



ОЗДИЕВ Али Хосенович

**ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕЗ ВРАЩЕНИЯ ОБЪЕКТА НА
ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

АВТОРЕФЕРТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в отделении Экспериментальной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

**Научный
руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор
Крючков Юрий Юрьевич

**Официальные
оппоненты:**

Сырымкин Владимир Иванович

Доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой управления качеством

Степанов Александр Вячеславович

Кандидат технических наук, ООО "ДИАГНОСТИКА-М", ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится «28» декабря 2018 г. В 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>.

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук



Шевелева Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Трехмерная рентгеновская визуализация является одним из самых эффективных и потому распространенных методов восстановления внутренней структуры объектов, который находит своё применение во многих сферах науки, промышленности и медицины. Постоянный технический прогресс открывает новые возможности в обработке данных и проведении экспериментов, в связи с чем разработка новых подходов к проведению томографического сканирования и модификация и оптимизация алгоритмов томографической реконструкции по сей день является одним из актуальнейших направлений исследовательской деятельности.

Методы рентгеновской томографии обладают достаточно высокой универсальностью, но ряд ограничивающих факторов все ещё создает некоторые проблемы. К таким факторам относятся размеры исследуемого объекта, площадь детектирующей поверхности, механические ограничения работы томографической установки или, например, размеры помещения, где расположена томографическая установка. Также нельзя забывать о габаритах и весе самого объекта исследования, которые могут не только затруднить проведения точного сканирования, но также и значительно увеличить стоимость установки. В случае, например, зафиксированных объектов или объектов, доступ к которым ограничен с одной или нескольких сторон, проведение томографического сканирования в соответствии с существующими стандартными подходами иногда в принципе невозможно.

Таким образом разработка алгоритмов и методов проведения томографического анализа, минимизирующая влияние этих ограничивающих факторов, способна значительно расширить область применения рентгеновской томографии, а также лечь в основу мобильных установок нового поколения.

Так, например, радиационные методы неразрушающего контроля нуждаются в новых решениях, так как стандартные подходы проведения рентгеновского контроля часто не обеспечивают желаемых результатов. А если речь идет о крупногабаритных объектах со сложной формой и нетиповой внутренней структурой использование применяемых в настоящее время двумерных методов радиографического анализа в буквальном смысле не позволяет достичь необходимой точности.

На основе вышесказанного можно заключить, что разработка новых альтернативных методов сбора проекционных данных и их дальнейшей обработки относится к наиболее важным вопросам современной науки и инженерии. В связи с этим актуальность данной работы заключается в разработке и оптимизации методов томографического сканирования и алгоритмов томографической реконструкции для анализа объектов, в случае которых стандартные общепринятые методы бессильны. Отличительной чертой работы является необходимость разработки такого метода сканирования, который исключит необходимость осуществлять вращение

объекта томографического сканирования. Такое технологическое преимущество значительно упростит процесс сбора проекционных данных для объектов протяжённой формы, и сделает возможным сбор проекционных данных для объектов, физический доступ к которым ограничен.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка оптимального метода проведения рентгеновского томографического сканирования и способа последующей обработки данных для анализа протяженных объектов или объектов, доступ к которым заблокирован с возможностью не осуществлять вращение объекта для сбора проекционных данных.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. реализация алгоритма обратного проецирования для параллельного пучка и пучка расходящейся формы;
2. экспериментальная проверка работоспособности полученного на основе алгоритма обратного проецирования программного обеспечения;
3. оптимизация алгоритма фильтрованных обратных проекций для сканирования с пошаговым сдвигом;
4. разработка траектории томографического сканирования объекта без вращения с учетом расходящейся геометрии рентгеновского пучка и оптимизация алгоритмов реконструкции.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. реализация алгоритма фильтрованных обратных проекций в рамках программного обеспечения, выполняющего томографическую реконструкцию с учётом расходящейся геометрии рентгеновского пучка;
2. оптимизация алгоритма фильтрованных обратных проекций для томографического сканирования с пошаговым сдвигом без необходимости совмещения центра вращения с оптической осью установки;
3. разработка технологии проведения томографического сканирования, не требующей осуществлять вращения исследуемого объекта;
4. разработка концепта рентгеновской томографической установки, реализующей предлагаемую технологию.

Научная и практическая ценность. В работе представлен способ осуществления рентгеновского томографического сканирования без необходимости вращать объект исследования. Такой подход позволяет значительно упростить конфигурацию установки, исключая из нее компоненты, отвечающие за вращение исследуемого объекта. Данное преимущество особенно актуально для крупногабаритных или иных

объектов, вращение которых тем или иным способом может повлиять на достоверность проводимых экспериментов.

На базе предлагаемой технологии также возможно построить инспекционный комплекс контроля, способный осуществлять процедуры неразрушающего контроля протяжённых крупногабаритных объектов. Можно с большой вероятностью утверждать, что подобная система найдет своё применение в таких отраслях промышленности, как, например, авиационная и нефтегазовая.

Также разработанное программное обеспечение может стать фундаментальной базой для дальнейшей работы, связанной с созданием единого программного комплекса для задач моделирования и томографической реконструкции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Геометрия рентгеновского томографического сканирования с пошаговым сдвигом образца и оптимизированный для неё метод обработки проекционных данных на основе алгоритма фильтрованных обратных проекций;
2. Геометрия рентгеновского томографического сканирования без вращения образца с изменением расстояния источник-детектор и оптимизированный для неё метод обработки проекционных данных на основе геометрии рентгеновского пучка;
3. Концепт рентгеновской томографической установки, реализующий технологию проведения рентгеновского томографического анализа без вращения исследуемого объекта.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются систематическим характером исследования, проведением экспериментальных работ на аппаратуре, проходящей периодическое обслуживание в соответствии с рекомендациями производителя, использованием профессионального программного обеспечения и системным подходом к проведению моделирования и затем анализу полученных результатов.

Апробация. Результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. XII Международная конференция студентов, аспирантов, молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук 2015», 2015;
2. VII Международная научно практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине», г. Томск, 2015;
3. SyncLight2015, Сан-Паулу, Бразилия, 2015;
4. XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», 2016;

5. V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (ВТСНТ-2016), г. Томск, 2016;
6. V Международный молодежный Форум «Инженерия для освоения космоса», Томск, 2017;
7. VI Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (ВТСНТ-2017), г. Томск, 2017;
8. XIV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», 2017;
9. XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 2017;
10. Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, Новосибирск, 2017;
11. VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», Юрга, 2017;
12. Raciri 2017: Grand Challenges and Opportunities with the Best X-ray and Neutron Sources, Швеция, Роннебю, 2017.

