

Научная статья

УДК 620.179.1, 004.415.2

doi: 10.17223/19988605/70/12

Вычислительная диагностика объектов, позволяющих эвристическое усиление алгоритмов решения обратных задач**Сергей Михайлович Зеркаль¹, Александр Викторович Пешков²**^{1,2} Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия¹ zerkal@corp.nstu.ru² mupeskov1997@mail.ru

Аннотация. Рассматривается задача диагностики промышленных изделий на наличие в них тонких протяженных дефектов типа трещин и отслоений. Данная задача решается в условиях томографической реконструкции и принадлежит к классу обратных задач. Классический алгоритм компьютерной томографии имеет высокую трудоемкость при решении данной задачи, а в случае малой толщины дефекта может и вообще не восстановить его. В данной работе разработано программное обеспечение, позволяющее решить специальную задачу дефектоскопии на основе модифицированного алгоритма, использующего априорную информацию об эталонном образце изделия в качестве эвристического усиления. Полученные результаты вычислительных экспериментов демонстрируют эффективность предложенного подхода при решении задачи обнаружения трещин в исследуемом объекте и позволяют сделать вывод о его перспективности в задачах промышленной дефектоскопии.

Ключевые слова: программное обеспечение; компьютерная томография; промышленная дефектоскопия; эвристический алгоритм; эталонный образец; многопоточная обработка.

Для цитирования: Зеркаль С.М., Пешков А.В. Вычислительная диагностика объектов, позволяющих эвристическое усиление алгоритмов решения обратных задач // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 70. С. 122–133. doi: 10.17223/19988605/70/12

Original article

doi: 10.17223/19988605/70/12

Computational diagnostics of objects that allow the heuristic strengthening of algorithms for solving reverse problems**Sergey M. Zerkal¹, Alexander V. Peshkov²**^{1,2} Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation¹ zerkal@corp.nstu.ru² mupeskov1997@mail.ru

Abstract. The task of diagnosing industrial products for the presence of thin-length defects such as cracks and abrasions is considered. This problem is solved in the conditions of tomographic reconstruction and belongs to the class of reverse tasks. The classic algorithm of computed tomography has a high complexity in solving this problem, and in the case of a small thickness of the defect, it may not restore it at all. In this paper, software has been developed to solve a special problem of flaw detection based on a modified algorithm that uses a priori information about the reference of the product as a heuristic amplification. The results of computational experiments demonstrate the effectiveness of the proposed approach in solving the problem of detecting cracks in the object under study and allow us to conclude that its prospects in the tasks of industrial flaw detector.

Keywords: software; computed tomography; industrial flaw detection; heuristic algorithm; reference sample; multi-thread processing.

For citation: Zerkal, S.M., Peshkov, A.V. (2025) Computational diagnostics of objects that allow the heuristic strengthening of algorithms for solving reverse problems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 70. pp. 122–133. doi: 10.17223/19988605/70/12

Введение

Исследования, о которых ниже пойдет речь, относятся к обширному и важному научно-техническому направлению *интроскопия*, которое следует понимать как «внутреннее видение и описание» по аналогии с термином *рентгеноскопия*. Одним из важных инструментов здесь является компьютерная (вычислительная) томография (КТ). КТ – научное направление, имеющее широкое распространение в своих приложениях. Она появилась в середине XX столетия и пережила бурное развитие во второй его половине, за создание медицинского томографа были присуждены Нобелевские премии (1979, 2003).

Суть метода КТ заключается в определении внутреннего устройства, геометрической конфигурации, физического состояния, химического состава и других свойств исследуемого объекта по результатам измерения функционалов зондирующего излучения, прошедшего через объект исследования (трансмиссионная томография) [1], или излучения, генерируемого самим объектом (эмиссионная томография) [2]. Очевидно, что такие возможности КТ востребованы во многих областях человеческого знания и деятельности. Успехи КТ как метода вычислительной диагностики определяются во многом способностью использовать весьма значительный объем измеренной информации об исследуемом объекте по сравнению с другими известными методами [3].

Одно из важных приложений КТ – неразрушающий контроль промышленных изделий, или промышленная дефектоскопия. При этом габариты используемой томографической системы определяются в зависимости от размеров изделия. К настоящему времени кроме традиционной (классической) КТ возникли и нередко успешно развиваются проявления КТ, существенно отличающиеся от классического варианта [4–7]. Именно к такой неклассической КТ относится *специальная задача дефектоскопии*. Ее постановка, построение решения и вычислительный алгоритм, реализующий это решение, излагаются ниже.

Промышленные томографы, использующие более жесткое рентгеновское излучение (в отличие от медицинских), с реализацией измерений по методикам классической КТ успешно справляются. Следует отметить, что успехи КТ в промышленности несколько скромнее, чем в медицине [8]. Это, конечно, объясняется объектами исследования. Промышленная КТ применяется прежде всего в дефектоскопии, где возникают именно специфические задачи, затрудняющие непосредственное использование КТ или вообще исключаящие реализацию классических вычислительных алгоритмов КТ [9, 10]. Одной из подобных задач, имеющей важное прикладное значение, является диагностика таких объектов, как тонкие протяженные трещины, отслоения, нарушения сплошности поверхностей склеивания и т.п.

Геометрия этих объектов такова, что порождает их избирательную чувствительность к зондирующему сигналу, что приводит к неполноте проекционных данных (результатов измерений) и, как следствие, к невозможности использовать метод КТ в его классическом варианте [9]. Задача КТ с неполными проекционными данными возникает достаточно часто, если, например, выполнить измерения по тем или иным причинам с определенных ракурсов невозможно. Для этого к настоящему времени разработаны определенные технологии «пополнения» проекционных данных [11–13]. В нашем случае ситуация неполноты данных связана со спецификой исследуемого объекта и чувствительностью измерительного тракта, т.е. приемников. Процедура «пополнения» здесь не имеет смысла, ибо все требуемые измерения выполнены, и дело в том, что часть из них не является информативной. Потеря информативности, конечно, мнимая, но использовать эти измерения нельзя. Действительно информативными будут лучи, которые имеют в своем распространении достаточный путь внутри дефекта – так называемые «тангенциальные» лучи. А лучи, проходящие дефект в крест его прости-

рания (называемые «нормальными»), из-за малой ширины раскрытия дефекта его не почувствуют (рис. 1).

