На правах рукописи

Батранин Андрей Викторович

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАФОВ ВЫСОКО-ГО РАЗРЕШЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	Чахлов Сергей Владимирович кандидат физико-математических наук
Официальные оппоненты:	Косарина Екатерина Ивановна доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное пред- приятие «Всероссийский научно- исследовательский институт авиационных мате- риалов» ГНЦ РФ, главный научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля
	Клопотов Анатолий Анатольевич доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное обра- зовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно- строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения
Ведущая организация:	Акционерное общество «Федеральный научно- производственный центр «Алтай», Алтайский край, г. Бийск

Защита состоится «06» <u>декабря</u> 2016 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55, и на сайте: http://portal.tpu.ru/council/916/worklist

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент

But

Е.А. Васендина

Общая характеристика работы

Рентгеновская вычислительная томография (PBT) прочно заняла одно из ведущих мест среди методов исследования внутренней структуры объектов не только в сфере медицины и биологии, но и в области естественных и технических наук. Развитие PBT связано с прогрессом вычислительной и рентгеновской техники.

К настоящему времени сложилось отдельное направление исследовательской томографии, которая отличается от традиционной клинической РВТ по ряду принципиальных моментов, хотя используются те же принципы получения информации об объекте исследования. Во-первых, исследовательская томография, как правило, не предназначена для медицинских применений, поэтому дозовые нагрузки чаще всего не ограничиваются. Во-вторых, конструкции исследовательских и медицинских систем РВТ имеют существенные отличия. В-третьих, достигаемое пространственное разрешение в разы может превышать значения, характерные для медицины. Исследовательская томография часто определяется как РВТ высокого разрешения.

Актуальность темы исследования

Первые работы по созданию систем РВТ высокого разрешения датируются серединой 80-х годов XX века и их связывают с именами таких исследователей как В.Р. Flannery, A.Y. Sasov, L.A. Feldkamp, J.H. Kinney. Среди отечественных исследователей, сделавших существенный вклад в развитие метода РВТ в последние годы, следует отметить Э.И. Вайнберга, В.Л. Венгриновича, В.Е. Асадчикова, В.П. Карих, Б.И. Капранова, В.И. Сырямкина, И.Г. Казанцева, С.А. Терещенко, О.В. Филонина, В.Я. Маклашевского.

Предпосылкой РВТ высокого разрешения стало создание цифровых детекторов с малым размером детектирующего элемента, а также прогресс в области рентгеновской оптики, синхротронного излучения и рентгеновских аппаратов с малым размером фокального пятна.

Другой предпосылкой явилось развитие вычислительной техники, которая играет ключевую роль в процессе получения томографических изображений. В настоящее время объем данных одного томографического сканирования измеряется гигабайтами, что требует вычислительных мощностей на уровне гигафлопс. Указанную производительность имеет современный персональный компьютер.

Рынок систем PBT высокого разрешения активно развивается. Крупные производители научных приборов, такие как Carl Zeiss, General Electric, Bruker, Nikon Metrology, а также ряд небольших компаний предлагают готовые исследовательские томографы. В крупных научных центрах создаются лабораторные установки, отвечающие специфическим задачам исследователей. Большая часть созданных томографов комплектуется компонентами различных производителей, специализирующихся на разработке источников, детекторов, механических манипуляторов. Отечественные разработки следуют той же тенденции, хотя число производимых установок в России заметно уступает высокоразвитым странам.

Большинство исследовательских томографов имеют значительные габариты: от 2 м³ и массой свыше 1000 кг. На сегодняшний день только компания Bruker micro-CT предлагает переносные настольные установки. Самый компактный том ографический сканер Skyscan 1174 является и самым недорогим, однако, его производительность ограничена. Ускоряющее напряжение трубки составляет 50 кВ, что не позволяет исследовать изделия размером больше 30 мм или 10 мм по стали.

Сканер с аналогичными массогабаритными характеристиками, но оснащенный источником рентгеновского излучения с более высокой энергией позволил бы исследовать крупные образцы и мог бы стать востребованным у потенциальных потребителей.

Производители не разглашают информацию, посвященную разработке систем PBT высокого разрешения, по совершенно очевидным причинам. Большая часть научной литературы посвящена вопросам применения PBT высокого разрешения для исследования различных объектов. Вопросы разработки остаются за рамками публикуемых работ. Таким образом, создание, настройка и исследование параметров систем PBT высокого разрешения является актуальной научной задачей.

