

УДК 620.179.152.1

А.В. Пешков

Вычислительная диагностика трещин и отслоений с использованием томографического подхода при наличии эталона исследуемого объекта

Рассматривается развитие подхода для решения задач промышленной дефектоскопии, использующее информацию об эталоне исследуемого объекта. Предлагаемый алгоритм томографической реконструкции основан на использовании априорной информации об эталонном образце. В случае промышленной томографии мы имеем дело с типовым изделием, для которого заранее известна вся его структура, следовательно, целесообразно использовать эти данные в качестве априорной информации при решении обратной задачи томографической реконструкции. Приведены результаты численных экспериментов для упрощенной модели изделия. Предложенный алгоритм демонстрирует свою эффективность в ситуации, когда классический алгоритм уже не справляется. Сделаны выводы о перспективности использования данного подхода при диагностике дефектов типа отслоений и трещин в промышленных изделиях.

Ключевые слова: компьютерная томография, дефектоскопия, томография области интереса, эталонный образец, вычислительно-эвристический алгоритм.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-95-101

Вычислительная (компьютерная) томография (КТ) представляет собой пример научного направления, проникающего практически во все области науки и техники, в которых применяются или могут быть применены какие-либо виды излучений.

Среди областей использования КТ можно выделить следующие: медицинская диагностика, неразрушающая диагностика промышленных изделий, системы безопасности, реконструкция объектов в электронной микроскопии, задачи геофизики.

Томография биологических объектов и тканей является очень важной задачей, имеющей большое прикладное значение для современной медицины. С её помощью получают необходимую диагностическую информацию о заболеваниях и травматических повреждениях [1–4].

Системы компьютерной томографии (КТ) для анализа материалов и других промышленных приложений, например неразрушающих испытаний, принципиально отличаются от клинических сканеров. В этих системах объект вращается, в то время как система источник рентгеновского излучения – регистратор остается неподвижной. Следует отметить, что в промышленной компьютерной томографии, как правило, не существует ограничений на дозы поглощенной энергии рентгеновского излучения облучения, поэтому используются источники с большей интенсивностью излучения по сравнению с клиническими компьютерными томографами. В промышленной томографии требования к разрешающей способности систем и точности измерений отличаются от клинической томографии, поэтому и параметры сканирования могут существенно отличаться от клинической КТ [5, 6].

В промышленности часто необходимо получить реконструкцию с высоким разрешением не всего объекта, а его фрагмента или нескольких фрагментов. Прогресс в области алгоритмического и программного обеспечения привел к возможности решения

этой задачи [7–9]. Объект вначале сканируется целиком с грубым разрешением, затем область, представляющая интерес, сканируется при большом увеличении и, соответственно, более высоком разрешении. При конечной обработке используется информация о реконструкции, полученная при сканировании с разных разрешений [10].

Данный подход, основанный на изучении интересующей области, представлен в работе [11]. Автор предлагает метод восстановления изображения области интереса по усеченным проекциям, основанный на применении цифровой рекурсивной фильтрации имеющихся данных. Предложенный подход позволяет уменьшить среднеквадратичную ошибку реконструкции по сравнению с алгоритмом Шеппа–Логана, однако целесообразность его применения зависит от радиуса интересующей области.

В работе [12] представлен метод реконструкции изображения сечения объекта, содержащего непрозрачное включение. Предложенный алгоритм решения задачи двумерной томографии на основе условия Кавальери позволяет оценить неизвестные проекционные данные в области тени. Использование данного алгоритма приводит к уменьшению среднеквадратичной ошибки реконструкции, однако требует большого количества ракурсов наблюдения.

Для случая, когда число проекций ограничено, существуют специальные алгоритмы малоракурсной компьютерной томографии. В работе [13] описаны пять алгоритмов реконструкции изображений по малому числу ракурсов. Данные алгоритмы показали свою эффективность при исследовании энерговыделения газодинамических объектов, однако они плохо адаптируются к задачам промышленной томографии.

Существуют также алгоритмы томографической реконструкции, основанные на попиксельном анализе томограмм. Например, в работе [14] предложен метод определения на томограмме области, соответствующей участкам объекта, заполненным однород-

ным веществом с заданной плотностью. Его суть заключается в том, что пиксели реконструированного изображения считаются принадлежащими рассматриваемой области, если их яркость лежит в определенном интервале, границы которого определяются из условия минимума взвешенной суммы вероятностей ошибок первого и второго рода. Эффективность данного алгоритма во многом зависит от выдвинутых предположений о статистическом распределении яркости пикселей томограммы.