Личный вклад автора диссертационной работы состоит в создании программного обеспечения для моделирования экспериментальных данных, а также реализации алгоритма томографической реконструкции для пучка с расходящейся геометрией излучения и его оптимизация для сканирования с пошаговым сдвигом и сканирования без вращения объекта путем изменения расстояния источник-детектор. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые положения и получены основные результаты, подтверждающие их. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 20% от общего объема работы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из которых 2 статьи в изданиях, включенных в списки ВАК, 5 статей индексируются базами Web of Science и Scopus, а также 12 тезисов докладов на международных конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка использованных источников, содержащего 36 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 108 страниц и включает 62 рисунка и 3 таблицы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведен обзор современных систем рентгеновского томографического сканирования, затронуты существующие проблемы. Также описана структура

диссертационной работы и сформулированы поставленная цель и решаемые в её рамках задачи.

В первой главе приведены теоретические аспекты рентгеновской томографии, знание которых необходимо для решения поставленных задач. Также приведен краткий обзор развития систем рентгеновского томографического сканирования с точки зрения совершенствования и изменения непосредственно траектории перемещения компонентов установки относительно объекта исследования.

Так для проведения процедур промышленного неразрушающего контроля обычно применяют конфигурацию рентгеновской установки, соответствующей третьему поколению (Рисунок 1) систем томографического анализа. Применение конфигурации систем четвертого поколения затруднено и часто практически невозможно, особенно когда речь идет о дефектоскопии крупногабаритных объектов. В простых случаях многие производственные предприятия ограничиваются лишь радиографическим двумерным контролем. Но в случае производства объектов сложной конструкции с большим числом критичных параметров, подлежащих детальной инспекции на предмет дефектов, трехмерная рентгеновская томография является наиболее оптимальным методом контроля.

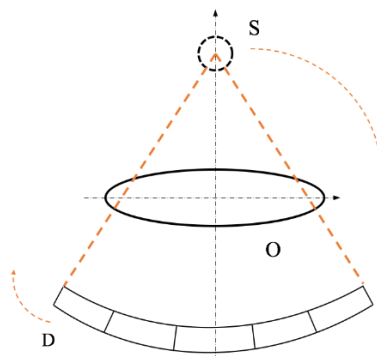


Рис. 1 – Схема рентгеновской томографической установки третьего поколения

Интенсивное и непрерывное развитие в течение нескольких последних десятков лет привели к тому, что промышленная рентгеновская томография стала одним из самых распространенных способов совершенствования производственных технологий и достижения нового стабильного уровня надежности работы продуктов многих важнейших отраслей инновационной промышленности. Сложно переоценить роль рентгеновской компьютерной томографии, как метода неразрушающего контроля, ведь метод находит своё применение в таких фундаментальных отраслях промышленности, как: транспортная, машиностроительная, аэрокосмическая, пищевая, нефтегазовая, ядерная и т.д.

Стоит заметить, что метод рентгеновской компьютерной томографии достаточно сложен в исполнении с технической точки зрения, требует значительных финансовых затрат, а также ставит проблему биологической защиты. Но несмотря на перечисленные недостатки КТ обуславливает свою

конкурентоспособность, наряду с альтернативными методами контроля, возможностью количественно анализировать неоднородную внутреннюю структуру исследуемых объектов и определять на основе этого анализа параметры, играющие критическую роль в вопросах обеспечения надежной работы оборонных, аэрокосмических, нефтеперерабатывающих и других систем.

Рентгеновская томография, являясь методом послойной визуализации структуры неоднородных объектов, основывается на зависимости линейного коэффициента поглощения в рентгеновском диапазоне от состава и плотности материала. В связи с этим конфигурация рентгеновской установки, реализующей процесс томографического сканирования, носит особую важность.

Исходными для томографического восстановления внутренней структуры исследуемого объекта данными являются теневые проекции, полученные в результате попадания рентгеновского пучка, прошедшего сквозь объект, на детектирующую поверхность. До того, как для осуществления регистрации рентгеновского излучения стали применять цифровые детектирующие устройства, использовались рентгеновские плёнки. Регистрация изображения на рентгеновской плёнке происходит благодаря протеканию на её поверхности химической реакции, результате которой получается черно-белая проекция. Области черного цвета соответствуют части рентгеновского пучка, траектория которого не пересекается с препятствиями в виде, например, объекта исследования. В то время как области изображения белого цвета сигнализируют о том, что при прохождении через объект значительная часть рентгеновского пучка поглотилась. Таким образом и формируется упомянутая выше рентгеновская проекция.

Цифровое же детектирование происходит несколько другим образом. Пиксели детектирующей поверхности при попадании сигнала максимальной интенсивности генерируют участок проекции белого цвета, ослабленные области пучка соответствуют более тёмным участкам проекции. Распределение интенсивности всего пучка происходит в диапазоне градаций серого. Однако, в связи с тем, что общепринятым стандартом теневой проекции является её вид, получаемый на рентгеновских плёнках, цифровое изображение дополнительно проходит специальную постобработку, в результате которой зарегистрированная пикселями интенсивность сигнала инвертируется, и получается теневая проекция стандартного вида, являющаяся на самом деле негативом исходного изображения.

И в первом и во втором случае основополагающим для рентгеновской томографии свойством излучения является его способность ослабляться в объёме объекта, с которым происходит взаимодействие. Процессом, приводящим к ослаблению потока рентгеновского излучения во время его взаимодействия с веществом, является поглощение. Но нужно помнить, что при исследовании способов интеракции рентгеновского излучения с

материалом объекта регистрируется интенсивность пучка, прошедшего сквозь объект. Данная интенсивность носит интегральный характер и обосновывается несколькими процессами, происходящими при взаимодействии.

Лучи рентгеновского диапазона излучения являются электромагнитными волнами. Известно, что фотоны электромагнитного излучения одновременно обладают свойствами, как волны, так и частицы. При проявлении фотонами свойств частицы их упругое столкновение с заряженными частицами вызывает испускание фотонов с аналогичной частотой, неупругое становится причиной эффекта Комптона, которым и обосновывается тот факт, что частота рассеянной волны уменьшается. При проявлении волновых свойств происходят преломление, отражение, рассеяние, дифракция и поляризация. Отсюда можно заключить, что при вследствие корпускулярно-волнового дуализма рентгеновский пучок может испытывать два типа рассеяния – волновое и комптоновское, то есть когерентное и некогерентное (Рисунок 2). При этом всё ещё нельзя забывать о роли фотоэлектрического поглощения.