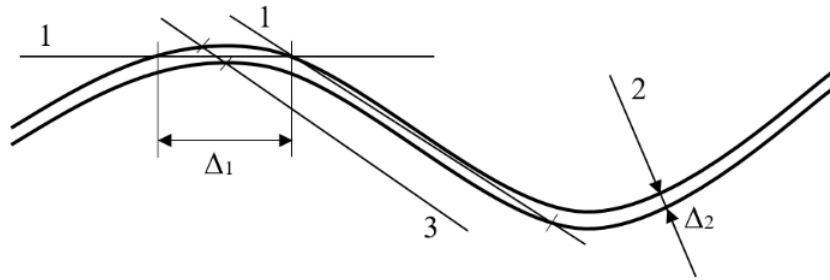


Рис. 1. Классификация типов лучей (1 – тангенциальный луч, Δ_1 – его путь по дефекту; 2 – нормальный луч, Δ_2 – его путь по дефекту, $\Delta_1 \gg \Delta_2$; 3 – промежуточный луч)
Fig. 1. Classification of types of rays (1 – tangential ray, Δ_1 – its path along the defect; 2 – normal ray, Δ_2 – its path along the defect, $\Delta_1 \gg \Delta_2$; 3 – intermediate ray)

Изначально отмеченная ситуация в рентгеновской интроскопии в применении к промышленной дефектоскопии появилась как вычислительная задача и как проблема прикладной математики в научной школе академика М.М. Лаврентьева в конце 80-х гг. прошлого столетия. Возникла настоятельная потребность диагностики отслоений и тещин в ответственных промышленных изделиях для обеспечения безопасности их использования, в том числе и в условиях эксплуатационного мониторинга. Здесь логично выделить традиционно два уровня исследований:

1. На уровне теорем, необходимых для обратной задачи математической физики, исследовать теоретически:

а) существование и единственность решения;

б) степень математической некорректности данной задачи, зависимость ошибки решения от погрешностей в исходных данных [14].

2. Разработать вычислительный алгоритм для возникшей в условиях КТ задачи промышленной дефектоскопии [15].

Рассматриваемая задача получила название *специальной задачи дефектоскопии*. При построении вычислительного алгоритма удалось использовать априорную информацию, заключающуюся в том, что об испытуемом изделии известно практически все, поскольку имеются проектная документация и возможность путем экспериментов получить проекционную матрицу так называемого *эталонного образца*. Действительно, есть возможность после снятия проекционных данных разобрать испытуемое изделие и визуально его исследовать, а в случае отсутствия дефектов принять результаты измерений за проекционную матрицу эталонного образца. Кроме того, поскольку законы взаимодействия зондирующего излучения описываются математическими формулами, есть возможность рассчитать синтетическую проекционную матрицу эталонного изделия. Таким образом, в распоряжении исследователя находятся две проекционные матрицы, а именно эталонного образца и испытуемого промышленного изделия (объекта исследования). Это позволило составить вычислительный алгоритм геометрического «экспресс»-построения огибающей дефекта типа трещины или отслоения [16]. Алгоритм оказался достаточно информативным и послужил аносом для дальнейшего более глубокого исследования с использованием аппарата искусственного интеллекта (ИИ) в части целенаправленного эвристического поиска решения исследуемой обратной задачи.

В настоящее время наиболее распространено несколько различных алгоритмов, используемых в коммерческой томографии: алгебраическая реконструкция, итеративная реконструкция, фильтрованная обратная проекция, сверточная обратная проекция и реконструкция, основанная на глубоком обучении [17, 18]. Однако все эти методы и их модификации не учитывают специфику задач промышленной дефектоскопии, например, возможную неполноту проекционных данных. Для преодоления этой проблемы предлагается использовать некую априорную информацию, которая является важным компонентом при решении обратной задачи томографической реконструкции.

Цель данной работы – разработка эффективной реализации алгоритма, использующего априорную информацию, для вычислительной диагностики объектов с целью выявления в них тонких протяженных дефектов.

1. Постановка задачи

Задача компьютерной томографии заключается в нахождении функции коэффициента поглощения внутри объекта по известным значениям интегралов вдоль лучей, проходящих через объект. Вращая всю систему из источника излучения и детекторов вокруг объекта (при этом оставаясь в одной плоскости) или вращая сам объект вокруг оси, перпендикулярной плоскости системы наблюдений, получают достаточно полную информацию о преобразовании Радона оптической плотности в данном срезе объекта. Используя обратное преобразование Радона, можно восстановить поглощение излучения в любой точке данной плоскости объекта [19]. Однако из-за неполноты проекционных данных использовать интегральные преобразования в данной задаче не представляется возможным, поэтому используется их алгебраизация [20]. То есть решение задачи томографической реконструкции сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$A \times X = B, \quad (1)$$

где A – матрица длин лучей в пикселях сетки, X – вектор значений плотности объекта в каждом пикселе, B – вектор значений интенсивности лучей на приемнике.

Таким образом, найденные корни системы (1) будут равны коэффициентам поглощения в соответствующих пикселях сетки, наложенной на объект исследования. На основе найденных коэффициентов и известной модели поглощения излучения можно перейти к искомым величинам плотностей внутри объекта.

Однако при использовании классического алгоритма КТ для диагностики тонких дефектов необходимо использовать очень мелкую сетку и большое количество измерений, что приводит к резкому увеличению вычислительных затрат (сетка 50×50 порождает систему из 2 500 уравнений, 80×80 – уже 6 400 уравнений и т.д.). Для возможности решения данной задачи за приемлемое время и без необходимости увеличения количества измерений используется эвристическое усиление, суть которого описана ниже.

