

ИТЕРАЦИОННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРШНЯ

¹Золотарев С. А., ²Таруат А. Т.

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь, zolotarev@iaph.bas-net.by,

²Беларусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь, vjgj994@gmail.com

Аннотация. В настоящее время для контроля фасонных отливок сложной формы все чаще применяют рентгеновскую томографию. Задачи неразрушающего контроля решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии, способной без геометрических искажений, с высокой степенью точности бесконтактно в интерактивном режиме произвести необходимые измерения. Достижимая точность соизмерима с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий.

Ключевые слова: поршень, компьютерная томография, алгебраическая реконструкция, лучевые интегралы.

Abstract. Currently, X-ray tomography is increasingly used to control shaped castings of complex shapes. The tasks of non-destructive testing are solved with the help of industrial X-ray tomography, which is capable of making the necessary measurements without geometric distortions, with a high degree of accuracy, non-contact and interactively. The achieved accuracy is comparable to the accuracy of traditional means of contact measurement of the external dimensions of industrial products.

Key words: piston, computed tomography, algebraic reconstruction, ray integrals.

Необходимость использования быстрых алгоритмов компьютерной томографии.

В настоящее время большинство используемых на практике методов томографии основаны на использовании стандартного метода фильтрованных обратных проекций *FBP* [1]. В компьютерной томографии набор исходных рентгеновских проекций, не может быть полным, а угол обзора контролируемого объекта далеко не всегда является всесторонним (круговым). В таких случаях алгоритмы, основанные на интегральных преобразованиях, уже не работают и нужно использовать итерационные методы реконструкции изображений. Результирующее изображение при этом достигается методом последовательных приближений. Мы можем существенно увеличить число возможностей по преодолению ограниченности исходной информации. Нетрудно убедиться в том, что итерационные алгебраические алгоритмы реконструкции изображений во многих случаях дают гораздо лучшие результаты по сравнению с традиционными вычислительными алгоритмами, основанными на методах интегральных преобразований. Сами по себе обычные последовательные итерационные алгоритмы

вычислительной рентгеновской томографии являются достаточно гибкими и позволяют эффективно использовать различные способы регуляризации процесса реконструкции и использовать априорную информацию об объекте.

Отметим, что, несмотря на ряд достоинств, они имеют два существенных недостатка. Первым из них является недостаток заключается в низкой скорости сходимости итерационного процесса, что заставляет использовать большое количество итераций и приводит к тому, что их выполнение на обычных последовательных компьютерах требует недопустимо большого времени для достижения удовлетворительного результата. Вторым недостатком, является требование наличия огромного объема оперативной памяти компьютера, предназначенной для хранения вектора восстанавливаемого изображения, набора рентгеновских проекций и проекционной матрицы. То есть, как и для многих вычислительных алгоритмов, предназначенных для работы с большими объемами данных, над итерационными алгоритмами томографии довлелет «проклятие размерности», то есть, это значит, что указанные недостатки невероятно усугубляются с увеличением размерности восстанавливаемого изображения объекта контроля. Мы использовали в этой работе графический процессор для ускорения вычислений.

Последние два десятилетия наиболее динамично развивались именно графические процессоры (GPU). В первую очередь это было обусловлено требованиями современной компьютерной графики к повышению вычислительной мощности графических плат, необходимой для построения изображений в реальном масштабе времени. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать GPU в качестве устройства, способного значительно ускорить выполнение процесса реконструкции изображений.

В 1994 году Cabral [2] детально описал, как можно осуществить компьютерную томографию (основанную на методе фильтрованных обратных проекций) с помощью аппаратной поддержки текстурных отображений на основе использования GPU. Позже, Mueller and Yagel [3] использовали ту же самую аппаратную поддержку для итерационной реконструкции (с помощью метода *SART*), которая использовала текстурное отображение объема для прямого проецирования и обратное текстурное отображение объема для обратного проецирования. Этот подход оказался очень эффективным, так как обе этих операции можно реализовать путем использования стандартных инструкций графической библиотеки *OpenGL*, которая использует проективные текстуры [4] для обратного проецирования под произвольными углами

Алгоритм алгебраической реконструкции.