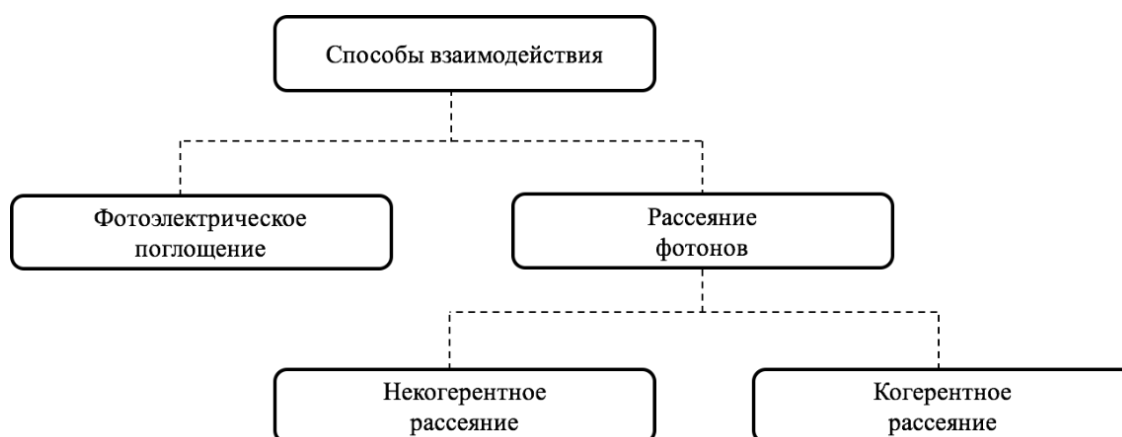


Рис. 2 – Способы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом

Стандартный случай рентгеновского томографического сканирования предполагает, что вращающийся объект сканирования располагается между источником и приёмником рентгеновского излучения. Данная схема эффективно работает для малых и средних объектов, размеры которых не превышают габаритов установки или в крайнем случае соизмеримы с ними. В этом случае удаётся собрать такой набор проекционных данных, содержащейся информации в котором будет достаточно для качественной и полной реконструкции.

В случае же крупногабаритных объектов возникает множество проблем уже на этапе сбора проекционных данных. Наиболее острым образом эти проблемы выражаются при попытках томографического сканирования протяжённых объектов (Рисунок 3).

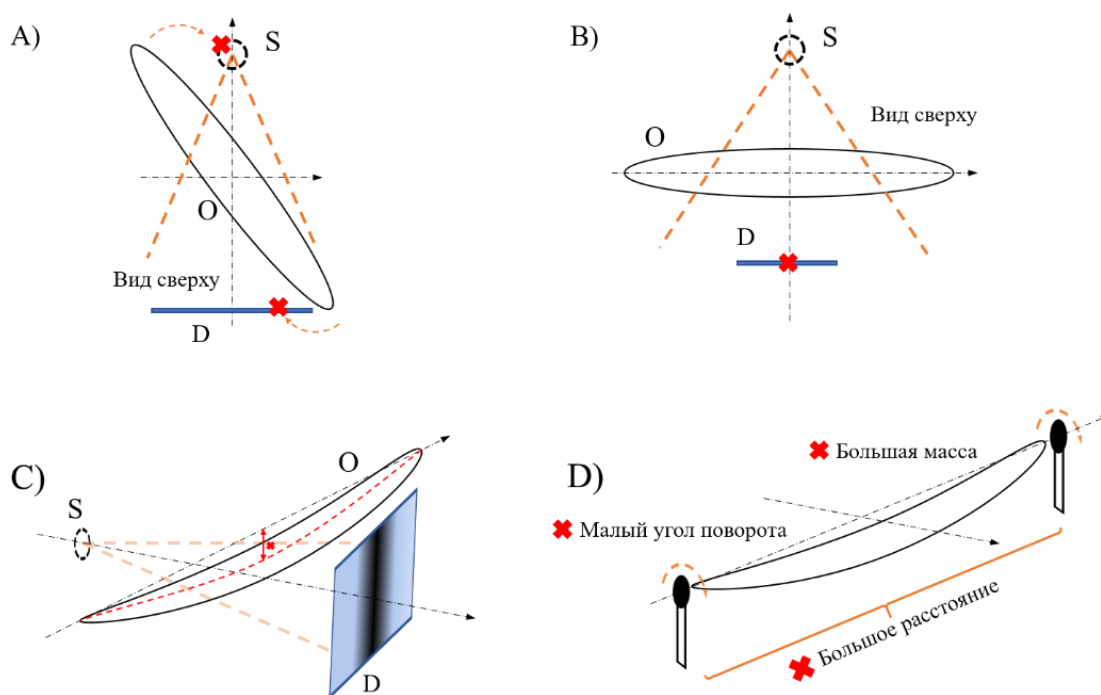


Рис. 3 – Проблемы томографического сканирования крупногабаритных объектов протяжённой формы

Основными факторами, характеризующими сложность сбора проекционных данных, являются: невозможность осуществить поворот объекта при стандартной схеме сбора данных (Рисунок 3-А), малый размер детектора по сравнению с размерами объекта сканирования (Рисунок 3-В), провисание объекта в центре под тяжестью собственной массы (Рисунок 3-С), сложность проектировки и постройки достаточно точной механической системы вращения (Рисунок 3-Д).

Вторая глава диссертации посвящена использованному методу томографической реконструкции. Приведено общее описание алгоритмов, и также затронуты нюансы их применения. Преобразование Радона рассмотрено, как основной инструмент для моделирования рентгеновской томографии и реализации алгоритма реконструкции. Приводится описание программной реализации алгоритма фильтрованных обратных проекций для веерного пучка излучения, а также описание роли фильтрации профиля ослабления и способа её применения.

Процесс обратного проецирования представляет собой прикладывание величины сигнала, соответствующего данной лучевой сумме, ко всем точкам на плоскости, которые образуют этот луч. Подобная процедура «растягивания» на плоскость реконструкции производится с каждой проекцией обрабатываемого набора данных. В результате полной обработки собранного набора проекций получается приближённая аппроксимация анализируемого объекта.

Также необходимо выделить роль процедуры фильтрации сигнала (Рисунок 4) с целью исключить влияние ложных сигналов на качество реконструкции.

