

DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3>

ИТЕРАЦИОННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРШНЯ, УСКОРЕННАЯ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

Научная статья

Золотарев С.А.^{1,*}, Таруат А.Т.²

¹ Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

* Корреспондирующий автор (zolotarev[at]iaph.bas-net.by)

Аннотация

В настоящее время для контроля фасонных отливок сложной формы все чаще применяют рентгеновскую томографию. Использование трехмерных изображений литейных изделий позволяет не только осуществлять эффективный контроль формы изделий и наличия в них дефектов, но и оказывает принципиальное влияние на промышленные технологии производства изделий машиностроения, замкнув технологический цикл производства в цепочку: «автоматизированное проектирование – автоматизированное производство – автоматический контроль». На ведущих машиностроительных предприятиях в развитых странах рентгеновская томография позволила вывести разработку, подготовку производства и контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения (автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, вертолетных лопастей, охлаждаемых турбинных лопаток) часто основано на использовании современных средств измерения линейных размеров с помощью традиционных контактных методов измерения. Однако такие измерения невозможны при оценке размеров внутри сложных фасонных деталей и сборных либо неразборных соединений. Штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной фермы, так же как, например, и величину зазора внутри неразборного клапана. Такие задачи 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: итерационные методы, реконструкция изображений, томография.

ITERATIVE IMAGE RECONSTRUCTION OF AN ALUMINIUM PISTON ACCELERATED ON A GRAPHICS PROCESSING UNIT

Research article

Zolotarev S.A.^{1,*}, Taruat A.T.²

¹ Institute of Applied Physics of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

* Corresponding author (zolotarev[at]iaph.bas-net.by)

Abstract

Nowadays, X-ray tomography is increasingly used to control moulded castings of complex shapes. The use of three-dimensional images of moulded products allows not only to perform effective control of the product shape and the presence of defects in them, but also has a fundamental impact on industrial production technologies of mechanical engineering products, closing the technological production cycle into a chain: "automated design – automated production – automatic control". At the leading machine-building enterprises in developed countries, X-ray tomography allowed to bring the development, production preparation and control of shaped castings of various parts of automobile and tractor engines to a qualitatively new level. Production of critical products of modern mechanical engineering (automobile, tractor and aircraft engines, helicopter blades, cooled turbine blades) is often based on the use of modern means of measuring linear dimensions by conventional contact measuring methods. However, such measurements are not possible when evaluating dimensions inside complex moulded parts and prefabricated or non-disassembled joints. It is impossible to measure the wall thickness of a cooled turbine blade of a complex truss with a caliper, as well as, for example, the gap inside a non-assembled valve. Such tasks are solved with the help of industrial X-ray tomography, which is able to perform the necessary measurements without geometric distortions and with a high degree of accuracy in a non-contact interactive mode. The achievable accuracy is comparable to the accuracy of traditional means of contact measurement of external dimensions of industrial products.

Keywords: iterative methods, image reconstruction, tomography.

Введение

В настоящее время большинство используемых на практике методов томографической реконструкции основаны на стандартном методе фильтрованных обратных проекций *FBP* (см., например, [1]). В компьютерной томографии набор исходных рентгеновских проекций, не всегда может быть полным, а угол обзора контролируемого объекта не всегда является всесторонним. В таких случаях алгоритмы, основанные на интегральных преобразованиях, уже не работают и используются 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 существенно 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.

Нужно отметить, что, несмотря на ряд достоинств, они имеют два существенных недостатка. Первый из них заключается в низкой скорости сходимости итерационного процесса, что заставляет использовать большое количество итераций и приводит в силу этого к тому, что их выполнение на обычных последовательных компьютерах требует значительного времени для достижения удовлетворительного результата. Вторым недостатком является требование наличия очень большого объема оперативной памяти компьютера, предназначенной для хранения вектора восстанавливаемого изображения, набора рентгеновских проекций и проекционной матрицы. Как и для многих вычислительных алгоритмов, предназначенных для работы с большими объемами данных, над итерационными алгоритмами томографии довлеет «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.

В области многоядерных процессоров в настоящее время известны графические процессоры (Graphics Processing Unit, GPU) и центральные процессоры (CPU) типа IBM CELL и Intel Core. Последние два десятилетия наиболее динамично развивались 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] 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. Так как обе этих операции можно просто 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:

$$Ax = p \quad (1)$$

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 $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$, 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 весам a_{ij} в луче. Значит, 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 $x^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ 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. Алгоритм ART отличается экономным использованием оперативной памяти, поскольку n – мерный вектор $x^{(k+1)}$ можно запоминать в том же месте оперативной памяти, что и предыдущий вектор $x^{(k)}$.