Применение систем рентгеновской томографии ограничено в некоторых случаях в связи с малым уровнем сигналов на выходе детекторов. Для решения этой проблемы в работе [15] авторы предлагают математическую модель формирования высокоэнергетических цифровых радиографических изображений в условиях низких уровней цифровых сигналов. Данная модель показала эффективность применительно к контролю крупногабаритных объектов за счет цифрового суммирования изображений.

Среди отечественных исследователей также существуют проекты в области томографии с использованием «цифрового двойника». В работе [16] представлена блок-схема «цифрового двойника» рентгеновского 3D-микротомографа. В вычислительном блоке устройства предполагается использование следующих средств: искусственный интеллект, анализ больших данных, алгоритмы распознавания образов, цифровая экосистема. Проект предполагает масштабную и перспективную разработку, однако в настоящее время он находится только на стадии создания модели интеллектуального томографа.

Таким образом, существующие исследования направлены на повышение качества обработки полученных томографических изображений. Однако в настоящее время благодаря развитию технологий искусственного интеллекта возможно применение новых подходов, использующих вычислительно-эвристические методы. В данной работе далее будет представлен подход для промышленной томографии, использующий эвристический поиск на основе априорной информации об эталонном образце диагностируемого изделия.

Постановка задачи

Рассмотрим следующую ситуацию, когда исследуемый объект содержит дефекты с избирательной чувствительностью к зондирующему (в данном случае рентгеновскому) излучению, а именно трещины и отслоения. Такие дефекты отличаются узким поперечным сечением (раскрытием), имея при этом протяженное «простираение». Это создает условия, при которых часть лучей, пересекающих дефект существенно поперек (вкрест простираения), из-за ограниченных возможностей измерительной аппаратуры не «почувствуют» дефект, а тогда нарушается полнота проекционных данных, и классическая КТ неприменима. Конечно, лучи, тангенциально проходящие через дефект, будут информативными в отличие от уже отмеченных, назовем их нормальными.

Ставится задача, имея проекционные данные, включающие общую лучевую картину, диагностировать описанный выше дефект.

В условиях промышленной дефектоскопии в нашем распоряжении находится полная априорная информация об исследуемом объекте – это проектная документация, в соответствии с которой данное изделие выпускается. Таким образом, имеется возможность синтеза проекционной матрицы для эталонного образца (случай, когда это невозможно, в данное исследование не включаются). Данное обстоятельство дает возможность построения решения поставленной задачи.

В данной работе в качестве «решателя» (базового метода) используется алгебраическая реконструкция, сводящая решение томографической задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с сильно разреженной матрицей, т.е. присутствует достаточно большое число нулевых элементов. Однако априорная информация об объекте исследования позволяет эту систему «дозаполнить» априори известными слагаемыми в уравнениях, что значительно облегчает процедуру решения и повышает устойчивость и достоверность интерпретации измерительных данных. Таким образом, используемый метод попадает в категорию «сильных», то есть примененная эвристика дает прогрессивный эффект. Такой подход определяет название разработанного алгоритма как «вычислительно-эвристический алгоритм». Сюда же следует отнести и способ отбора информативных (рабочих) лучей, который будет описан далее.

Классический метод томографической реконструкции

Рассмотрим описанные выше этапы на примере упрощенной модели. Пусть мы имеем изделие с круглым поперечным сечением единичного радиуса, внутри которого имеется трещина, представленная областью между двух парабол (рис. 1). Далее на рабочем пространстве накладывается сетка, разбивая исследуемый объект на пиксели. В данном исследовании используется сетка 40×40 пикселей.

Томографическое исследование начинается с измерения проекционных данных, полученных с помощью сканирования изделия множеством лучей с разных точек. В данной работе используется веерная схема сканирования, которая поворачивается вокруг объекта исследования (рис. 2). Имеется возможность устанавливать количество лучей, исходящих из источника, и количество положений источника, т.е. угол поворота.

Набор измерений для одного положения источника называется проекцией. Располагая полученные проекции в виде соответствующих матричных строк, получим проекционную матрицу \mathbf{A} , элементы которой представляют характеристику луча на основе плотности пройденного им материала:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NM} \end{pmatrix} = \{a_{ij}\}, \quad (1)$$

где a_{ij} – значение на приемнике для i -го луча при j -м положении источника, N – количество лучей в веере, M – количество положений источника, $i \in 1 \dots N$, $j \in 1 \dots M$.