2. Использование априорной информации в томографической реконструкции

В условиях промышленной дефектоскопии есть одно важное обстоятельство, которое позволяет отойти от исчислимой обратной задачи математической физики (каковой и является классическая томографическая задача) и включить в рассмотрение свойственный ИИ эвристический подход, основанный на доминировании априорной информации. Такой подход способствует построению «сильных» алгоритмов, способных решить усложненные задачи, недоступные в условиях исчислимости. В данном случае такая априорная информация есть – это проектная документация о промышленном изделии, который является объектом исследования.

Очевидно, что методы решения тех или иных задач имеют границы применимости, определяющие их возможности. Для исчислимых задач весьма редко эти границы удастся даже незначительно расширить. Это становится возможным при появлении дополнительной информации об объекте исследования. Отмеченная информация суть дополнительные знания, порожденные этой информацией. Если такие знания удастся встроить в вычислительный алгоритм, то границы применимости метода расширятся. Сказанное выше соответствует основному принципу инженерии знаний в том смысле, что возможности «решателя» в первую очередь определяются его информационной базой и лишь во вторую – используемым методом. В случае специальной задачи дефектоскопии, имеющей исчислимую основу, а именно метод КТ, все-таки движение идет на первом шаге от метода, где задача предъявляет свои требования к усилению используемого метода.

С использованием исключительного объема информации об исследуемом объекте такое усиление становится возможным. Строится проекционная матрица эталонного образца A_R , и выполняется

измерение проекционной матрицы для испытуемого изделия. Особенность задачи заключается в том, что не требуется получить информацию об исследуемом объекте как таковом, ибо это известно, а интерес представляют его изменения, причем незначительные, которые могут быть или нет. Построение разности проекционных матриц

$$A^* = A_T - A_R, \quad (2)$$

где A_R – проекционная матрица эталонного образца, A_T – проекционная матрица испытуемого изделия, с последующим использованием ненулевых элементов A^* является вторым шагом.

Этот шаг можно считать началом процесса целенаправленного «эвристического поиска» диагностируемого дефекта. Действительно, появляется информация о наличии того, что мы ищем, т.е. возникает цель, и она расположена внутри известного объекта, остается локализовать эту цель и определить ее геометрию. В статье [21] описан вычислительно-эвристический алгоритм, позволяющий осуществить поиск дефекта в исследуемом объекте. Эвристика заключается в том, что поиск дефекта осуществляется не во всех пикселях наложенной сетки, а только в «потенциальных». Таким образом, на основе априорной информации об эталонном образце изделия удастся заметно сократить число вариантов потенциальных решений.

3. Разработка программного обеспечения

Для решения задачи диагностики объектов на основе эвристического усиления было разработано оконное приложение с использованием языков программирования *Java* и *Matlab*. За основу было взято ранее разработанное программное обеспечение [22], которое позволяет строить модель объекта с круглым сечением и дефектом заданной формы, генерировать проекционные матрицы сканирования, а также производить томографическую реконструкцию объекта классическим и модифицированным алгоритмами. Подробное описание реализаций данных алгоритмов томографической реконструкции приведено в [21].

В рамках доработок в ядро программы был добавлен алгоритм для генерации дефекта в виде реальной трещины. Также реализовано сохранение всех изображений в рабочей директории программы с возможностью перехода на следующее и предыдущее изображение. Для отслеживания текущих операций программы был реализован механизм логирования на основе текстовых записей в область вывода. На рис. 2 представлен графический интерфейс разработанной программы с инициализированной моделью.

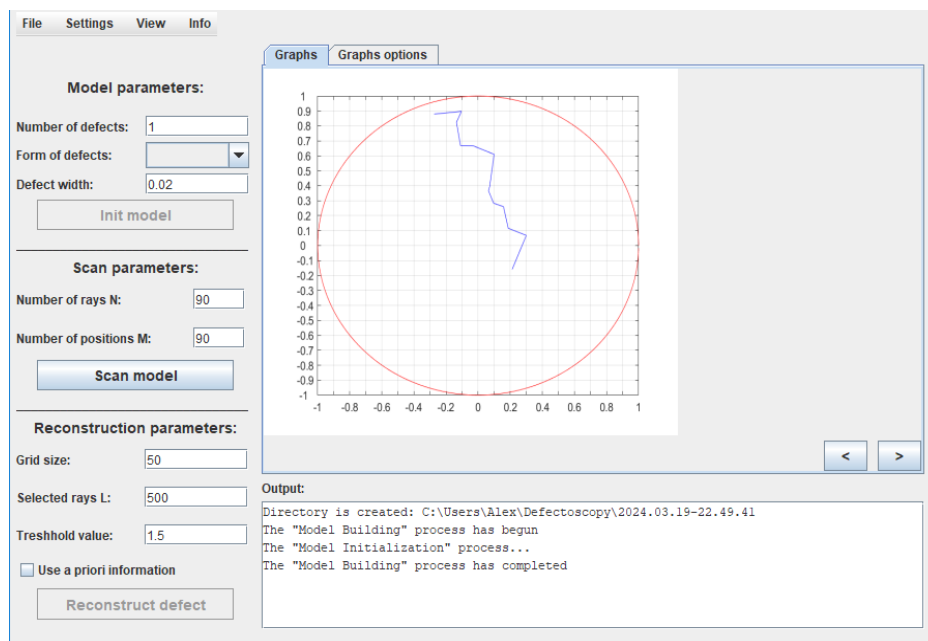


Рис. 2. Графический интерфейс доработанного программного обеспечения

Fig. 2. Graphic interface of improved software

Для повышения быстродействия используемого алгоритма была реализована многопоточная обработка с использованием паттерна «пул потоков» (Thread Pool) [23]. Данный подход применен для всех операций алгоритма, обрабатывающих большие циклы. В табл. 1 представлены результаты применения многопоточного подхода при распараллеливании процесса генерации проекционных данных для сетки 80×80 пикселей. Вычислительные эксперименты проведены на компьютере следующей конфигурации: процессор – Intel Core i7-8700K 4.7 ГГц (6 физических ядер, 12 логических ядер), оперативная память – 32GB DDR4 3 200 МГц.