Данный метод был использован Хаунсфилдом для создания прототипа первого рентгеновского томографа. *ART* сводит задачу реконструкции изображения по его проекциям к задаче линейной алгебры, т. е. к задаче решения системы линейных алгебраических уравнений. Как правило, это приводит к необходимости решения СЛАУ вида:

$$Ax = p, \tag{1}$$

где $A = (a_{ij})$ – проекционная матрица;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор изображения;

$p = (p_1, \dots, p_m)$ – вектор проекций.

Применение итерационного алгебраического алгоритма для задачи вычислительной томографии впервые было описано в 1970 г. в работе [5]. В этом алгоритме в качестве начального приближения вектора изображений выбирается произвольное значение $x^{(0)} \in R^n$, в предположении, что система уравнений является совместной, $(k + 1)$ -я итерация получается из k -ой итерации путем прибавления некоторых добавок к предыдущему приближению. В порядке перебора последовательно рассматривается только один луч, например i -ый, а изменению подвергаются только те компоненты вектора $x^{(k)}$, которые соответствуют пространственным элементам, пересекаемым этим лучом. Величина невязки между измеренным значением p_i и рассчитанной (смоделированной) величиной проекции $\sum_j a_{ij} x_j^{(k)}$, полученной при подстановке приближенного решения после k -ой итерации $x^{(k)}$ перераспределяется между вокселями, расположенными вдоль i -го луча пропорционально их весовым коэффициентам a_{ij} в луче. В одном цикле k -й итерации изменяются значения только тех вокселей, которые пересекаются данным i -ым лучом, а остальные значения изображения остаются без изменения. Вычислительную схему метода алгебраической реконструкции можно определить следующим образом:

1. Начальное приближение $x^{(0)} \in R^n$ мы задаем произвольно;
2. $k + 1$ -я итерация рассчитывается по формуле

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^{(k)} (p_i - (a^i, x^{(k)})) / \|a^i\|^2 a^i, \quad (2)$$

где параметры релаксации $\lambda^{(k)}$ представляют собой заранее заданную последовательность чисел, а $i = i_k = k(\text{mod}_m) + 1$ т. е. лучи перебираются циклически.

Таким образом, алгебраический метод реконструкции изображений сводит задачу восстановления к решению СЛАУ (1), то есть, казалось бы, к стандартной задаче вычислительной линейной алгебры. Заметим, что применительно к проблеме реконструкции изображения данная задача имеет ряд характерных черт: размерность системы невероятно велика: число уравнений и неизвестных достигает порядка 10^7 – 10^{10} ; проекционная матрица $A = (a_{ij})$ является весьма разреженной, поскольку каждый луч пересекает очень незначительное количество вокселей, из-за этого более 90 % ее элементов равно нулю. Матрица A является прямоугольной размера $m \times n$, причем $m \neq n$, и, как правило, $m < n$. В последнем случае система уравнений является недоопределенной и, значит, система уравнений (2) является сильно неустойчивой относительно задания начальных данных.

Метод максимального правдоподобия.

Группа статистических алгоритмов реконструкции принадлежит к классу итерационных методов реконструкции. Статистические методы реконструкции обеспечивают различные преимущества, такие как моделирование физических эффектов и учет вероятностного распределения экспериментальных измерений. Недостатком этих методов является то, что они являются более сложными, чем

детерминированные итерационные методы и приводят к более высоким вычислительным затратам. Поэтому они в основном используются в тех случаях, когда другие методы не могут удовлетворить требованиям к качеству реконструируемых изображений. Обычно итерационные статистические методы реконструкции широко используются в эмиссионной томографии и более редко в трансмиссионной компьютерной томографии. В 1982 году Шепп представил статистический метод максимального правдоподобия для реконструкции в эмиссионной томографии, который вызвал значительный интерес к статистическим методам реконструкции. В этой работе мы будем использовать статистический метод максимального правдоподобия для трансмиссионной томографии. Рассмотренный ниже вариант его использования основан на работе Фесслера и Ланге [6]. Более конкретно укажем, что наибольший интерес для нас представляет вариант метода максимального правдоподобия на основе выпуклой оптимизации, также предложенный в вышеуказанной работе. Другие методы статистической реконструкции подробно описаны в работе [7].

Обратим внимание, что во многих работах используется натуральный логарифм функции правдоподобия, так называемая логарифмическая функция правдоподобия – *log-likelihood*. В ряде случаев более удобно работать именно с ней. Так как логарифм является монотонно возрастающей функцией, то логарифмическая функция правдоподобия достигает максимума в тех же самых точках, что и функция правдоподобия (*likelihood*). Следовательно, логарифмическая функция правдоподобия может быть использована вместо вероятности в методе максимального правдоподобия.