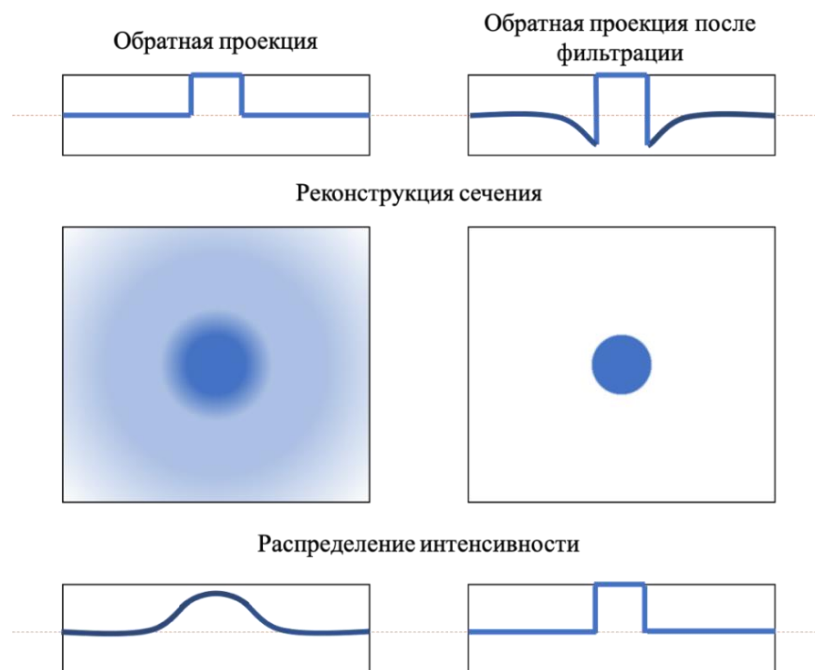


Рис. 4 – Схематичное представление результата применения процедуры фильтрации

В результате анализа метода томографической реконструкции под названием «алгоритм обратного проецирования» были выявлены закономерности его работы, которые позволили реализовать алгоритм на практике с учетом особенностей эксперимента, а именно геометрии рентгеновского пучка. Реконструкции данных, полученных в результате применения параллельного излучения, и данных, полученных на расходящемся пучке, имеют принципиальные отличия. Продемонстрирована неприменимость алгоритма обратного проецирования, реализованного для случая параллельного пучка, к проекционным данным, полученным на расходящемся пучке, без учёта корректирующего фактора на реконструированных сечениях протезов кровеносных сосудов. Учёт корректирующего фактора позволяет производить реконструкцию данных при расходящейся геометрии эксперимента с высокой точностью, адекватность результатов была проверена физическим экспериментом. Разработанное программное обеспечение стало фундаментальной основой для последующих модификаций алгоритма реконструкции.

Третья глава раскрывает суть предлагаемой технологии сканирования крупногабаритных протяжённых объектов. Здесь приводится описание процесса оптимизации алгоритма обратного проецирования для перехода к сканированию без вращения образца, и также результаты компьютерного моделирования и реконструкции, подтверждающие работоспособность технологии. В конце главы предложен концепт рентгеновской томографической установки, реализующий представленную технологию.

Применяя принципы программной реализации, использованные при разработке программного обеспечения для моделирования и реконструкции, была получена оптимизация алгоритма обратного проецирования для

томографической реконструкции при сканировании образца с пошаговым сдвигом. Здесь, как в случае стандартной схемы сканирования, математической интерпретацией процедуры проецирования или растягивания профиля ослабления в область реконструкции являлась операция интерполирования. Таким образом, реконструкции отсканированной части исследуемого сечения формировалась посредством суммирования соответствующих данному поперечному сдвигу обратных проекций, как это показано на рисунке 5.

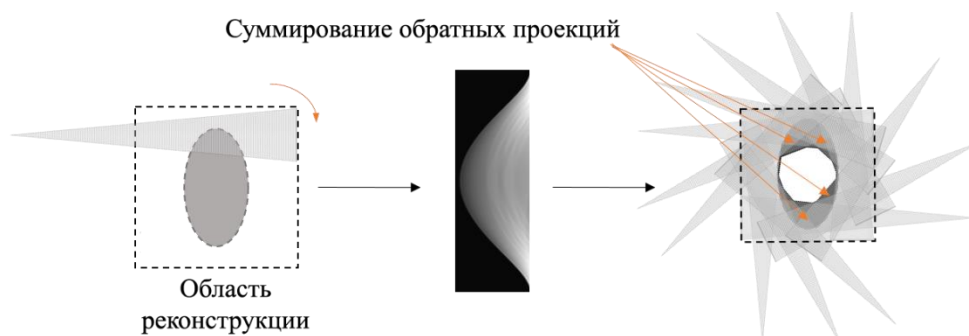


Рис. 5 – Реконструкция отсканированной части объекта, соответствующая единичному сдвигу

Для экспериментального подтверждения достоверности работы геометрии томографического сканирования с пошаговым сдвигом в качестве объекта контроля был использован сегмент вертолётной лопасти, предоставленный Московским вертолётным заводом имени М. Л. Миля. Сегмент обладал неоднородной внутренней структурой, которую было бы достаточно легко распознать на реконструкции приемлемого качества. В качестве параметров контроля были выбраны качество переходов между поверхностями элементов внутренней структуры, а также число и пространственное распределение дефектов.

Схематичное изображение сегмента лопасти представлено на рисунке 6, параметры эксперимента – в таблице 1, результат реконструкции – на рисунке 7.

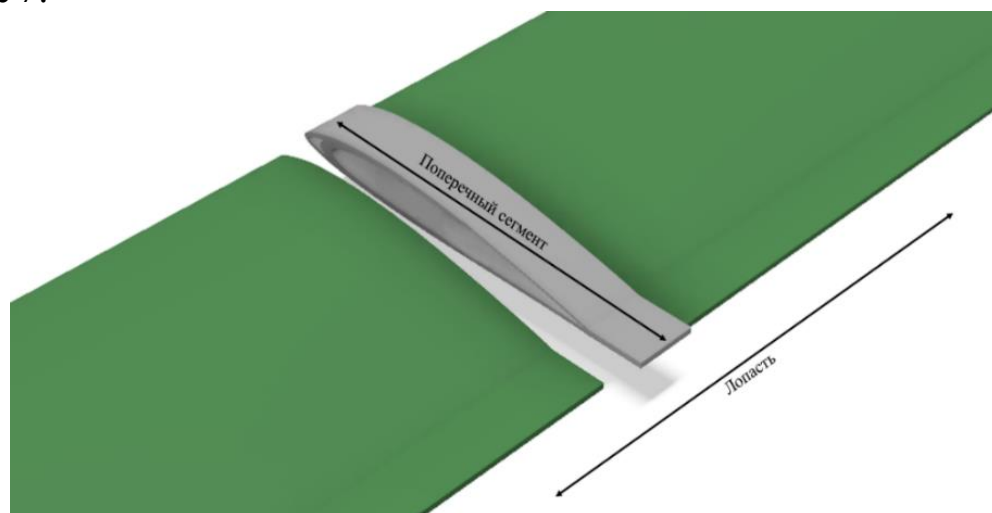


Рис. 6 – Схематичное представление сегмента вертолётной лопасти

Таблица 1 – Экспериментальные параметры

Область реконструкции	Ширина детектора	Угловой диапазон	Угловой шаг	Расстояние	Размер пикселя
2000x2000 пикселей	1024 пикселей	360 градусов	0.3 градуса	1200 мм	400 мкм

Длина и ширина образца составляли 400 мм и 68 мм соответственно. Томографическое сканирование было проведено на рентгеновской установке в составе источника рентгеновского излучения MXR 451/11 COMET с диаметром фокусного пятна в 400 мкм, линейный детектором X-Scan 0.4iHE2-410 M с размером пикселя 400 мкм. Сканирование было проведено в 3 поперечных сдвига и было осуществлено при помощи поворотного стола DELKEN Automazioni DCNI 50 ST, точность позиционирования которого составляет 10 мкм. На рисунке 44 изображены фото использованного сегмента лопасти, а также три усеченных профиля ослабления, соответствующие трём поперечным сдвигам источника и детектора.