Таблица 1

Результаты применения многопоточной обработки

Количество потоков	Время выполнения операции «Вычисление значений на детекторе для образца», с	Средняя загрузка CPU, %
1	99,953	11,0
2	50,553	21,1
3	33,272	30,5
4	25,289	39,9
5	20,331	49,7
6	17,392	58,9
7	15,467	68,4
8	13,228	77,9
9	11,519	87,5
10	10,365	97,2
11	9,663	98,8
12	9,191	99,8
13	9,225	99,8
14	9,269	99,8

Показанные результаты демонстрируют, что применение многопоточного подхода позволило в разы сократить время генерации проекционных данных. Причем оптимальное число потоков в данном случае составляет 12. Это совпадает с рекомендациями по выбору оптимального числа потоков, которые гласят, что для задач, выполняющих интенсивные вычисления без блокирующих операций, оптимальная производительность достигается при количестве потоков, равном количеству вычислительных ядер [24].

4. Результаты вычислительных экспериментов

В качестве объекта исследования выбрано круглое сечение промышленного изделия с единственным радиусом, коэффициент поглощения излучения в котором описывается функцией поверхности перевернутого параболоида

$$\mu(x, y) = -x^2 - y^2 + 2, \quad (3)$$

где $\mu(x, y)$ – функция коэффициента поглощения излучения, зависящая от плотности материала объекта, x, y – декартовы координаты.

На рис. 3 представлено графическое представление функции плотности для исследуемого объекта, а также проекция данного отображения на плоскость XOY , так как в условиях томографической реконструкции исследуются именно такие плоские срезы. На всех следующих рисунках числа по осям x и y соответствуют узлам сетки, по оси z (или цветом) – значению коэффициента поглощения.

При снятии измерений используется веерная система наблюдений, состоящая из 90 лучей и 90 положений источника. Для алгебраической реконструкции используется сетка 50×50 пикселей. Критериями точности восстановления модели являются средняя абсолютная ошибка (Median Absolute Error, MAE) и корень среднеквадратического отклонения (Root Mean Square Error, RMSE).

При анализе выходных характеристик следует учитывать, что метрики точности рассчитываются по пикселям всего объекта. Соответственно, показатель точности восстановления может быть высоким, даже если дефект вообще не был обнаружен. То есть при дефектоскопии исследуемого объ-

екта интегральные показатели точности не являются объективными индикаторами наличия или отсутствия дефекта. Поэтому важный этап анализа – рассмотрение графического представления результатов томографической реконструкции.

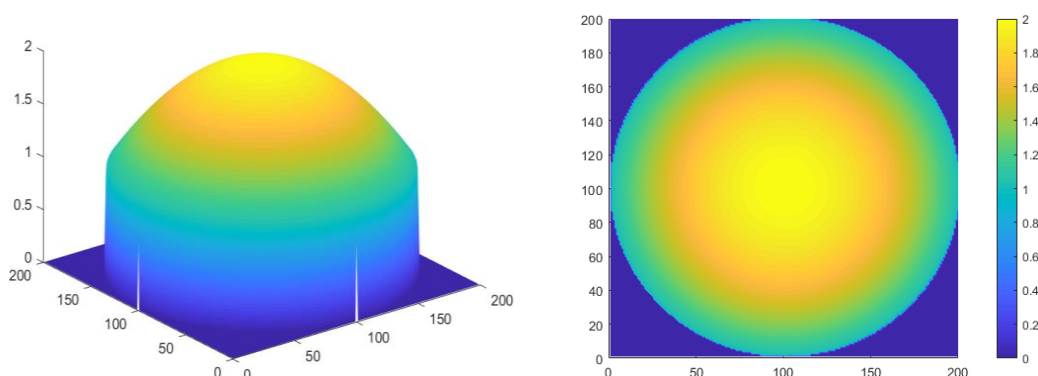


Рис. 3. Графическое представление функции плотности объекта исследования
Fig. 3. Graphic representation of the density function of the object of the study

На рис. 4 показаны результаты томографической реконструкции исследуемого объекта с помощью классического подхода, при котором выполняется алгебраическая реконструкция с использованием всех измерений. Выходные характеристики всех проведенных экспериментов приведены в табл. 2.

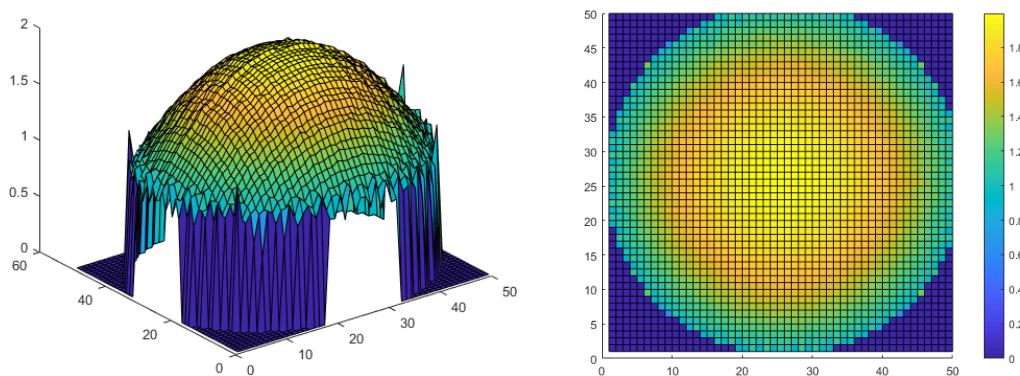


Рис. 4. Результат томографической реконструкции изделия без дефекта
Fig. 4. The result of the tomographic reconstruction of the product without a defect

Таблица 2

Результаты вычислительных экспериментов по томографической реконструкции объекта

Ширина раскрытия дефекта	Размер сетки	Кол-во лучей, участвующих в реконструкции	Точность восстановления MAE	Точность восстановления RMSE	Время вычислений, мс
—	50 × 50	8 100	0,0263	0,0914	131 600
2,5%	50 × 50	8 100	0,0414	0,0989	132 332
0,5%	50 × 50	8 100	0,0434	0,0985	139 058
0,5%	80 × 80	8 100	0,0607	0,0993	391 407
0,5%	80 × 80	2 000	0,0217	0,0702	271 285
0,5%	80 × 80	1 000	0,0157	0,0694	166 191
0,5%	80 × 80	500	0,0130	0,0792	111 535

Приведенные выше результаты свидетельствуют об успешности решения задачи томографической реконструкции, так как внутренняя структура объекта и его плотность хорошо восстановились.