В трансмиссионной томографии необходимо реконструировать значения коэффициентов линейного ослабления μ_j , заданные для каждого вокселя j . Так как μ_j является вероятностью захвата фотона вокселем j , то мы имеем очевидное физическое ограничение $\mu_j \geq 0$. Пуассоновский характер распределения сгенерированного рентгеновского излучения подразумевает, что распределения для различных проекций являются независимыми и что *log-likelihood* наблюдаемого количества фотонов может быть представлена как:

$$L(\mu) = \sum_i \{-d_i \exp - (a_i, \mu) - Y_i(a_i, \mu)\} + c. \quad (3)$$

В уравнении (3) d_i – ожидаемое количество фотонов выходящих из источника рентгеновского излучения и попадающих в i -ый пиксель рассматриваемой проекции; c – несущественная константа; μ – вектор коэффициентов ослабления μ_j ; a_i – вектор длин пересечений луча, выходящего из источника и попадающего в i -ый пиксель рассматриваемой проекции с вокселями, принадлежащими просвечиваемому объекту; и (a_i, μ) – скалярное произведение двух векторов, то есть:

$$(a_i, \mu) = \sum_j a_j, \mu_j.$$

В работе [6] Ланге предложил модифицированный алгоритм для расчета логарифмической функции правдоподобия, который позволил записать в конечном виде алгоритм вычисления вектора μ , обеспечивающего минимизацию \log -likelihood.

$$\mu_j^{n+1} = \mu_j^n + \mu_j^n \sum_i a_{ij} (d_i \exp - (a_i, \mu^n) - Y_i) / \sum_i a_{ij} (a_i, \mu^n) d_i \exp - (a_i, \mu^n). \quad (4)$$

Формула (4) обеспечивает статистическое итерационное решение задачи реконструкции изображения, просвечиваемого объекта контроля.

Основными аргументами, которые показывают необходимость развития и дальнейшего исследования итерационных методов и алгоритмов, являются следующие:

- все они без труда адаптируются для случаев с различными схемами сбора проекционных данных;
- они являются пригодными для гораздо более широкого круга разнообразных технических задач по сравнению с методами, использующих интегральные преобразования.

Существует достаточно широкий перечень задач реконструкции изображений, где применение итерационных реконструктивных методов обеспечивает гораздо лучшие результаты: реконструкция объектов по ограниченному или неполному набору рентгеновских проекций; реконструкция объектов в ограниченном угловом диапазоне. Основным недостатком этих алгоритмов является относительно невысокая скорость их сходимости и значительное время, необходимое на их выполнение. Это обусловлено тем, что для получения достаточно точного решения часто приходится выполнять десятки, а иногда сотни итераций и обсчитывать очень большие двухмерные и трехмерные массивы данных. В качестве второго недостатка, ограничивающего их использование, можно привести требование наличия большого количества оперативной памяти ПК или рабочей станции, необходимой для хранения реконструируемого изображения, набора рентгеновских проекций, а также коэффициентов проекционной матрицы. Одним из способов преодоления этих проблем является использование для вычислений графических процессоров компьютеров. Итерационные методы применяются главным образом для задач очень большой размерности, которыми, как правило, являются задачи компьютерной томографии. Важно отметить, что в формуле (4) используются в качестве проекционных данных интенсивности рентгеновского излучения, поглощенного объектом реконструкции. Эта формула может быть достаточно просто реализована для вычислений на обычном последовательном процессоре. Применение графического процессора для вычислений по этой формуле вызывает значительные трудности. Нами был разработан новый оригинальный алгоритм, который позволил использовать формулу (4) для вычислений на графическом процессоре. Он был проверен на нескольких наборах рентгеновских данных, в том числе и на рентгеновских проекциях с интенсивностями для алюминиевого поршня без дефектов. На рис. 1.1 показаны модельные рентгеновские проекции алюминиевого поршня с интенсивностями для углов сканирования: 45° и 90° .