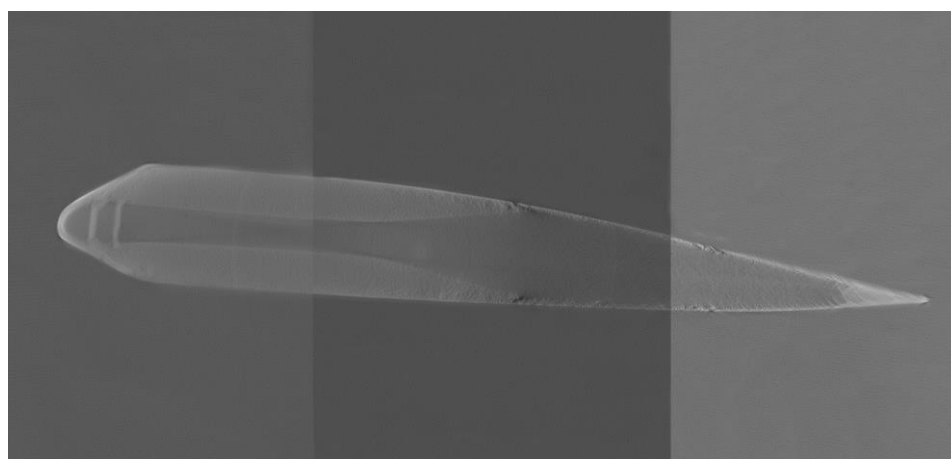


Рис. 7 – Реконструированный слой вертолётной лопасти

В случае описываемого метода набор проекций $R_1...R_n$ получается при изменении расстояния между источником и образцом так, как показано на рисунке 8.

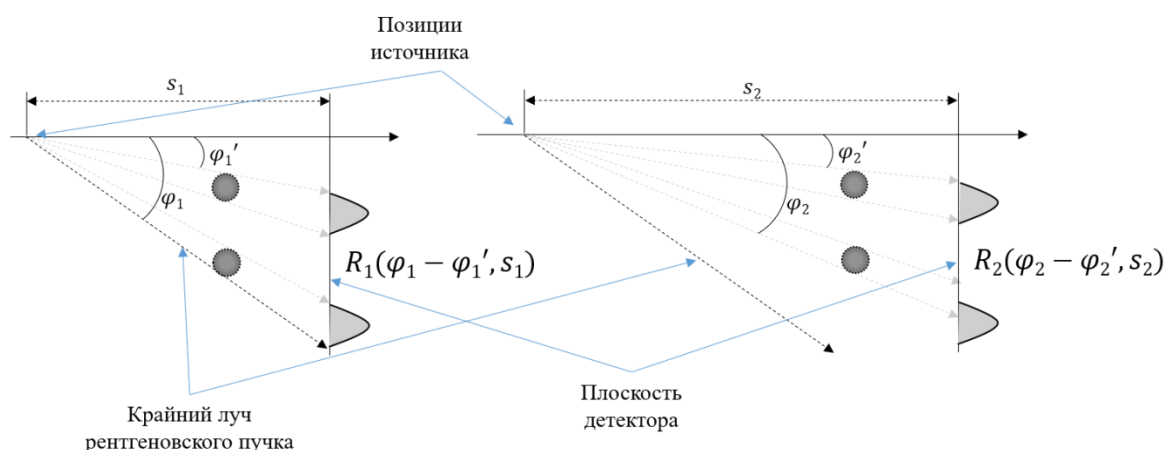


Рис. 8 – Предлагаемая геометрия томографического сканирования

Таким образом, на расстоянии S_1 объекты экспонируются лучами рентгеновского пучка в диапазоне $\varphi_1 - \varphi_1'$, формируя проекцию R_1 . Проекция R_2 формируется при перемещении источника на расстояние S_2 , так как в этом случае объекты исследования экспонируются лучами рентгеновского пучка уже под углами в диапазоне $\varphi_2 - \varphi_2'$. Совершив достаточное количество перемещений источника, полученные данные можно использовать для реконструкции объекта исследования.

Рассмотрим пример на фантомном объекте исследования с более характерной внутренней структурой. На рисунке 9 изображены: использованное для моделирования сечение фантомного объекта с усложненной внутренней структурой слева и профиль его ослабления, полученный при помощи сканирования объекта без вращения с изменением расстояния источник-детектор.

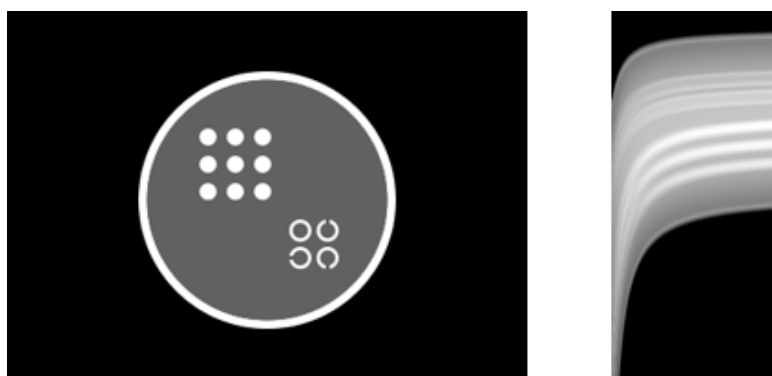


Рис. 9 – Слева: сечение фантомного объекта с усложнённой внутренней структурой; справа: профиль ослабления объекта, полученный на основе сканирования без вращения

Легко заметить, что приведённое изображение профиля ослабления содержит характерные участки, соответствующие особенностям внутренней структуры фантомного объекта. Однако участок изгиба профиля ослабления, а также степень его искривления недостаточно большие, что может отрицательно сказаться на качестве реконструкции, так как профиль не содержит в себе достаточно информации для восстановления изображения с приемлемым, как минимум, для визуального распознавания, качеством.

Моделирование показало, что экспонирования с изменением расстояния от источника до детектирующего устройства недостаточно, чтобы получить приемлемое качество реконструкции. Реконструкция позволяет распознать элементы внутренней структуры фантомного объекта, но общее её качество совсем не приемлемо для анализа сечения. Таким образом возникла задачи оптимизации траектории сбора проекционных данных, целью которой являлось увеличение полезной информации в профиле ослабления. Было установлено, что данную проблему можно решить двумя способами. Первый – увеличение степени раскрытия пучка рентгеновского излучения, которое соответственно увеличивает угловой диапазон падения лучей в составе пучка на поверхность сканируемого объекта. Однако, данный

способ пригоден только для компьютерного моделирования, так как в своём большинстве источники рентгеновского излучения не обладают регулируемым углом раскрытия пучка излучения, этот параметр является фиксированным. Второй – оптимизация самой схемы сбора проекционных данных. На рисунке 10 пунктирными линиями обозначены траектории перемещения источника и соответственно поворота детектора на противоположной стороне. Сплошные линии показывают траектории, по которым происходило смещение источника излучения и происходил сбор проекционных данных на 5 этапах сканирования. Полученные проекционные данные были подвергнуты процедуре обработки на основе разработанного программного обеспечения.