Для следующего эксперимента в модель изделия был добавлен дефект в виде трещины протяженной формы. Ширина раскрытия трещины в самом широком месте составляет 2,5% от диаметра изделия. Данная форма моделируется областью между двух парабол, при этом плотность материала в данной области принимается нулевой. На рис. 5 приведены исходная модель с дефектом и результат ее томографической реконструкции при помощи классического подхода.

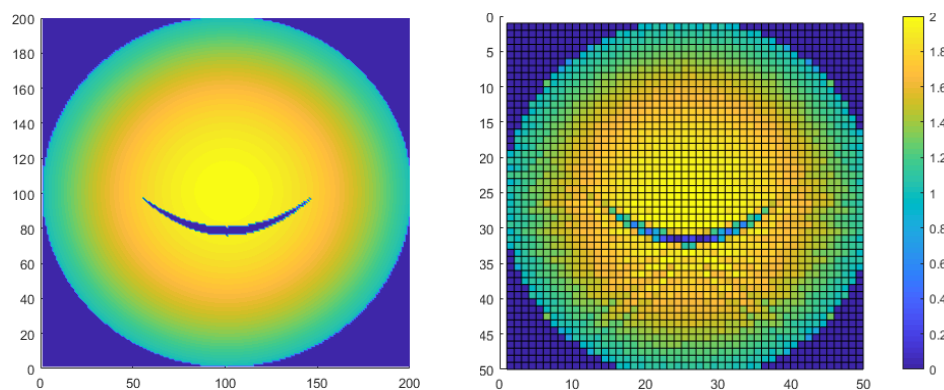


Рис. 5. Модель изделия с большим дефектом и результат ее томографической реконструкции
 Fig. 5. Product model with a large defect and the result of its tomographic reconstruction

Приведенные выше результаты свидетельствуют об успешности решения задачи томографической реконструкции, так как внутренняя структура объекта, его плотность и внутренний дефект хорошо восстановились.

Однако на практике обычно приходится диагностировать дефекты намного меньшей ширины и более сложной формы. Поэтому для исследования более реального случая в модель изделия была добавлена другая трещина, ширина раскрытия которой составляет 0,5% от диаметра системы наблюдений. На рис. 6 приведены исходная модель со сложным дефектом и результаты ее томографической реконструкции при помощи классического и модифицированного подходов (для более объективной оценки отображение линий сетки было отключено).

По рис. 6, *b* можно сделать вывод, что классический алгоритм не справляется с реконструкцией исходной модели с тонким дефектом, так как дефект размывается при восстановлении. Чтобы повысить точность алгебраической реконструкции, классический подход предлагает уменьшить сетку [9]. Поэтому в следующем эксперименте была взята сетка 80×80 пикселей, при этом остальные параметры были оставлены без изменений. На рис. 6, *c* приведены результаты томографической реконструкции исследуемого объекта со сложным дефектом при помощи классического подхода на сетке 80×80 пикселей. В этом случае дефект восстанавливается уже лучше, однако уменьшение сетки приводит к резкому увеличению времени реконструкции (в 2,8 раза).

Такой рост вычислительных затрат закономерен, так как в классическом алгоритме КТ уравнения строятся на основе всех имеющихся измерений по всем неизвестным пикселям. Соответственно, при системе измерений из 90 лучей и 90 положений источника и сетки 50×50 пикселей формируется СЛАУ из 8 100 уравнений и 2 500 неизвестных. А при сетке 80×80 пикселей количество неизвестных составляет уже 6 400. Для диагностики такого типа дефектов и уменьшения вычислительных затрат в работе [21] был описан вычислительно-эвристический алгоритм томографической реконструкции на основе использования априорной информации. В качестве априорной информации используется проекционная матрица эталонного изделия (не содержащего дефектов). Предложенный алгоритм использует при алгебраической реконструкции только часть лучей, отобранных по критерию максимального отличия уровня интенсивности от соответствующих им лучей для эталонного образца. На рис. 6, *d*, *e*, *f* представлены результаты томографической реконструкции с использованием вычислительно-эвристического алгоритма для отобранных 2 000, 1 000 и 500 лучей соответственно. В этих случаях результаты томографической реконструкции можно считать пригодными для решения специальной задачи дефектоскопии, так как трещина четко выделяется в восстановленном изображении. В данной серии экспериментов наилучшие результаты по восстановлению дефекта были получены при использовании 1 000 отобранных лучей, так как в этом случае достигаются высокие показатели точности восстановления, а графический результат реконструкции позволяет выявить трещину. При использовании 500 лучей трещина становится еще более контрастной, однако она прерывается в некоторых местах, что может привести к ошибочным интерпретациям при дальнейшем анализе данных изображений.