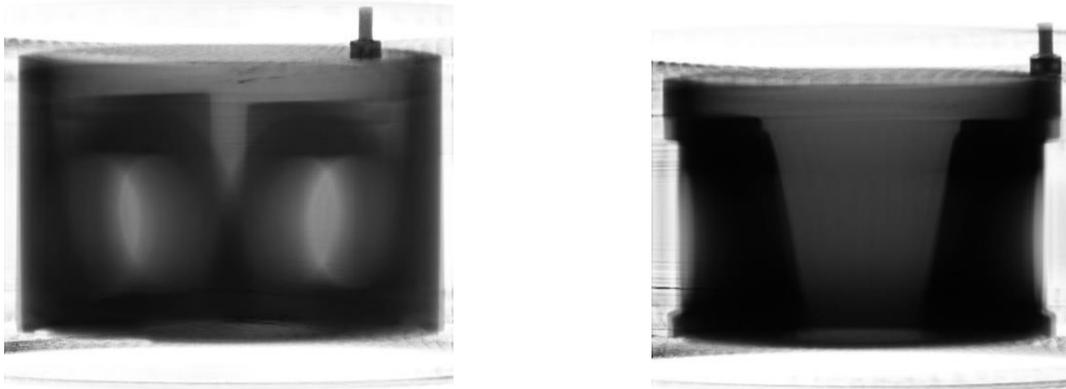


Рисунок 1.1 – Модельные рентгеновские проекции алюминиевого поршня для углов сканирования: 45° и 90°

На рис. 1.2 показаны экспериментальные рентгеновские проекции алюминиевого поршня с интенсивностями для углов сканирования: 45° и 90° .

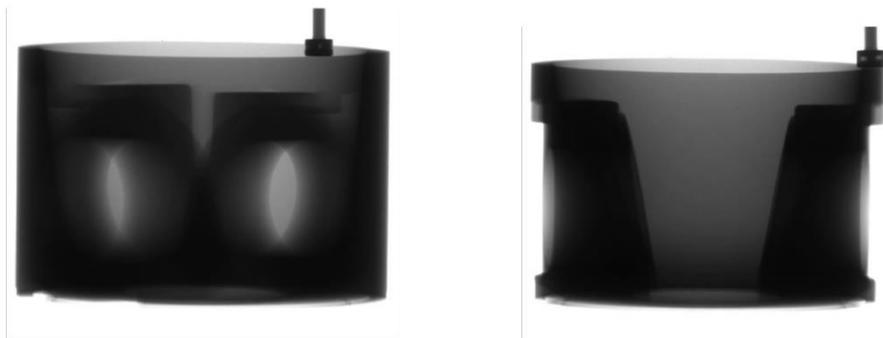


Рисунок 1.2 – Экспериментальные рентгеновские проекции алюминиевого поршня для углов сканирования: 45° и 90°

Схожесть экспериментальных и модельных проекций является подтверждением хорошего качества реконструкции по рентгеновским проекциям с интенсивностями, непоглощенного объектом рентгеновского излучения. На рис. 1.3 показаны перспективные виды реконструированного трехмерного изображения поршня: вверху показан торцевой вид поршня, а внизу – фронтальный вид поршня.

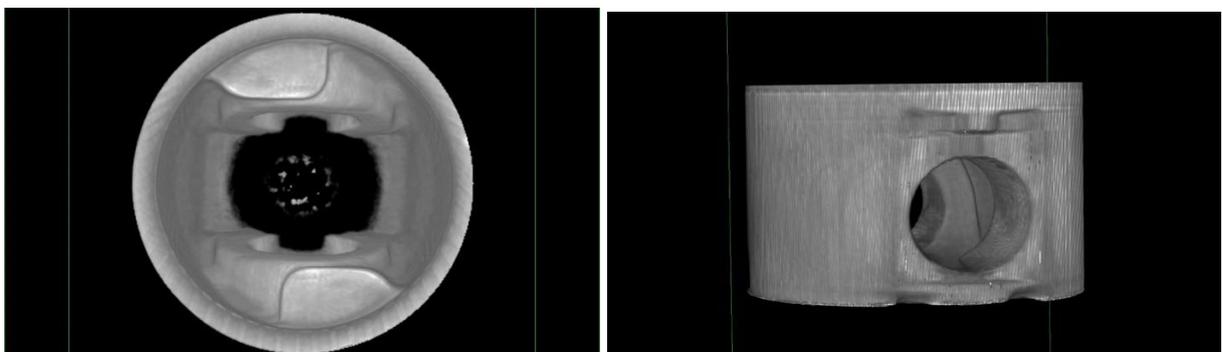


Рисунок 1.3 – Перспективные виды изображения поршня, слева – торцевой вид поршня, справа – фронтальный вид

Реконструкция алюминиевого поршня с дефектами по проекциям с лучевыми интегралами.