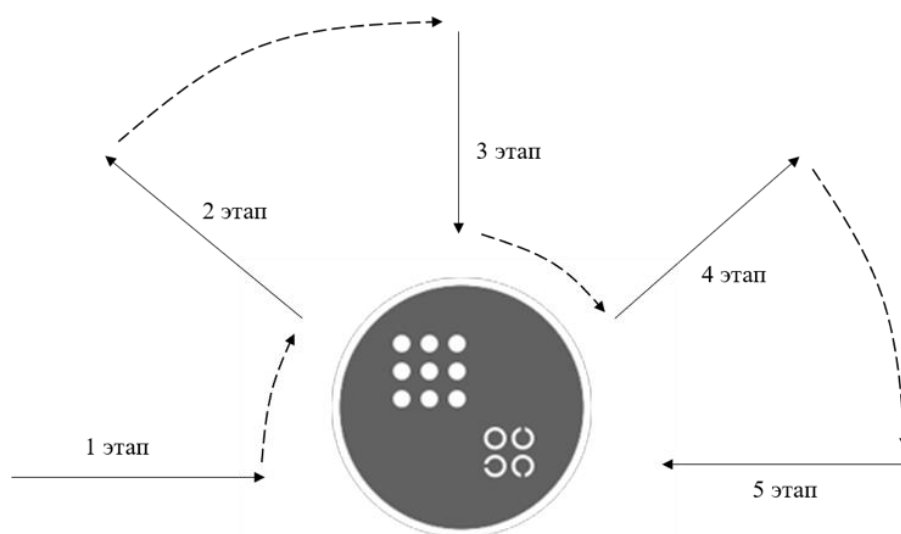


Рис. 10 – Оптимизированная схема сбора проекционных данных без вращения объекта исследования

Как видно из рисунка, применение описанной схемы сбора проекционных данных позволило в значительной мере улучшить качество реконструкции. В данном случае удалось получить не просто признаки элементов внутренней структуры сечения фантомного объекта, а визуализировать их практически полностью, как и контур самого объекта.

Дальнейшая работа по улучшению качества реконструкции заключалась в анализе влияния на него шага перемещения источника, а также числа направлений сканирования. Стоит также заметить, что ранее в рамках моделирования использовались проекционные данные, сформированные только с учётом половины рентгеновского пучка излучения. При последующем моделировании использовался полный растр пучка, в качестве объекта исследования использовался фантом Шеппа-Логана.

Приведём результаты реконструкции для трёх и пяти направлений сканирования с угловыми расстояниями в 30 и 18 градусов на рисунках 11 и 12 соответственно. Число означает длину шага сканирования в пикселях.

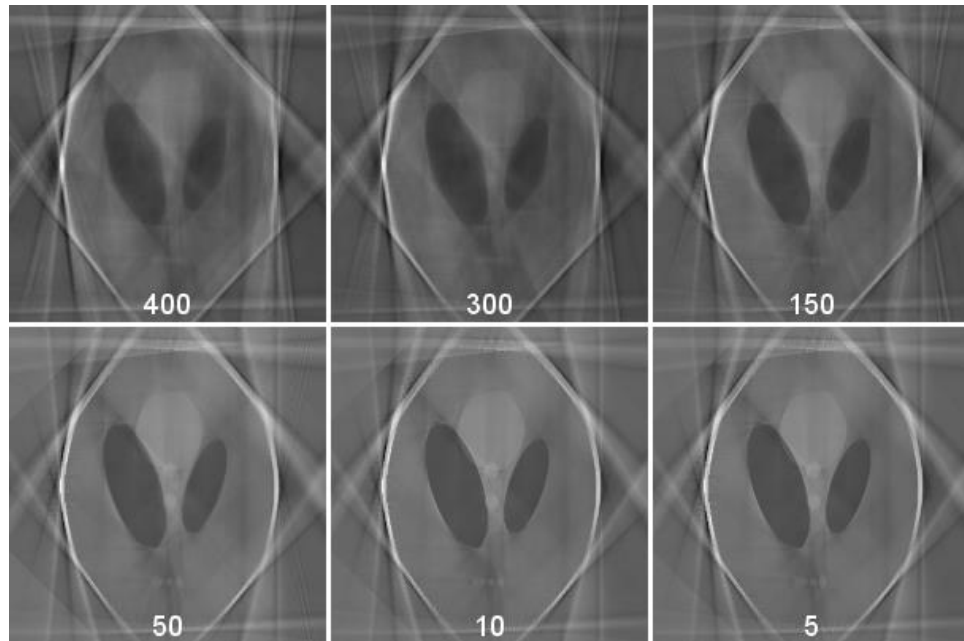


Рис. 11 – Реконструкция фантом Шеппа-Логана: три направления сканирования

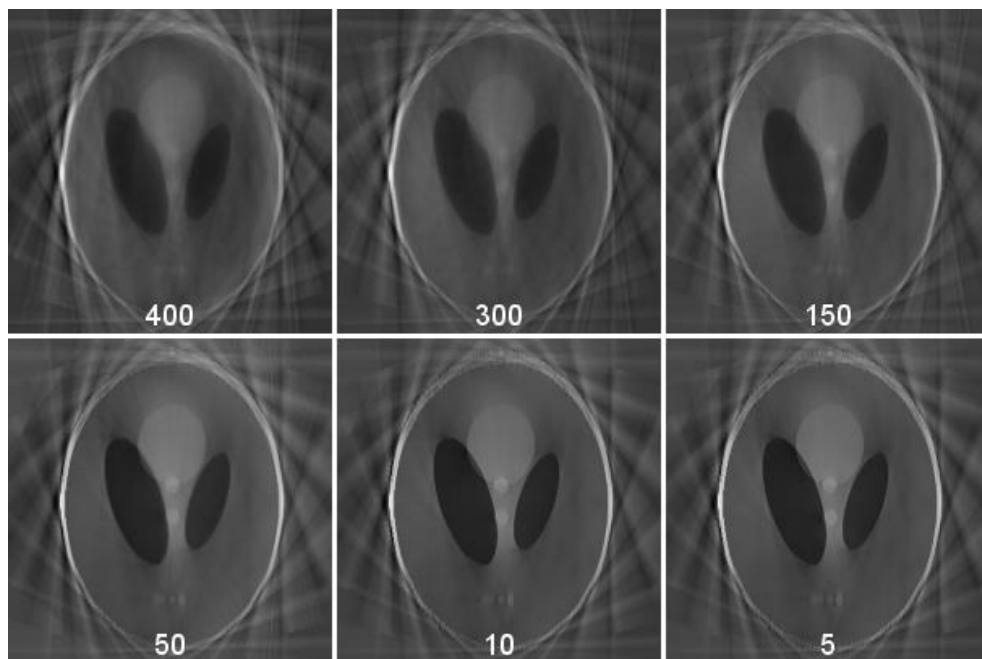


Рис. 12 – Реконструкция фантом Шеппа-Логана: пять направлений сканирования

По результатам моделирования можно сделать вывод, что уже при трёх направлениях сканирования предлагаемая технология томографического анализа даёт приемлемое качество реконструкции внутренней структуры исследуемого объекта. При пяти направлениях сканирования удалось добиться наилучшего качества реконструкции, для демонстрации которого сравним поперечные профили оригинального фантома и его реконструкции (Рисунок 13).