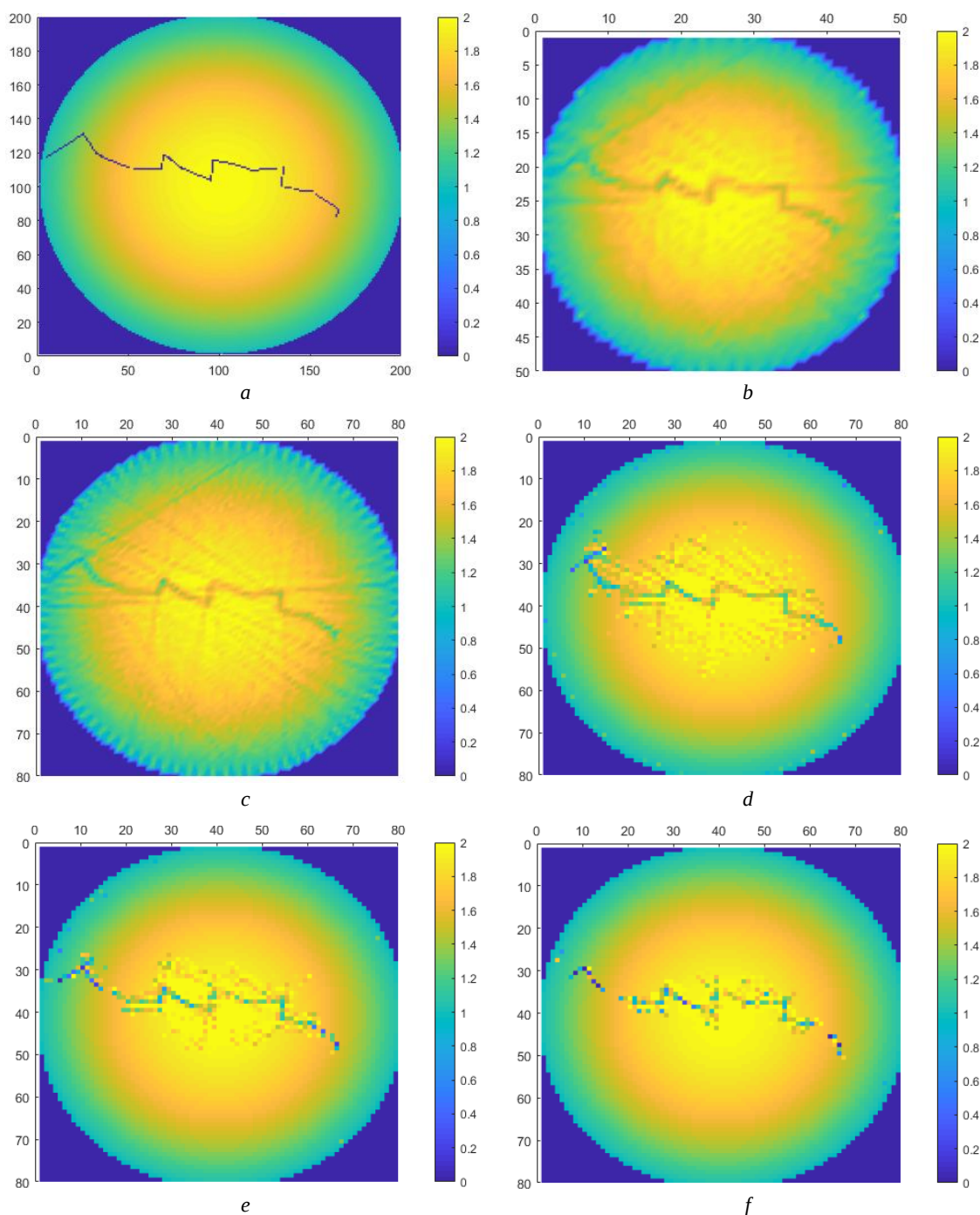


Рис. 6. Результат томографической реконструкции изделия с тонким дефектом: *a* – исходная модель с трещиной; *b* – результат реконструкции для параметров: 8 100 лучей, сетка 50×50 ; *c* – результат реконструкции для параметров: 8 100 лучей, сетка 80×80 ; *d* – результат реконструкции для параметров: 2 000 отобранных лучей, сетка 80×80 ; *e* – результат реконструкции для параметров: 1 000 отобранных лучей, сетка 80×80 ; *f* – результат реконструкции для параметров: 500 отобранных лучей, сетка 80×80

Fig. 6. The result of tomographic reconstruction of a product with a subtle defect: *a* – original model with crack; *b* – reconstruction result for parameters: 8100 rays, 50×50 grid; *c* – reconstruction result for parameters: 8100 rays, 80×80 grid; *d* – reconstruction result for parameters: 2000 selected rays, 80×80 grid; *e* – reconstruction result for parameters: 1000 selected rays, 80×80 grid; *f* – reconstruction result for parameters: 500 selected rays, 80×80 grid

В таблице 2 представлены численные результаты всех проведенных вычислительных экспериментов.

В результате проведенной серии экспериментов можно сделать следующие выводы:

– классический алгоритм КТ имеет высокие вычислительные затраты;

- классический алгоритм КТ плохо справляется с восстановлением дефектов малой толщины из-за неполноты проекционных данных;
- использование модифицированного алгоритма позволяет с высокой точностью реконструировать тонкий дефект на основе априорной информации об эталонном образце исследуемого изделия;
- число отобранных информативных лучей влияет на точность восстановления, оптимальные результаты реконструкции были получены при использовании 1 000 рабочих лучей.

Заключение

В данной работе рассмотрено разработанное модифицированное программное обеспечение, позволяющее использовать ранее предложенный вычислительный алгоритм для решения задач диагностики объектов. Предложенный подход позволяет обнаруживать дефекты малой толщины типа трещин в случаях, когда классический алгоритм компьютерной томографии уже не справляется из-за неполноты проекционных данных. Приведенные результаты экспериментов демонстрируют, что эвристическое усиление дает возможность решить задачу обнаружения дефекта, не меняя систему наблюдений и используя тот же набор измерений. Также необходимо отметить значительный (в 2,4 раза) выигрыш по времени работы модифицированного алгоритма по сравнению с классическим.

В результате дальнейших исследований необходимо предложить критерий для определения оптимального числа информативных лучей, с помощью которых возможно реконструировать дефект при минимуме вычислительных затрат. Также необходимо разработать обширное тестовое покрытие для данного модифицированного алгоритма, чтобы определить границы его применимости. В рамках дальнейшей разработки планируется модифицировать созданное программное обеспечение, добавив в его ядро блок искусственного интеллекта. Предполагается, что это будет сверточная нейронная сеть, способная определять тип дефекта. Следующий этап архитектурной модификации данного программного обеспечения будет заключаться в переходе с монолитного приложения на микросервисное для декомпозиции слабосвязанных вычислительных компонент.