Целью работы является оценка характеристик разрабатываемого рентгеновского томографа и проверка его пригодности для исследования широкого класса изделий, материалов и природных объектов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

провести анализ существующих томографических установок;

 обосновать выбор основных составляющих узлов для разрабатываемого томографа;

- создать алгоритмы и программу управления работой томографа;

разработать методику настройки и тестирования томографа;

теоретически и экспериментально оценить параметры томографа;

 – экспериментально подтвердить применимость установки для решения научных и практических задач.

Научная новизна работы

 Разработана методика и специализированное программное обеспечение для выбора параметров томографического сканирования при использовании установок с конической геометрией пучка.

2. Экспериментально оценено влияние основных факторов: размера, формы и дрейфа фокального пятна источника, пространственного разрешения детектора и фильтрации в процессе реконструкции на качество томографических изображений и функцию передачи модуляции исследовательских томографов с конической геометрией пучка.

3. Разработан томографический метод определения толщины покрытий и проведена его метрологическая проверка для тех случаев, когда плотность покрытия превышает плотность основного материала.

Практическая значимость работы

Разработана методика выбора режимов томографического сканирования, основанная на физических закономерностях взаимодействия излучения с веществом, геометрической оптике и специфике работы цифровых рентгеновских детекторов.

Разработана методика выявления и оценки источников ошибок и их влияния на конечное значение функции передачи модуляции томографической системы.

Проведена оценка характеристик разработанного рентгеновского томографа, предназначенного для контроля и исследования широкого класса изделий, материалов и природных объектов с пространственным разрешением от 100 мкм и меньше, при максимальном ускоряющем напряжении до 150 кВ. Экспериментально продемонстрирована возможность томографических исследований природных объектов на примере древесины и каменных углей, а также промышленных изделий и конструкционных материалов на примере углеродуглеродных композитов и карбидокремниевых покрытий. Результаты исследований соответствуют результатам, полученным на аналогичных томографических установках.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора параметров томографического сканирования.

2. Методика оценки основных параметров рентгеновских томографов высокого разрешения с конической геометрией пучка.

3. Томографический метод определения толщины покрытий.

4. Применение томографического метода для исследования внутренней структуры каменных углей.

5. Применение томографического метода для определения относительной плотности и размеров годичных колец древесины.

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается систематическим характером исследования, применением проверенных методик измерения, воспроизводимостью полученных результатов, использованием сертифицированного программного обеспечения.

Апробация

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД - 2015), Санкт-Петербург, 2015;

2. 9th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications (IRRMA 9), Valencia, 2014;

3. 5th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, 2014;

4. Международная дендрохронологическая конференция «РусДендро-2014», Иссык-Куль, Киргизия, 2014;

5. VI Международная научно-практическая конференция «Физикотехнические проблемы атомной энергетики и промышленности», Томск, 2014;

6. 8-я Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (ENVIROMIS-2014), Томск, 2014;

7. XX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2014;

8. XX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 2014;

9. X International Symposium Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-13), Erevan, Armenia, 2013;

10. II Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2013;

11. II Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле (SibTest 2013), Томск, 2013;

12. IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2013;

13. XXXXII Всероссийский симпозиум по механике и процессам управления, Миасс, 2012;

14. Первая всероссийская научная конференция «Практическая микротомография», Казань, 2012;

15. І Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 2012.

Личный вклад автора состоит в написании литературного обзора по теме диссертации, постановке задачи диссертации, проведении экспериментов, обработке полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций.

Публикации

Результаты работы опубликованы в 26 печатных работах, из которых 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК, 3 статьи индексируются базой данных Scopus, а также 15 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 6 приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 141 библиографическую ссылку. Общий объем диссертации составляет 148 страниц и включает 92 рисунка, 13 таблиц и 32 формулы.

Благодарности

Автор выражает благодарность коллегам по лаборатории: Капранову Б.И., Чахлову С.В., Осипову С.П., Темнику А.К., Удоду В.А. за помощь в работе над диссертацией. Коллегам Стучеброву С.Г., Ивашкову Д.В. за помощь в проведении экспериментов и публикации результатов, а также своим соавтора за работу над публикациями.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость и основные защищаемые положения.