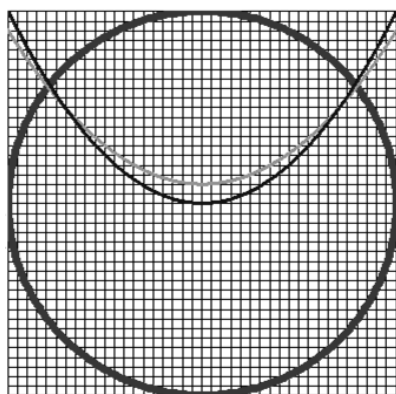


Рис. 1. Модель объекта с дефектом

Такая матрица может быть получена либо экспериментально путем пропуска через объект исследования рентгеновского излучения, соответственно, элементами проекционной матрицы будут значения интенсивности, полученные на приемнике, либо рассчитана синтетически для цифрового двойника объекта исследования.

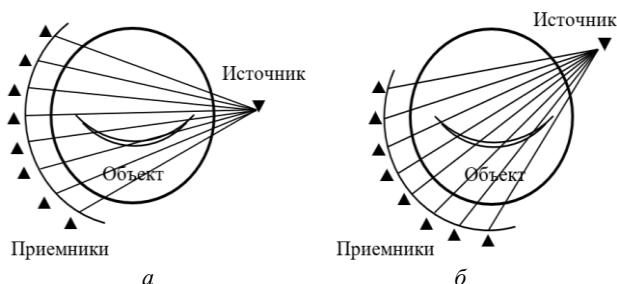


Рис. 2. Модель объекта с дефектом: *a* – начальное положение; *б* – положение после перемещения

Так как в данном исследовании речь идет о модельном эксперименте, то необходимо использовать синтетический алгоритм генерации проекционных данных. В качестве моделируемого значения интенсивности рентгеновского излучения на приемнике будет выступать следующая величина:

$$a = \sum_i^H l_i \cdot p_i, \quad (2)$$

где l_i – длина луча на i -м отрезке, p_i – значение плотности материала на i -м отрезке, H – количество отрезков луча со сменой плотности, $i \in 1..H$.

Для удобства расчетов плотность внутри изделия принята равной единице, а вне изделия и внутри дефекта – равной нулю. Таким образом, смоделированное значение интенсивности сигнала будет уменьшаться при прохождении луча через дефект.

Так как нас интересуют только численные значения плотности материала в каждом пикселе, а не его функциональная зависимость от координат, то можно перейти от решения системы интегральных уравнений к решению СЛАУ. Таким образом, для решения задачи томографической реконструкции без использования априорной информации об эталонном образце используется следующий алгоритм:

1. Вычислить проекционную матрицу **A** для исследуемого объекта.

2. Преобразовать матрицу **A** в вектор **B**, который будет соответствовать правой части СЛАУ, где B_i – смоделированное значение интенсивности сигнала i -го луча на приемнике.

3. Разбить рабочее пространство на P пикселей с помощью наложения сетки.

4. Рассчитать матрицу коэффициентов СЛАУ **AA**, где AA_{ij} – длина i -го луча в j -м пикселе (i от 1 до $M \times N$, j от 1 до P).

5. Задать вектор неизвестных СЛАУ **X**, где X_j – значение плотности материала объекта в j -м пикселе.

6. Решить систему **AA** × **X** = **B** приближенным итерационным методом с заданными ограничениями на неизвестные ($0 \leq X_j \leq 1$).

7. Преобразовать вектор **X** в матрицу **XX** и построить ее графическое изображение (тепловую карту).

В качестве метрики достоверности будет использована средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{Pixels} \sum_{j=1}^{Pixels} |X_j - X_{real_j}|, \quad (3)$$

где $Pixels$ – количество пикселей рабочей области, X_j – вычисленное алгоритмически значение плотности в j -м пикселе, X_{real_j} – реальное (модельное) значение плотности в j -м пикселе. Так как X_j может принимать значения только из диапазона $0..1$, то метрику MAE в данном случае можно считать относительной оценкой, которая преобразуется в процентную ошибку при умножении на 100%.

Для нахождения X_{real} необходимо рассчитать модельные значения плотностей пикселей (рис. 1). Расчет модельного (реального) значения плотности в пикселе производится следующим образом:

1. Пиксель равномерно заполняется F -точками.

2. Для каждой точки определяется ее статус: «в объекте», «в дефекте», «за пределами объекта» (рис. 3).

3. Количество точек со статусом «в объекте» делится на F – общее число точек в пикселе.

4. Таким образом, получается нормированное значение плотности в диапазоне от 0 до 1.