Таким образом, алгебраический метод сводит задачу восстановления к решению СЛАУ (1), то есть, казалось бы, к стандартной задаче вычислительной линейной алгебры. Однако применительно к проблеме реконструкции изображения данная задача имеет ряд характерных особенностей: размерность системы чрезвычайно велика: как правило, число уравнений и неизвестных порядка $10^7 - 10^{10}$; проекционная матрица $A = (a_{ij})$ является весьма разреженной, поскольку каждый луч пересекает очень незначительное число вокселей, поэтому 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 является недоопределенной и, как следствие, система уравнений (1) является неустойчивой относительно задания начальных данных.

Метод алгебраической реконструкции SART

Метод алгебраической реконструкции с одновременными итерациями SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) [6] представляет собой новый метод алгебраической реконструкции. Он был введен в практику Андерсеном и Кэком в 1984 году. Предложенный подход похож на метод ART, однако отличается тем, что одновременно корректируются все лучи, которые попадают на текущую проекцию. Требуемой задачей является восстановление значений x_j в n вокселях, принадлежащих области реконструкции, где индекс j пробегает значения от 1 до n . При этом мы используем значения p_i в пикселях с текущим индексом i , принадлежащих проекционным изображениям P_ϕ . Заметим, что угол ϕ , характеризует геометрическую ориентацию пары источник-детектор, для которой осуществлялось просвечивание. В уравнении (3), a_{ij} является известным весовым коэффициентом, с которым воксель с индексом j вносит свое значение в пиксель i . Алгоритм SART решает систему уравнений итерационным способом. При этом коррекция производится одновременно для всех вокселей, принадлежащих области реконструкции, на текущей итерации с номером k , как указано далее в формуле (3):

$$x_j^{(x)} = x_j^{(k-1)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P_\phi} \left(\frac{p_i - \sum_{l=1}^N a_{il} x_l^{(k-1)}}{\sum_{l=1}^N a_{il}} \right)}{\sum_{p_i \in P_\phi} a_{ij}} \quad (3)$$

В уравнении (3), λ является заранее заданным параметром релаксации, который обычно имеет значение меньше, чем два $0 < \lambda < 2$. Главное преимущество метода SART по отношению к классическому методу алгебраической реконструкции заключается в том, что он практически полностью устраняет полосовые артефакты, которые свойственны методу ART.

В этой работе для реконструкции изображения поршня был использован метод SART.

Для ускорения процесса реконструкции была использована усовершенствованная технология, на основе отображения текстурных изображений по методу Cabral. В качестве графического ускорителя была использована графическая видеокарта nVIDIA GeForce GTX 1060, имеющая 6GB текстурной памяти. Графические ускорители стали удобными для реализации на них неграфических вычислений, что обеспечено двумя основными факторами: критерием производительность/стоимость и темпами роста производительности графических процессоров, которая удваивалась каждые 6 месяцев. Благодаря использованию массивного параллелизма и векторных процессоров, современные графические устройства способны исполнять многие из приложений, которые ранее были реализованы на высокопроизводительных векторных суперкомпьютерах. Дальнейшие возможности использования графических процессоров для томографии приведены в статье [7], где авторы показали, как можно использовать новые графические процессоры с плавающей запятой для выполнения как аналитической, так и итеративной реконструкции по данным рентгенографии и функциональной визуализации. Было приведено три популярных алгоритма трехмерной реконструкции:

- 1) обратное проецирование с фильтром Фельдкампа;
- 2) метод одновременной алгебраической реконструкции (SART);
- 3) метод максимального правдоподобия.

Экспериментальная реконструкция алюминиевого поршня

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 рисунке 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. 1).



Рисунок 1 - Первая и третья серии сверлений различных диаметров
DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3.1>

На рисунке 2 показана вторая серия сверлений, расположенных на наружной цилиндрической поверхности поршня вблизи его нижнего края.