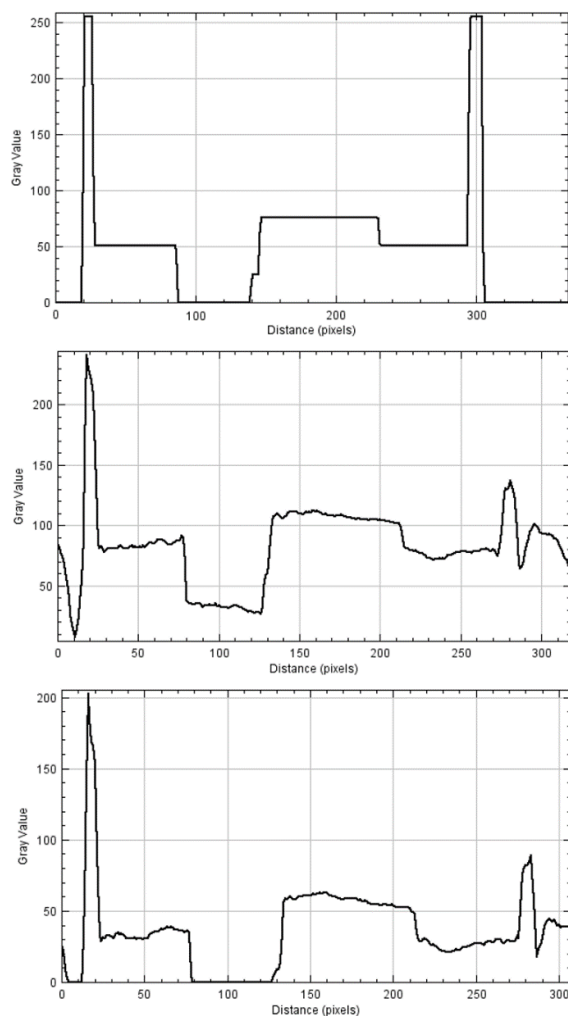


Рис. 13 – Вверху: профиль оригинального фантома; в центре: профиль реконструкции; внизу: профиль реконструкции после фильтрации

Приведённые графики профилей подтверждают работоспособность предлагаемой геометрии сбора проекционных данных и оптимизированного для неё алгоритма реконструкции, а значит всей технологии томографического анализа в целом. Приведенное изображение реконструкции фантома Шеппа-Логана не подвергалось специальным процедурам фильтрации артефактов, что позволяет говорить, метод потенциально способен обеспечить ещё более высокое качество реконструкции. Заметим, что в соответствии с предлагаемым подходом, необходимый набор проекционных данных можно собрать, не осуществляя вращения исследуемого объекта. Для получения приемлемого качества реконструкции необходимо и достаточно обеспечить угловой доступ к объекту в диапазоне 90 градусов, чтобы осуществить сканирование объекта с изменением расстояния источник-детектор в трёх и более экспозиционных направлениях. При этом стоит заметить, что в аналогичной конфигурации сбор проекционных данных в соответствии со стандартной геометрией томографического сканирования позволяет осуществить лишь частичную реконструкцию сечения исследуемого объекта (Рисунок 14).

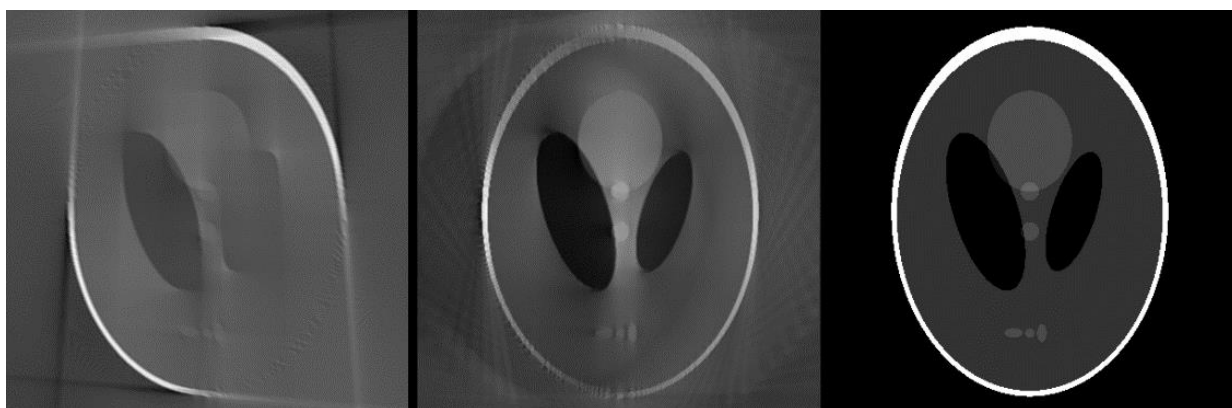


Рис. 14 – Слева: реконструкция фантома при стандартной схеме сбора данных; в центре: реконструкция – при схеме сбора данных без вращения объекта с изменением расстояния источник-детектор; справа: оригинальный фантом

В результате работы было также разработано концептуальное решение для рентгеновской томографической установки, способной реализовать предлагаемую технологию (Рисунок 15). Наиболее важным моментом является реализация механической системы, которая будет осуществлять необходимые перемещения источника излучения относительно объекта исследования и детектора. В данном случае в качестве такой механической системы выбран робот манипулятор, который, однако, может быть заменен на более экономичное решение в виде трёхосевой системы перемещения. И тот и другой вариант с достаточной точностью позволят осуществить сбор проекционных данных согласно описываемой в данной главе технологии.

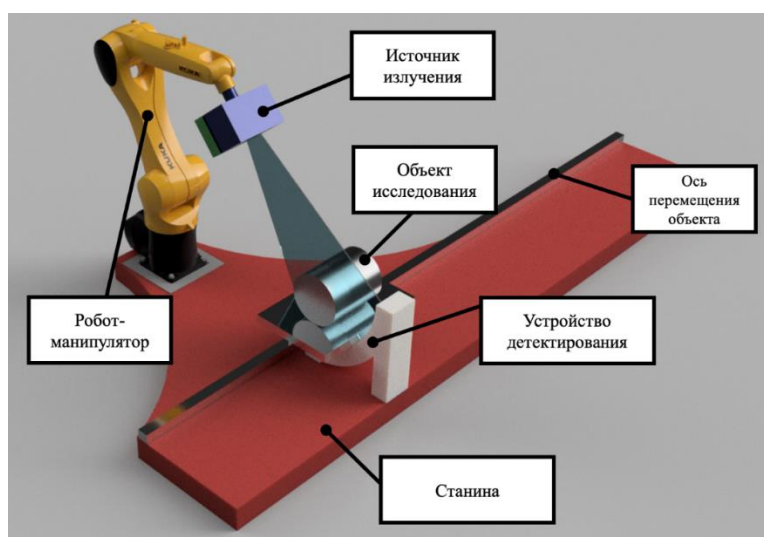


Рис. 15 – Концепт рентгеновской установки, реализующей технологию томографического сканирования без вращения образца

В приложениях А и Б представлен программный код разработанного и использованного в рамках работы программного обеспечения.