Рассмотрим работу алгоритма на примере модели со следующими параметрами: число положений источника – 80, число лучей от одного источника – 80, размер сетки 40×40 , в алгебраической реконструкции участвуют все $80 \cdot 80 = 6400$ лучей. При этом ширина раскрытия дефекта изменяется с 0,2 (4 пикселя) до 0,05 (1 пиксель).

Результат работы алгоритма томографической реконструкции в виде тепловой карты представлен на рис. 4. Справа от изображений приведена шкала плотности пикселей. Выходные параметры работы алгоритма приведены в таблице.

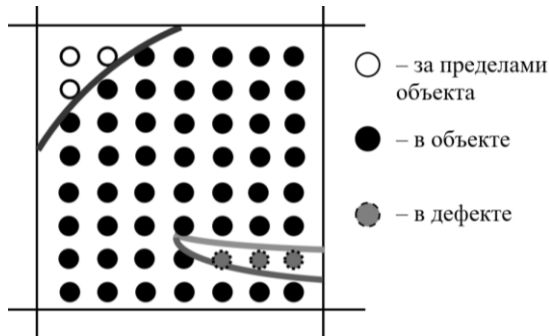


Рис. 3. Статусы точек в пикселе

Как видно из приведенных в таблице показателей для данной серии экспериментов, трудоемкость классического метода значительно велика. Также на изображениях восстановленных дефектов присутствуют некоторые артефакты, т.е. точечные пиксели вне дефекта, значения которых заметно отличаются от соседних. При ширине раскрытия дефекта менее 0,15 восстановленное изображение дефекта смазывается, а при 0,05 алгоритм не позволяет восстановить форму дефекта. Следовательно, достигнута граница применимости классического метода КТ для имеющегося набора измерений.

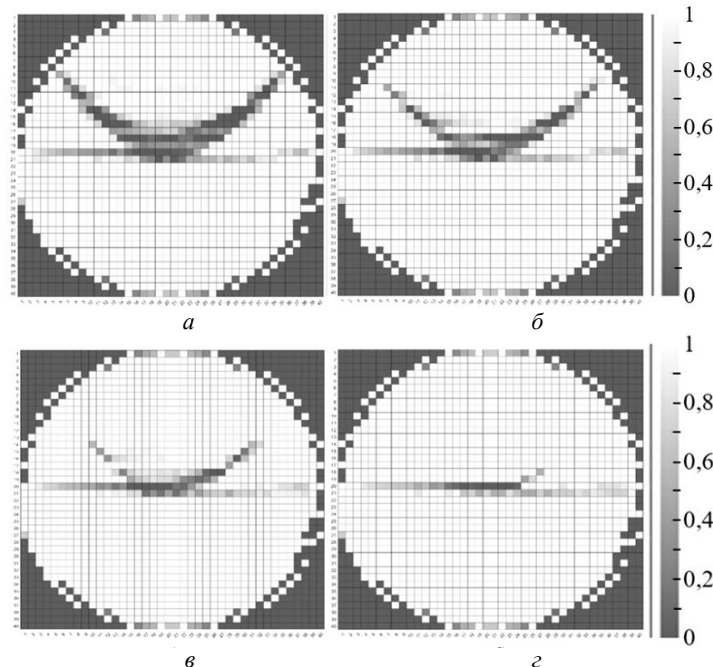


Рис. 4. Результат работы алгоритма без использования априорной информации для дефекта шириной: а – четыре пикселя; б – три пикселя; в – два пикселя; г – один пиксель

Результаты экспериментов

Ширина раскрытия дефекта d , доля от радиуса объекта	Кол-во лучей в веере N	Кол-во положений веера M	Кол-во используемых лучей L	Размер сетки P	Ошибка восстановления MAE	Время вычисления t , с
0,20	80	80	6 400	40×40	0,0832	75
0,15	80	80	6 400	40×40	0,0813	75
0,10	80	80	6 400	40×40	0,0762	78
0,05	80	80	6 400	40×40	0,0676	76
0,05	80	80	250*	40×40	0,0531	17
0,05 (3 шт.)	80	80	350*	50×50	0,0582	37

* Отобранные информативные лучи.

Метод реконструкции с использованием априорной информации

Для построения локальной томографической реконструкции в случаях, когда классические методы КТ неприменимы (например, из-за низкой чувствительности дефекта к зондирующему излучению), предлагается подход, основанный на эвристическом поиске, который использует априорную информацию об эталонном образце исследуемого изделия.