Список источников

1. Bai H., Su M., Pang C., Xiong Z., Binyuan Xia, Zhao D., Li C., Mo Z., Gao F. An image reconstruction method for transmission computed tomography with the constraint of the linear attenuation coefficients // *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. V. 202. Art. 111062. doi: 10.1016/j.apradiso.2023.111062
2. Choi H.-J., Jeong J., Lee H., Kim S.G., Ahn J.J., Lee H.C., Min C.H. Image reconstruction method of gamma emission tomography based on prior-aware information and machine learning for partial-defect detection of PWR-type spent nuclear fuel // *Nuclear Engineering and Technology*. 2024. V. 56 (11). P. 4770–4781. doi: 10.1016/j.net.2024.06.040
3. Serrano E., Garcia-Blas J., Carretero J., Desco M., Abella M. Accelerated iterative image reconstruction for cone-beam computed tomography through Big Data frameworks // *Future Generation Computer Systems*. 2020. V. 106. P. 534–544. doi: 10.1016/j.future.2019.12.042
4. Shyamala Bharathi P., Shalini C. Advanced hybrid attention-based deep learning network with heuristic algorithm for adaptive CT and PET image fusion in lung cancer detection // *Medical Engineering & Physics*. 2024. V. 126. Art. 104138. doi: 10.1016/j.medengphy.2024.104138
5. Bellens S., Guerrero P., Vandewalle P., Dewulf W. Machine learning in industrial X-ray computed tomography – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2024. V. 51. P. 324–341. doi: 10.1016/j.cirpj.2024.05.004
6. Xu P.-P., Liu T.-Y., Zhou F., Chen Q., Rowe J., Tesche C., Zhang L.-J. Artificial intelligence in coronary computed tomography angiography // *Medicine Plus*. 2024. V. 1, is. 1. doi: 10.1016/j.medp.2023.100001
7. Zhu G., Fu J. A lightweight solution of industrial computed tomography with convolutional neural network // *NDT & E International*. 2020. V. 116. Art. 102347. doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102347.
8. Plessis A., Roux S.G., Guelpa A. Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing // *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016. V. 6, pt. A. P. 17–25. doi: 10.1016/j.csndt.2016.07.001
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические задачи компьютерной томографии. М. : Наука, 1987. 160 с.
10. Ito K., Jin B. *Inverse Problems: Tikhonov theory and algorithms*. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2014. 332 p.
11. Важенцева Н.В., Лихачев А.В. Новый метод трехмерной томографии для неполных траекторий источника // *Труды Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко (Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011)*.

- Новосибирск : ИБТ СО РАН, 2011. URL: http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38813/46493/Likhachov_2.pdf (дата обращения: 04.10.2024).
12. Liu Y., Beyer A., Schuetz P., Hofmann J., Flisch A., Sennhauser U. Cooperative data fusion of transmission and surface scan for improving limited-angle computed tomography reconstruction // *NDT & E International*. 2016. V. 83. P. 24–31. doi: 10.1016/j.ndteint.2016.05.003
 13. Piau P., King A., Henry L., Rathore J.S., Guignot N., Deslandes J.-P., Itié J.-P. A thresholding based iterative reconstruction method for limited-angle tomography data // *Tomography of Materials and Structures*. 2023. V. 2. Art. 100008. doi: 10.1016/j.tmater.2023.100008.
 14. Хахлютин В.П. Об одной задаче интегральной геометрии на плоскости // *Доклады Академии наук СССР*. 1991. Т. 320, № 4. С. 832–834.
 15. Зеркаль С.М. Решение на ЭВМ одного класса задач дефектоскопии // *Доклады Академии наук СССР*. 1990. Т. 314, № 1. С. 180–182.
 16. Зеркаль С.М. Локальная томографическая реконструкция огибающей тонкого дефекта с использованием эталонного образца // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2000. Т. 3, № 1 (5). С. 110–115.
 17. Image reconstruction (CT) // *Radiopaedia*. 2023. 23 Mar. URL: <https://radiopaedia.org/articles/image-reconstruction-ct?lang=us> (accessed: 04.10.2024).
 18. Takase A. How Does CT Reconstruction Work? // *Rigaku*. 2023. Jan. 11. URL: <https://rigaku.com/products/imaging-ndt/x-ray-ct/learning/blog/how-does-ct-reconstruction-work> (accessed: 04.10.2024).
 19. Преобразование Радона // *Википедия*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Радона (дата обращения: 04.10.2024).
 20. Бронников А.В., Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г. Итерационные алгоритмы в задачах томографии полупрозрачных сред. Новосибирск : ИТПМ, 1989. 43 с. (Препринт; № 18).
 21. Пешков А.В. Вычислительная диагностика трещин и отслоений с использованием томографического подхода при наличии эталона исследуемого объекта // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2023. Т. 26, № 4. С. 95–101. doi: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-95-101
 22. Peshkov A.V., Zerkal S.M. Computational-heuristic algorithm for tomographic solution of industrial flaw detection problems // 16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023): Proc. Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. IEEE, 2023. P. 910–915. doi: 10.1109/APEIE59731.2023.10347879
 23. The Java Tutorials. Thread Pools // *Oracle. Java Documentation*. URL: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/essential/concurrency/pools.html> (accessed: 04.10.2024).
 24. The optimal thread-pool size in Java: Explaining the formula // *Backendhance*. 2023. Aug. 9. URL: <https://backendhance.com/en/blog/2023/optimal-thread-pool-size/> (accessed: 04.10.2024).