Рисунок 2 - Вторая серия сверлений различных диаметров
DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3.2>

Для осуществления рентгеновского сканирования вышеописанного экспериментального алюминиевого образца была использована рентгеноскопическая система X-Cube Compact. Она представляет собой универсальный радиоскопический комплекс с напряжением до 225 кВ для выборочного контроля и контроля небольших партий различных объектов, таких как отливки из легких металлов, изделия из стали, пластмассы, керамики и специальных сплавов. X-Cube выпускается в двух моделях: X-Cube Compact и X-Cube XL. Каждая из них может быть оборудована рентгеновскими трубками с напряжением 160 кВ или 225 кВ, различными манипуляторами грузоподъемностью до 100 кг. При этом модель XL имеет камеру большего размера и может использоваться для контроля образцов диаметром до 800 мм и высотой до 1500 мм, в отличие от модели Compact, которая рассчитана на образцы с диаметром до 600 мм и высотой до 900 мм. Система X-Cube хорошо известна как комплексное решение рентгенодефектоскопии, позволяющее обнаруживать малые дефекты. Система включает в себя надежный источник рентгеновского излучения – высокостабильную установку серии ISOVOLT Titan, систему управления рентгеновским аппаратом, манипулятор с зажимами для фиксирования образцов, камеру в рентгенозащищенном исполнении, эргономичный пульт управления, преобразователь рентгеновского излучения в стандартное видеоизображение, а также встроенную систему улучшения качества изображения VITAPLUS. Рентгеновская съемка была проведена по договоренности с представителями физико-технического института НАН Беларуси, на участке дефектоскопии лаборатории точной штамповки. На рисунке 3 показаны рентгеновские проекции алюминиевого поршня для углов сканирования: 0°, 45° и 90°.

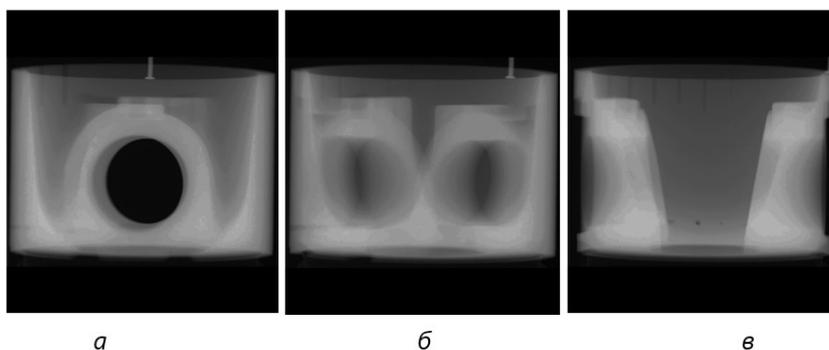


Рисунок 3 - Рентгеновские проекции алюминиевого поршня для различных углов
DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3.3>

Примечание: а – 0° ; б – 45° ; в – 90°

На рисунке 4 показаны рентгеновские проекции для углов 180° и 270° .

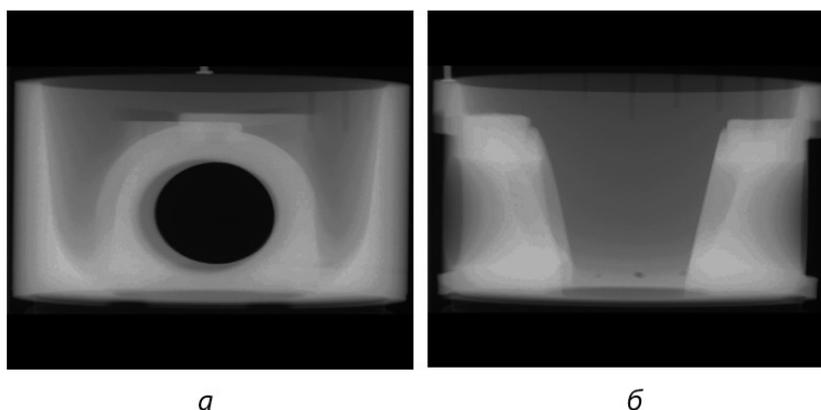


Рисунок 4 - Проекция алюминиевого поршня для различных углов
DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3.4>

Примечание: а – 180° ; б – 270°

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 сняли 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 5 показаны перспективные виды реконструированного трехмерного изображения поршня: слева показан торцевой вид поршня, а справа – фронтальный вид поршня.