Эвристические алгоритмы широко используются для решения задач высокой вычислительной

сложности, к которым относится компьютерная томография. В данном подходе эвристический поиск заключается в следующем: вместо алгебраической реконструкции на основе всех лучей, занимающей значительное время, используется гораздо более быстрый ограниченный поиск дефекта среди «перспективных» пикселей, отобранных с помощью информативных лучей. Тогда алгоритм томографической реконструкции будет выглядеть следующим образом:

1. Вычислить проекционную матрицу A для исследуемого объекта.

2. Вычислить проекционную матрицу \mathbf{A}^* для эталонного объекта без дефекта.

3. Получить рабочую матрицу \mathbf{RR} , полученную вычитанием матриц из первых двух пунктов.

4. Преобразовать матрицу \mathbf{RR} в трехмерный вектор \mathbf{R} , где R^1 – значение разницы интенсивности для объекта и его эталона, R^2 – номер луча в пучке, R^3 – номер положения источника.

5. Отсортировать по убыванию вектор \mathbf{R} по измерению R^1 .

6. Построить графическое изображение вектора \mathbf{R}^1 и определить по графику точку резкого изменения крутизны, которая будет соответствовать количеству информативных лучей L (рис. 5).

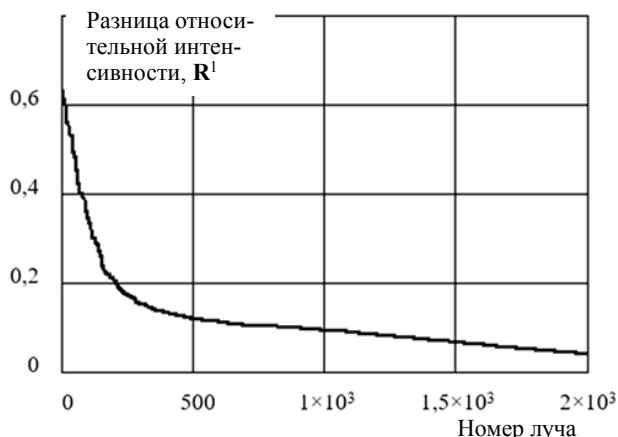


Рис. 5. Отсортированные по убыванию значения вектора \mathbf{R}

7. На основании векторов \mathbf{R}^1 и \mathbf{R}^2 преобразовать матрицу \mathbf{A} в вектор \mathbf{B} , где B_i – смоделированное значение интенсивности сигнала i -го луча на приемнике (i от 1 до L).

8. Разбить рабочее пространство на P пикселей с помощью наложения сетки.

9. Рассчитать матрицу коэффициентов СЛАУ \mathbf{AA} , где AA_{ij} – длина i -го луча в j -м пикселе (i от 1 до L , j от 1 до P).

10. Задать вектор неизвестных СЛАУ \mathbf{X} , где X_j – значение плотности материала объекта в j -м пикселе.

11. Вырезать из матрицы \mathbf{AA} матрицу $\mathbf{Cut_MM}$, состоящую из столбцов \mathbf{AA} , сумма значений которых меньше порогового значения. Таким образом, полу-

чаем матрицу коэффициентов \mathbf{MM} , из которой исключены пиксели, через которые не проходят (или проходят мало) отобранные L лучей.

12. Вырезать из вектора \mathbf{X} элементы, соответствующие пикселям, сумма значений которых в \mathbf{AA} меньше порогового. Таким образом получаем вектор неизвестных \mathbf{NN} , из которого исключены пиксели, через которые не проходят (или проходят мало) отобранные L лучей.

13. Рассчитать вектор \mathbf{BB} , соответствующий скорректированной правой части СЛАУ: $\mathbf{BB} = \mathbf{B} - \mathbf{Cut_MM} \times \mathbf{E}$, где \mathbf{E} – единичный вектор, соответствующий количеству вырезанных столбцов из \mathbf{AA} .

14. Решить систему $\mathbf{MM} \times \mathbf{NN} = \mathbf{BB}$ приближенным итерационным методом с заданными ограничениями на неизвестные ($0 \leq NN_j \leq 1$).

15. Преобразовать вектор \mathbf{NN} в матрицу \mathbf{XX} с учетом восстановления вырезанных единичных значений и построить ее графическое изображение (тепловую карту).

Рассмотрим работу модифицированного алгоритма на той же модели. Результат п. 6 описанного выше алгоритма представлен в виде графика на рис. 5. По приведенному графику определяется количество «рабочих» (информативных) лучей L равное 250. В результате 11-го и 12-го пунктов алгоритма СЛАУ заметно упрощается, и из всей сетки 40×40 пикселей необходимо рассчитать значения только для 62.