References

1. Bai, H., Su, M., Pang, C., Xiong, Z., Binyuan, Xia, Zhao, D., Li, C., Mo, Z. & Gao, F. (2023) An image reconstruction method for transmission computed tomography with the constraint of the linear attenuation coefficients. *Applied Radiation and Isotopes*. 202. Art. 111062. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.111062
2. Choi, H.-J., Jeong, J., Lee, H., Kim, S.G., Ahn, J.J., Lee, H.C. & Min, C.H. (2024) Image reconstruction method of gamma emission tomography based on prior-aware information and machine learning for partial-defect detection of PWR-type spent nuclear fuel. *Nuclear Engineering and Technology*. 56(11). pp. 4770–4781. DOI: 10.1016/j.net.2024.06.040
3. Serrano, E., Garcia-Blas, J., Carretero, J., Desco, M. & Abella, M. (2020) Accelerated iterative image reconstruction for cone-beam computed tomography through Big Data frameworks. *Future Generation Computer Systems*. 106. pp. 534–544. DOI: 10.1016/j.future.2019.12.042
4. Shyamala Bharathi, P. & Shalini, C. (2024) Advanced hybrid attention-based deep learning network with heuristic algorithm for adaptive CT and PET image fusion in lung cancer detection. *Medical Engineering & Physics*. 126. Art. 104138. DOI: 10.1016/j.medengphy.2024.104138
5. Bellens, S., Guerrero, P., Vandewalle, P. & Dewulf, W. (2024) Machine learning in industrial X-ray computed tomography – a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 51. pp. 324–341. DOI: 10.1016/j.cirpj.2024.05.004
6. Xu, P.-P., Liu, T.-Y., Zhou, F., Chen, Q., Rowe, J., Tesche, C. & Zhang, L.-J. (2024) Artificial intelligence in coronary computed tomography angiography. *Medicine Plus*. 1(1). DOI: 10.1016/j.medp.2023.100001
7. Zhu, G. & Fu, J. (2020) A lightweight solution of industrial computed tomography with convolutional neural network. *NDT & E International*. 116. Art. 102347. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102347
8. Plessis, A., Roux, S.G. & Guelpa, A. (2016) Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*. 6(A). pp. 17–25. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.07.001
9. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Y. & Timonov, A.A. (1987) *Matematicheskie zadachi komp'yuternoy tomografii* [Mathematical tasks of computed tomography]. Moscow: Nauka.
10. Ito, K. & Jin, B. (2014) *Inverse Problems: Tikhonov theory and algorithms*. Singapore: World Scientific Publishing Company.
11. Vazhentseva, N.V. & Likhachev, A.V. (2011) Novyy metod trekhmernoy tomografii dlya nepolnykh traektoriy istochnika [The new method of three-dimensional tomography for incomplete source trajectories]. *Sovremennye problemy prikladnoy matematiki i mekhaniki: teoriya, eksperiment i praktika* [Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory,

- Experiment and Practice]. Proc. of the International Conference. Novosibirsk: SB RAS. [Online] Available from: http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38813/46493/Likhachov_2.pdf (Accessed: 4th October 2024).
12. Liu, Y., Beyer, A., Schuetz, P., Hofmann, J., Flisch, A. & Sennhauser, U. (2016) Cooperative data fusion of transmission and surface scan for improving limited-angle computed tomography reconstruction. *NDT & E International*. 83. pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.05.003
 13. Piault, P., King, A., Henry, L., Rathore, J.S., Guignot, N., Deslandes, J.-P. & Itié, J.-P. (2023) A thresholding based iterative reconstruction method for limited-angle tomography data. *Tomography of Materials and Structures*. 2. Art. 100008. DOI: 10.1016/j.tmater.2023.100008
 14. Khakhlyutin, V.P. (1991) Ob odnoy zadache integral'noy geometrii na ploskosti [About one task of integral geometry on the plane]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 320(4). pp. 832–834.
 15. Zerkal, S.M. (1990) Reshenie na EVM odnogo klassa zadach defektoskopii [Computer solution of one class of flaw detection problems]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 314(1). pp. 180–182.
 16. Zerkal, S.M. (2000) Lokal'naya tomograficheskaya rekonstruktsiya ogibayushchey tonkogo defekta s ispol'zovaniem etalonnogo obraztsa [Local tomographic reconstruction of the envelope of a thin defect using a reference sample]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*. 3(1). pp. 110–115.
 17. Radiopaedia. (2023) Image reconstruction (CT). 23rd March. [Online] Available from: <https://radiopaedia.org/articles/image-reconstruction-ct?lang=us> (Accessed: 4th October 2024).
 18. Takase, A. (2023) How Does CT Reconstruction Work? *Rigaku*. 11th January. [Online] Available from: <https://rigaku.com/products/imaging-ndt/x-ray-ct/learning/blog/how-does-ct-reconstruction-work> (Accessed: 4th October 2024).
 19. Wikipedia. (n.d.) *Преобразование Радона* [Radon transformation]. [Online] Available from: https://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Радона (Accessed: 4th October 2024).
 20. Bronnikov, A.V., Voskoboynikov, Yu.E. & Preobrazhenskiy, N.G. (1989) *Iteratsionnye algoritmy v zadachakh tomografii poluprozrachnykh sred* [Iterative algorithms in problems of tomography of semi-transparent media]. Novosibirsk: ITPM.
 21. Peshkov, A.V. (2023) Vychislitel'naya diagnostika treshchin i otsloeniy s ispol'zovaniem tomograficheskogo podkhoda pri nalichii etalona issleduemogo ob'ekta [Computational diagnostics of cracks and delaminations using a tomographic approach in the presence of a standard of the object under study]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 26(4). pp. 95–101. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-95-101
 22. Peshkov, A.V. & Zerkal, S.M. (2023) Computational-heuristic algorithm for tomographic solution of industrial flaw detection problems. *16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023)*. Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. pp. 910–915. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347879
 23. *The Java Tutorials*. Thread Pools. [Online] Available from: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/essential/concurrency/pools.html> (Accessed: 4th October 2024).
 24. *Backendhance*. (2023) The optimal thread-pool size in Java: Explaining the formula. 9th August. [Online] Available from: <https://backendhance.com/en/blog/2023/optimal-thread-pool-size/> (Accessed: 4th October 2024).

Информация об авторах:

Зеркаль Сергей Михайлович – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия). E-mail: zerkal@corp.nstu.ru

Пешков Александр Викторович – аспирант кафедры вычислительной техники факультета автоматики и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия). E-mail: mupeskov1997@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Zerkal Sergey M. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: zerkal@corp.nstu.ru

Peshkov Alexander V. (Post-graduate Student, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: mupeskov1997@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 16.10.2024; принята к публикации 03.03.2025

Received 16.10.2024; accepted for publication 03.03.2025