the pipe image using the volumetric and surface-oriented representation of the pipe. Using these methods, the error in estimating the pipe wall thickness can be increased to 300 microns.*



**Золотарев Сергей Алексеевич.** Специалист в области: решение обратных задач из неполных данных и качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработчик алгоритмов и программного обеспечения для КТ объектов с ограниченным углом обзора и небольшим числом проекций. Разработчик оболочечных методов реконструкции изображений кусочно-однородных объектов, имеющих конечное число различных однородных частей. Разработчик новых параллельных алгоритмов с использованием графических процессоров и использованием системы MPI для реконструкции изображений.

E-mail: sergei.zolotarev@gmail.com.



**Савеня Павел Сергеевич.** Автор научных публикаций с докладами в материалах университетских конференциях. Область научных интересов: искусственный интеллект, компьютерная графика и визуализация, мониторинг строительных конструкций.  
E-mail: [savenia@iaph.bas-net.by](mailto:savenia@iaph.bas-net.by).



**Жуков Константин Андреевич.** Автоматизация технических процессов, реконструктивная томография, базы данных и базы знаний, компьютерная графика и визуализация.  
E-mail: [kosty.zhukov.2011@gmail.com](mailto:kosty.zhukov.2011@gmail.com).



**Седнина Марина Александровна.** Автор двух научных публикаций с докладами в материалах университетской, республиканской и международной конференциях. Область научных интересов: системный анализ, ERP-системы.  
E-mail: [sednina@bntu.by](mailto:sednina@bntu.by).