Результат работы модифицированного алгоритма локальной томографической реконструкции представлен на рис. 6, а. Параметры сканирования такие же, как в предыдущем разделе, в алгебраической реконструкции участвуют 250 отобранных лучей, пороговое значение суммы длин лучей в пикселе – 1,5.

Далее предложенный алгоритм был применен на измененной модели: был добавлен еще один дефект такого же типа со смещением по оси абсцисс и один дефект в виде небольшого отверстия.

Параметры сканирования остались теми же, но размерность сетки была увеличена до 50×50 , а для реконструкции использовались отобранные 350 информативных лучей. Результат работы модифицированного алгоритма томографической реконструкции для усложненной модели представлен на рис. 6, б.

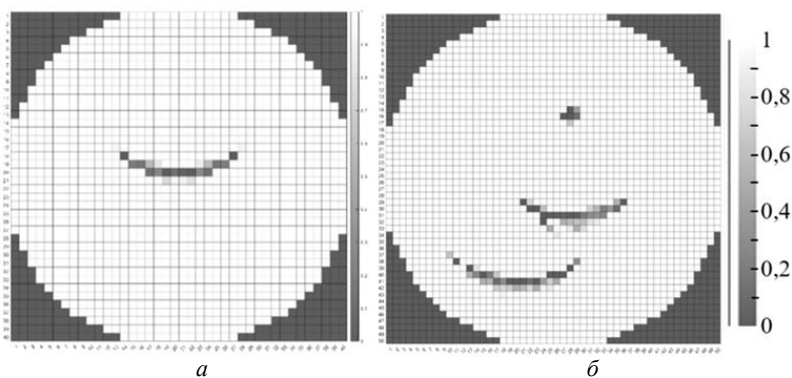


Рис. 6. Результат работы алгоритма с использованием априорной информации для: а – дефекта шириной один пиксель; б – двух дефектов шириной один пиксель и одного радиусом один пиксель

В таблице представлены численные результаты применения описанных выше алгоритмов.

Как видно из приведенных выше результатов, модифицированный алгоритм значительно лучше справился с локализацией дефекта. При этом временные затраты заметно сократились за счет отброса неинформативных лучей и упрощения СЛАУ путем дозаполнения значений известных пикселей, т.е. тех, в которых сумма длин лучей меньше порогового значения.

Заключение

В результате исследования была выполнена программная реализация модифицированного алгоритма локальной томографической реконструкции изделия с внутренним дефектом типа отслоения или трещины, имеющего избирательную чувствительность к зондирующему излучению, при системе наблюдений в виде окружности. Модификация заключается в использовании априорной информации об эталонном образце исследуемого объекта.

Также была проведена серия экспериментов по локализации дефекта при разной ширине его раскрытия. Представленные результаты работы алгоритма с использованием эвристической составляющей демонстрируют существенное уменьшение времени расчета и повышение точности реконструкции при том же разрешении, когда классический алгоритм не справляется.

Сказанное выше позволяет сделать вывод о перспективности предложенного подхода в области промышленной дефектоскопии и в целом о применимости рентгеновской вычислительной томографии для совершенствования производственных процессов.

Цифровая модель объекта испытаний позволяет встраивать ее в математические модели производственных процессов.

Возможные ограничения предложенного подхода включают необходимость точного расчета проекционной матрицы для эталонного образца. Эффективность предлагаемого алгоритма во многом зависит от выбранного количества информативных лучей, а также порогового значения для пикселей. Поэтому в дальнейшем необходимо разработать рекомендации по выбору этих параметров алгоритма.

Также необходимо провести серию экспериментов, используя обширное тестовое покрытие, для установления достоверности и границ применимости предложенного алгоритма.

В процессе дальнейших исследований планируется разработать адаптацию предложенного алгоритма для трехмерного случая, т.е. выполнить томографическое сканирование в конусе лучей.

Выражаю благодарность профессору Сергею Михайловичу Зеркало за помощь в разработке предложенного подхода и пристальное внимание к процессу исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке Новосибирского государственного технического университета.