Реконструкция алюминиевого поршня с дефектами была выполнена с использованием алгоритма SART [8]. С целью изучения возможности выполнять виртуальные измерения на реконструированных трехмерных изображениях алюминиевых деталей, нами был подготовлен специальный образец на основе реального алюминиевого поршня, в котором в качестве искусственных дефектов были просверлены три серии отверстий различного диаметра и глубины. Каждая серия содержала по девять отверстий. Первая серия отверстий, расположенная на торцевой поверхности поршня, имела диаметры: 0,71; 0,82; 1,0; 1,1; 1,87; 1,97; 2,25; 2,69 и 3,0 мм. Вторая серия отверстий, расположенная внизу внешней цилиндрической поверхности поршня, имела диаметры: 0,71; 0,82; 1,0; 1,1; 1,87; 1,97; 2,25; 2,69 и 2,98 мм. Ниже на рис. 2.1 показана фотография поршня с первой серией отверстий. Кроме того, на этой стороне была расположена и третья серия отверстий с диаметрами: 1,97; 2,98; и 8,0 мм, которая находилась на торцевой поверхности бобышки поршня (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Первая и третья серии сверлений различных диаметров

На рис. 2.2 показана вторая серия сверлений, расположенных на наружной цилиндрической поверхности поршня вблизи его нижнего края.



Рисунок 2.2 – Вторая серия сверлений различных диаметров

Для осуществления рентгеновского сканирования вышеописанного экспериментального алюминиевого образца была использована рентгеноскопическая система X-Cube Compact. Рентгеновская съемка была проведена по договоренности с представителями физико-технического института НАН Беларуси, на участке дефектоскопии лаборатории точной штамповки. Всего на установке X-Cube Compact было снято 1600 проекций через угловой интервал $0,225^\circ$. Для томографической реконструкции были использованы 400 рентгеновских проекций с угловым шагом $0,9^\circ$. Поскольку этот вариант системы X-Cube Compact не предусматривает автоматический сбор рентгеновских данных через заданные углы сканирования, мы записали процесс сканирования с экрана монитора и сохранили его в виде видеофайла в формате *.avi. Потом с помощью кодека FFmpeg мы разбили это видео на кадры и использовали их в качестве проекционных изображений. Зная частоту кадров в секунду, которая была использована при снятии видео с экрана, мы заранее определили время вращения поворотного стола, необходимое для полного оборота в 360 градусов. На рисунке 2.3 показаны перспективные виды реконструированного трехмерного изображения поршня: слева показан торцевой вид поршня, а справа – фронтальный вид поршня.

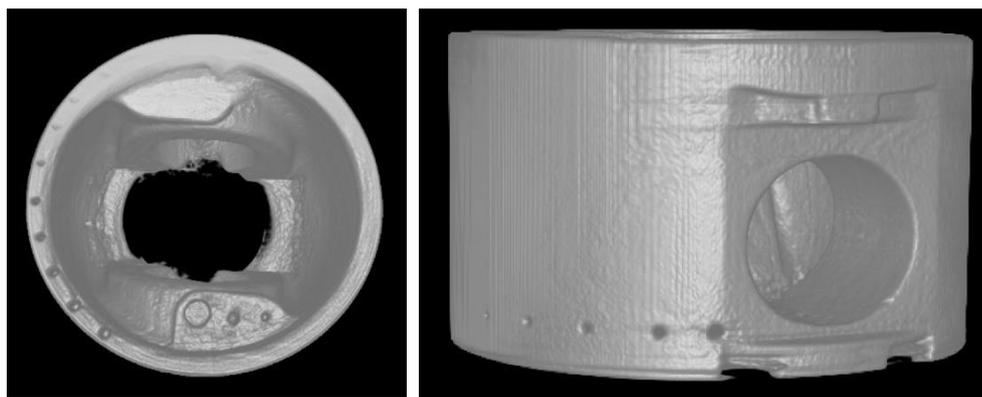


Рисунок 2.3 – Перспективные виды изображения поршня, слева – торцевой вид поршня, а справа – фронтальный вид