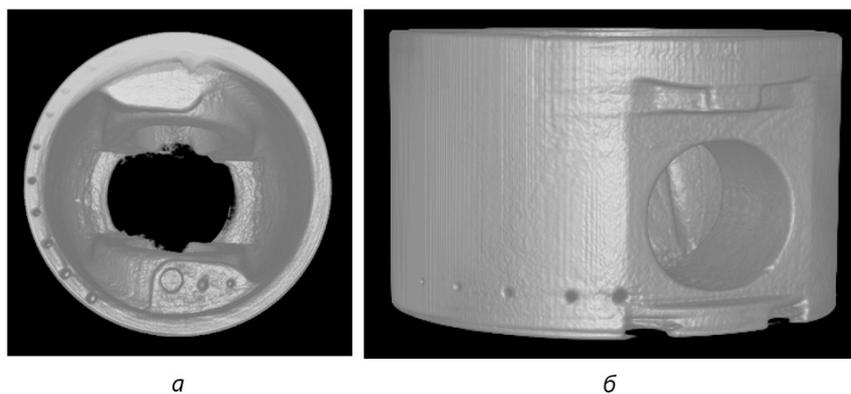


Рисунок 5 - Перспективные виды изображения поршня
DOI: <https://doi.org/10.18454/COMP.2024.1.3.5>

Примечание: а – торцевой вид поршня; б – фронтальный вид

На реконструированном трехмерном изображении хорошо видны все серии искусственных дефектов. Рентгеновская съемка алюминиевого поршня была произведена при следующих параметрах рентгеновской установки: Напряжение на рентгеновской трубке равнялось 116 кВ, анодный ток был равен 5,2 мА. Расстояние от рентгеновского источника до плоской матрицы детекторов было равно 1000 мм, а расстояние от рентгеновского источника до оси вращения равнялось 665 мм. Рассчитанное значение размера пикселя на виртуальном детекторе было равно 180 мкм. Такое же значение имели ребра кубического вокселя реконструированного трехмерного изображения. С помощью ПО Volumegraphics Studio Max, то есть, мы смогли измерить размеры элементов поршня с точностью до 0,18 мм. Принципы учета априорной информации для повышения качества реконструкции литейных изделий изложены в работах [8], [9], [10].

Заключение

По результатам исследования можно заключить, что трехмерная рентгеновская томография фасонного машиностроительного литья, как способ визуализации его внутренней структуры, позволяет обнаруживать в литейных изделиях дефекты сплошности, а также измерять в интерактивном режиме с высокой производительностью все размеры, включая и скрытые. В этом смысле она может стать важным фактором управления качеством литья.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Rizo P. Comparison of Three-dimensional X-ray Cone-beam Reconstruction Algorithms with Circular Source Trajectories / P. Rizo, P. Grangeat, P. Sire [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. Segal M. Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping / M. Segal, C. Korobkin, R. van Widenfelt [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. 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. — № 1. — P. 81-94.
7. 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.
8. 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.

9. 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.

10. Zolotarev S.A. Taking into Account A Priori Information in the Iterative Reconstruction of Images of Foundry Products / S.A. Zolotarev, A.T.T. Taruat, E.G. Bilenko // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*. — 2023. — Vol. 68. — № 3. — P. 242-251.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rizo P. Comparison of Three-dimensional X-ray Cone-beam Reconstruction Algorithms with Circular Source Trajectories / P. Rizo, P. Grangeat, P. Sire [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. Segal M. Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping / M. Segal, C. Korobkin, R. van Widenfelt [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. 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. — № 1. — P. 81-94.

7. 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.

8. Zolotarev S.A. Iteracionnaja rekonstrukcija izobrazhenij aljuminievogo lit'ja s uchetom apriornoj informacii [Iterative Reconstruction of Aluminium Casting Images Taking into Account A Priori Information] / S.A. Zolotarev, A.T. Taruat, Je.G. Bilenko // *Defektoskopija [Defectoscopy]*. — 2023. — № 4. — P. 46-55. [in Russian]

9. Zolotarev S.A. Iteracionnaja rekonstrukcija izobrazhenija aljuminievogo korpusa s uchetom apriornoj informacii [Iterative Aluminium Hull Image Reconstruction Taking into Account A Priori Information] / S.A. Zolotarev, A.T. Taruat, Je.G. Bilenko // *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika [Non-destructive Testing and Diagnostics]*. — 2023. — № 1. — P. 46-52. [in Russian]

10. Zolotarev S.A. Taking into Account A Priori Information in the Iterative Reconstruction of Images of Foundry Products / S.A. Zolotarev, A.T.T. Taruat, E.G. Bilenko // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*. — 2023. — Vol. 68. — № 3. — P. 242-251.