Литература

1. Габуния Р.И. Компьютерная томография в клинической диагностике / Р.И. Габуния, Е.К. Колесникова. – М.: Медицина, 1995. – 352 с.
2. Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. – М.: Медицинская литература, 2006. – 208 с.
3. Блинов Н.Н. Методы компьютерной томографии в медицине // *Здравоохранение и медицинская техника*. – 2005. – Т. 17, № 3. – С. 10–11.
4. Kalender W.A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. – John Wiley & Sons, 2011. – 372 p.
5. Kastner J. New X-ray computed tomography methods for research and industry // *7th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2017)*. – ICT, Leuven, Belgium. – 2017. – Vol. 22 (3). – URL: <https://www.ndt.net/?id=20884> (дата обращения: 27.11.2023).
6. Goebbels J. Determining the spatial resolution in computed tomography – comparison of MTF and line-pair structures // *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Berlin, Germany. – 2011. – URL: <https://www.ndt.net/?id=11138> (дата обращения: 27.11.2023).
7. Kastner J. X-ray computed tomography for the development of materials and components // *Habilitation thesis*, Vienna University of Technology, Vienna. – 2011. – URL: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/159002> (дата обращения: 27.11.2023).
8. ROI-Tomografie (Lokale Tomografie) / С. Maass, М. Knaup, S. Sawall, М. Kachelriess // *e-Journal of Nondestructive Testing*. – 2010. – Vol. 16(6). – URL: <https://www.ndt.net/?id=10773> (дата обращения: 27.11.2023).
9. *Computed Tomography of Large Components in Aerospace Industry* / М. Luxa, Т. Schön, S. Schröpfer, S. Oeckl, М. Eberhorn, Т. Wenzel, J. Boutheyre // *4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012*, Augsburg, Germany. – 2013. – URL: <https://www.ndt.net/?id=13822> (дата обращения: 27.11.2023).
10. Bateni S.H. Development of coordinate metrology with optical sensors, computed tomography and multisensor systems / S.H. Bateni, R. Christoph // *TM-Technisches Messen*. – 2019. – Vol. 86, No. 9. – P. 464–468.
11. Лихачев А.В. Исследование рекурсивной фильтрации проекционных данных в задаче томографии области интереса // *Вычислительные технологии*. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 25–36.
12. Лихачев А.В. Новый метод решения задачи томографии при наличии непрозрачного включения // *Вычислительные методы и программирование*. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 129–137.
13. Коновалов А.Б. Разработка алгоритмов реконструкции изображений для малоракурсной компьютерной томографии в РФЯЦ-ВНИИТФ: история, современное состояние и перспективы / А.Б. Коновалов, В.В. Власов, А.Н. Киселев // *Дефектоскопия*. – 2022. – № 6. – С. 37–47.
14. Лихачев А.В. Томографическая реконструкция области, имеющей заданное значение плотности // *Вычислительные методы и программирование*. – 2018. – Т. 19. – С. 516–521.
15. Жвырбля В.Ю. Повышение проникающей способности систем цифровой радиографии на основе анализа сигналов низкой интенсивности / В.Ю. Жвырбля, С.П. Осипов, Д.А. Седнев // *Дефектоскопия*. – 2022. – № 7. – С. 39–53.
16. Сырямкин В.И. Проектирование рентгеновского 3D-микротомографа на основе его «цифрового двойника» /

В.И. Сырямкин, С.А. Клецов, С.Б. Сунцов // Инноватика–2022: сборник матер. XVIII Междунар. школы-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 21–22 апреля 2022 г. – Томск: ООО «СТТ», 2022. – С. 204–206.

Пешков Александр Викторович

Аспирант каф. вычислительной техники (ВТ)
Новосибирского государственного
технического университета (НГТУ)
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID: 0000-0001-7517-5858
Тел.: +7-905-930-62-33
Эл. почта: mupeskov1997@mail.ru

Peshkov A.V.

Computational diagnostics of cracks and delaminations using a tomographic approach and a sample of the object under study as a reference

The development of an approach to solve problems of industrial flaw detection, using information about the standard state of the object under study, is considered. The proposed tomographic reconstruction algorithm is based on the use of a priori information about the reference sample. In the case of industrial tomography, we are dealing with a standard product whose entire structure is known in advance; therefore, it is advisable to use this data as a priori information when solving the inverse problem of tomographic reconstruction. The results of numerical experiments for a simplified model of the product are presented. The proposed algorithm demonstrates its efficiency in situations where the classical algorithm can no longer cope. Conclusions are drawn about the prospects of using this approach in diagnosing defects such as delaminations and cracks in industrial products.