На реконструированном изображении хорошо видны все серии искусственных дефектов. Рентгеновская съемка алюминиевого поршня была сделана при таких параметрах рентгеновской установки: Напряжение на рентгеновской трубке было равно 116 кВ, анодный ток был соответствовал значению 5,2 мА. Дистанция от рентгеновского источника до матрицы детекторов была равна 1000 мм, а расстояние от рентгеновского источника до оси вращения составляло 665 мм. Размер пикселя на виртуальном детекторе был равен 180 мкм. Такое же значение имели ребра кубического вокселя реконструированного трехмерного изображения. С помощью ПО Volumegraphics Studio Max мы смогли измерить размеры элементов поршня с точностью до 0,18 мм. Способы использования графических процессоров для ускорения вычислений описаны в статье [9]. Принципы учета априорной информации для повышения качества реконструкции литейных изделий подробно изложены в работах [10; 11; 12].

Результаты и выводы.

По результатам данной работы можно заключить, что трехмерная рентгеновская томография фасонного машиностроительного литья является эффективным способом визуализации его внутренней структуры, который позволяет обнаруживать в литейных изделиях дефекты сплошности, а также измерять в интерактивном режиме все размеры, включая и скрытые полости. В этом смысле она может стать важным фактором управления качеством литья. Нужно отметить, что использование ускоренного с помощью графического процессора статистического алгоритма максимального правдоподобия выявило определенные преимущества такого подхода.

В первую очередь нам нет необходимости делать предобработку проекций и рассчитывать проекционные изображения с лучевыми интегралами, а также это позволяет учитывать статистические свойства проекционных изображений с интенсивностями непоглощенного объектом рентгеновского излучения и использовать эту информацию для повышения качества реконструированных изображений.

Список использованных источников:

1. Comparison of three-dimensional x-ray cone-beam reconstruction algorithms with circular source trajectories / P. Rizo [et al.] // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1991. – Vol. 8, № 10. – P. 1639–1648.
2. Cabral, B. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware / B. Cabral, N. Cam, J. Foran // *Symposium on Volume Visualization.* – 1994. – P. 91–98.
3. Mueller, K. Anti-aliased 3-D cone-beam reconstruction of low-contrast objects with algebraic methods / K. Mueller, R. Yagel, J. J. Wheller // *IEEE Trans. Med. Imag.* – 1999. – Vol. 18. – P. 519–537
4. Fast shadows and lighting effects using texture mapping / M. Segal [et al.] // *SIGGRAPH'92.* – 1992. – Vol. 26. – P. 249–252.
5. Gordon, R. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography / R. Gordon, R. Bender, G. T. Herman // *J. Theor. Biol.* – 1970. – № 29. – P. 471–481.
6. Lange, K. Globally convergent algorithms for maximum a posteriori transmission tomography / K. Lange, J. A. Fessler // *Image Processing, IEEE Transactions.* – 1995. – Vol. 4, No. 10. – P. 1430–438.
7. De Man, B. Statistical Methods for Image Reconstruction / B. De Man, J. Qi // *2009 IEEE Nuclear Science Symposium – Short Course Documents, Orlando, FL, USA.* – 2009. – 27 p.
8. Andersen, A. H. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm / A. H. Andersen, A. C. Kak // *Journal of Ultrasonic Imaging.* – 1984. – Vol. 6, No. 1. – P. 81–94.
9. Xu, F. Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity PC graphics hardware / F. Xu, K. Mueller // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2005. – Vol. 52. – P. 654–657.

10. Золотарев, С. А. Итерационная реконструкция изображений алюминиевого литья с учетом априорной информации / С. А. Золотарев, А. Т. Таруат, Э. Г. Биленко // Дефектоскопия. – 2023. – № 4. – С. 46–55.

11. Золотарев, С. А. Итерационная реконструкция изображения алюминиевого корпуса с учетом априорной информации / С. А. Золотарев, А. Т. Таруат, Э. Г. Биленко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. – № 1. – С. 46–52.

12. Zolotarev, S. A., Ahmed Talat Taufik Taruat, Bilenko, E. G. Taking into account a priori information in the iterative reconstruction of images of foundry products // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. – 2023. – Vol. 68, No. 3. – P. 242–251.