Основные результаты работы

1. разработаны инструменты компьютерного моделирования процесса томографического сканирования для параллельной и веерообразной формы пучка рентгеновского излучения, а также реализованы алгоритмы реконструкции на основе метода фильтрованных обратных проекций;
2. разработан метод томографического сканирования с пошаговым сдвигом, которая частично решает проблему сканирования крупногабаритных протяжённых объектов, а также является альтернативным методом решения проблемы сканирования объектов детекторами малого размера и перспективным способом снижения дозы облучения при томографическом исследовании; алгоритм фильтрованных обратных проекций адаптирован для данной схемы сбора проекционных данных;
3. разработана технология томографического сканирования без вращения объекта исследования с изменением расстояния источник-детектор, которая является оптимальным способом сбора проекционных данных, решающим основные проблемы сканирования крупногабаритных протяжённых объектов; разработанное и реализованное программное обеспечение адаптировано для данной технологии томографического сканирования, что позволяет осуществлять реконструкцию исследуемого сечения;
4. предложен концепт рентгеновской томографической установки, реализующей разработанную схему сбора проекционных данных.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи

1. **A. Ozdiev** "X-Ray Tomography Simulation Based on Direct Radon Transform", Key Engineering Materials, Vol. 743, pp. 445-448, 2017
2. **Оздиев А.Х.**, Крючков Ю.Ю. «Реализация алгоритма томографической реконструкции методом обратного проецирования при использовании веерного пучка», Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 55-60
3. **Оздиев А.Х.**, Крючков Ю.Ю. «Уменьшение дозы облучения пациента при компьютерно-томографическом исследовании путём применения модифицированного алгоритма обратного проецирования», Медицинская физика, Москва, №4, 2017, С. 16-22
4. **Ozdiev A.Kh.**, Kryuchkov Y.Y. «Implementing a back-projection tomographic reconstruction algorithm using a fan-shaped beam», Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. T. 53. № 5. С. 387-392
5. **A. Ozdiev**, Y. Kryuchkov, H.-M. Kroning «Non-destructive X-Ray testing of complex mechanisms and devices», MATEC Web of Conferences 102, 01029

6. B. K. Afornu, O.C. Joseph, **A. Ozdiev**, D.A. Sednev «Simulation of Translational Data Acquisition Scheme of X-Ray Computed Tomography for Application in NDT», Key Engineering Materials, Vol. 769, pp. 256-261, 2018
7. **A.Н. Ozdiev**, B.K. Afornu & D.A. Sednev (2018): Optimized Filtered Back-Projection Tomographic Reconstruction Algorithm for the Step-Shift Scanning of a Sample, Research in Nondestructive Evaluation, DOI: 10.1080/09349847.2018.1498960

Тезисы конференций

1. **Оздиев А.Х.** Автоматизация установки для измерения параметров цифровых быстродействующих камер [Электронный ресурс] = Automation of visible light setup for characterization of fast scientific cameras / А. Х. Оздиев, Д. А. Карпов; науч. рук. С. Н. Ливенцов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015;
2. **Оздиев А.Х.** Setup for characterization of indirect converting X-Ray detectors [Электронный ресурс] = Система оценки параметров не прямых детекторов рентгеновского излучения / А. Х. Оздиев, Д. А. Карпов; науч. рук. Ю. Ю. Крючков // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015;
3. **A.Н. Ozdiev** X-ray Phase-Contrast Imaging with High Energy X-ray Sources, A. Ozdiev, D. Karpov, T. dos Santos Rolo, D. Kunka, J. Mohr SyncLight2015, Сан-Паулу, Бразилия, 2015
4. **Оздиев А.Х.** Томографический анализ дефектов протезов кровеносных сосудов методом обратного проецирования на основе веерного пучка без применения алгоритма перепакровки [Электронный ресурс] / А. Х. Оздиев, Ю. Ю. Крючков // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016;
5. **Оздиев А.Х.** Модифицированный алгоритм обратного проецирования для томографической реконструкции при сканировании образца с пошаговым сдвигом [Электронный ресурс] / А. Х. Оздиев; науч. рук. Ю. Ю. Крючков // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2016): сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 5–7 декабря 2016;
6. Afornu, B. K. Simulation of translational data acquisition scheme and development of reconstruction algorithm in non-destructive testing using x-ray tomographic principles [Electronic resource] / B. K. Afornu, **A.Н. Ozdiev**; sci. adv. D.A. Sednev // Высокие технологии в современной

- науке и технике (ВТСНТ-2017) : сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017;
7. **Ozdiev A.H.** Optimized filtered backprojection tomographic reconstruction algorithm for step-shift scanning of the sample [Electronic resource] / A. H. Ozdiev // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции, г. Томск, 21-22 сентября 2017;
 8. **Оздиев А.Х.** Решение проблемы томографического сканирования объектов детекторами малого размера [Электронный ресурс] = Solution to the problem of tomographic scanning of objects by small area X-Ray detectors / А. Х. Оздиев; науч. рук. Ю. Ю. Крючков // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 25-28 апреля 2017;
 9. **Оздиев А.Х.** Уменьшение дозы облучения пациента при томографическом исследовании путём применения оптимизированного алгоритма обратного проецирования [Электронный ресурс] = Reduction of radiation dose by application of optimized filtered backprojection algorithm / А. Х. Оздиев; науч. рук. Ю. Ю. Крючков // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 25-28 апреля 2017;
 10. **Ломыгин, А. Д.** Моделирование рентгеновской томографии на основе прямого преобразования радона [Электронный ресурс] = X-Ray tomography simulation based on direct radon transform / А. Д. Ломыгин, А. Х. Оздиев; науч. рук. Ю. Ю. Крючков // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 25-28 апреля 2017;
 11. **Оздиев А.Х.** Томографический контроль сварных соединений с применением оптимизированного алгоритма обратного проецирования [Электронный ресурс] / А. Х. Оздиев, В. А. Смолянский, Ю. Ю. Крючков // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 18-20 мая 2017;
 12. **A.H. Ozdiev**, Optimization and adaptation of reconstruction algorithms for complex objects and structures, A. Ozdiev, Y. Kryuchkov, Raciri 2017: Grand Challenges and Opportunities with the Best X-ray and Neutron Sources, Швеция, Роннебю, 2017.