Keywords: computed tomography, flaw detection, region of interest tomography, reference sample, computational-heuristic algorithm.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-95-101

References

1. Gabuniya R.I., Kolesnikova E.K. *Komp'yuternaya tomografiya v klinicheskoy diagnostike* [Computed tomography in clinical diagnostics]. Moscow, Medicine Publ., 1995, 352 p. (in Russ.).
2. Hofer M. *Komp'yuternaya tomografiya. Bazovoe rukovodstvo* [Computed tomography. Basic guide]. Moscow, Medical literature Publ., 2006, 208 p. (in Russ.).
3. Blinov N.N. *Metody komp'yuternoy tomografii v medicine* [Computed tomography methods in medicine]. *Zdravoohraneniye i medicinskaya tekhnika* [Healthcare and medical technology], 2005, vol. 3(17), pp. 10–11 (in Russ.).
4. Kalender W.A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. John Wiley & Sons, 2011, 372 p.
5. Kastner J. New X-ray computed tomography methods for research and industry. *Proceedings of the 7th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2017)*. ICT, Leuven, Belgium, 2017, vol. 22(3). Available at: <https://www.ndt.net/?id=20884>, free (Accessed: November 27, 2023).
6. Goebbels J. Determining the spatial resolution in computed tomography – comparison of MTF and line-pair structures. *Proceedings of the International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*. Berlin, Germany, 2011. Available at: <https://www.ndt.net/?id=11138>, free (Accessed: November 27, 2023).
7. Kastner J. X-ray computed tomography for the development of materials and components. Habilitation thesis, Vienna University of Technology, Vienna, 2011. Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/159002>, free (Accessed: November 27, 2023).

Vienna University of Technology, Vienna, 2011. Available at: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/159002>, free (Accessed: November 27, 2023).

8. Maass C., Knaup M., Sawall S., Kachelriess M. ROI-Tomografie (Lokale Tomografie). *e-Journal of Nondestructive Testing*, 2010, Vol. 16(6). Available at: <https://www.ndt.net/?id=10773>, free. (Accessed: November 27, 2023).

9. Luxa M., Schön T., Schröpfer S., Oeckl S., Eberhorn M., Wenzel T., Boutheyre J. Computed Tomography of Large Components in Aerospace Industry. *Proceedings of the 4th International Symposium on NDT in Aerospace 2012*, Augsburg, Germany, 2013. Available at: <https://www.ndt.net/?id=13822>, free (Accessed: November 27, 2023).

10. Bateni S.H., Christoph R. *Development of coordinate metrology with optical sensors, computed tomography and multisensor systems*. TM-TECHNISCHES MESSEN, 2019, Vol. 86, no. 9, pp. 464–468.

11. Lihachev A.V. *Issledovanie rekursivnoy fil'tracii proekcionnykh dannykh v zadache tomografii oblasti interesa* [Study of recursive filtering of projection data in the problem of tomography of a region of interest]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computing technologies], 2017, vol. 1(22), pp. 25–36 (in Russ.).

12. Lihachev A.V. *Novyy metod resheniya zadachi tomografii pri nalichii neprozrachnogo vkhlyucheniya* [A new method for solving the tomography problem in the presence of an opaque inclusion]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming], 2017, vol. 2(18), pp. 129–137 (in Russ.).

13. Konovalov A.B., Vlasov V.V., Kiselev A.N. *Razrabotka algoritmov rekonstrukcii izobrazhenij dlya malorakursnoy komp'yuternoy tomografii v RFYAC—VNIITF: istoriya, sovremennoye sostoyaniye i perspektivy* [Development of image reconstruction algorithms for low-angle computed tomography in the RFFC—VNIITF: history, state of the art and prospects]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2022, vol. 6, pp. 37–47 (in Russ.).

14. Lihachev A.V. *Tomograficheskaya rekonstrukciya oblasti, imeyushchey zadannoe znachenie plotnosti* [Tomographic reconstruction of an area having a given density value]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming], 2018, vol. 4(19), pp. 516–521 (in Russ.).

15. Zhvyrblyya V.Y., Osipov S.P., Sednev D.A. *Povysheniye pronikayushchey sposobnosti sistem cifrovoy radiografii na osnovе analiza signalov nizkoj intensivnosti* [Improving the penetration power of digital radiography systems based on low-intensity signal analysis]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2022, vol. 7, pp. 39–53 (in Russ.).

16. Syryamkin V.I., Klestov S.A., Suncov S.B. *Proektirovaniye rentgenovskogo 3d mikrotomografa na osnove ego «cifrovogo dvojnika»* [Designing a 3D X-ray microtomograph based on its «digital twin»]. *Innovatika–2022: Sbornik materialov XVIII mezhdunarodnoy shkoly-konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Innovation–2022. Proceedings of the XVIII International School-Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]. Tomsk, LLC «STT», 2022, pp. 20–23 (in Russ.).

Alexander V. Peshkov

Postgraduate student, Department of Computer Science,
Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks pr., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID: 0000-0001-7517-5858
Phone: +7-905-930-62-33
Email: mupeskov1997@mail.ru