В первой главе на основании литературного обзора проведена классификация существующих систем РВТ высокого разрешения по геометрической схеме сканирования, используемому источнику излучения и типу детектора. Приводится сравнение достоинств и недостатков различных схем сканирования. Анализируются конструктивные особенности рентгеновских аппаратов и перспективные разработки в этой области. Сравниваются и анализируются особенности, достоинства и недостатки цифровых детекторов рентгеновского излучения, выпускаемых с помощью ССD, ТFT и СМОЅ технологий. Исследован вопрос создания отечественных систем РВТ. Приводятся критерии выбора схем сканирования, источника излучения и типа детектора для создания переносного томографа высокого разрешения.

Вторая глава посвящена описанию устройства и порядку работы томографа TOLMI-150-10.

На основании критериев, описанных в первой главе, были выбраны следующие основные компоненты томографа:

1. микрофокусный рентгеновский аппарат РАП 150МН с вольфрамовой трансмиссионной мишенью с максимальным ускоряющим напряжением 150 кВ (Лаборатория ТСНК, г. Москва);

2. плоскопанельный детектор Remote RadEye 200 (Teledyne DALSA, CIIIA), изготовленный по CMOS-технологии и оснащенный сцинтиллятором из CsI;

3. система позиционирования и вращения объекта, состоящая из линейного и поворотного манипуляторов M-403.82S и M-061.PD (Physik Instrumente, Германия).

Все компоненты были смонтированы в корпусе, оснащенном радиационной защитой. Габаритные размеры созданного томографа составляют 900×390×300 мм, масса – около 100 кг. Внешний вид устройства и рабочей зоны показаны на рис. 1.





Рис. 1. Томограф ТОLМІ-150-10: *а* – внешний вид; *б* – компоновка рабочей зоны

Для управления томографом TOLMI-150-10 разработана специализированная программа uCT, предназначенная для:

1. проведения сервисных операций для отдельных компонентов системы, например, тренировки рентгеновского аппарата или инициализации системы позиционирования;

 настройки протокола сканирования, т.е. выбора режимов работы отдельных компонентов системы, геометрических параметров сканирования, путей сохранения результатов и др.;

 проведения сканирования согласно заданному протоколу, т.е. обеспечения согласованной работы всех компонентов системы, а также мониторинга процесса сканирования.

Интерфейс программы uCT (рис. 2) представляет собой диалоговое окно со сквозными элементами, доступными во всех вкладках программы, и вкладками: «Сбор данных», «Ренттен», «Приводы» и «Детектор». Указанные вкладки отвечают за процесс сканирования, управление рентгеновским аппаратом, управление системой позиционирования и настройку детектора.

🚰 uCT	\sim	×
Сбор данных 🛠 Рентген 🤽 Г Направление <u>то часовой т</u> Полный угол (1) <u>360</u> Чисто проекций <u>720</u> Шаг по углу (1) <u>0.5</u>	риводан — Детекток — Старт Настройка геометрии Сделано: Осталось:	500 0
✓ Автомалически вкл/зыклрентген ✓ Показывать в окне Файлы проекций Префикс и папка Е\CT-data\veatest0	Позиция стола 2 💌 мен файлов realtest	Авто Всё

Рис. 2. Интерфейс программы uCT, вкладка «Сбор данных». Выделены сквозные элементы интерфейса

Описывается логика выбора параметров сканирования. Геометрические параметры определяются размером объекта и требуемым пространственным увеличением. Основной результирующей характеристикой является размер вокселя – элемента с наименьшим объемом. Для определения этой характеристики была создана программа ScanPar на языке MATLAB, интерфейс которой приведен на рис. 3.



Рис. 3. Интерфейс программы ScanPar (версия 1.1)

Для корректной работы цифровых рентгеновских детекторов необходима калибровка, компенсирующая шумы электроники и нормирующая сигнал. Основным параметром системы детектирования томографа TOLMI-150-10, является время накопления одного кадра, для выбора которого необходимо определить диапазон линейности детектора (уровень сигнала пропорционален поглощенной энергии излучения). Экспериментально установлено, что детектор линеен до 2000 цифровых отсчетов.

Важным параметром детектора является отношение «сигнал-шум» (ОСШ), которое равно отношению среднего уровня сигнала к его стандартному отклонению. Экспериментально измерены значения времени накопления и ОСШ при различных режимах работы рентгеновского аппарата (табл. 1).

Алгоритм выбора параметров томографического сканирования приведен на рис. 4.

Напряжение, кВ	Ток мишени, мкА	Время накопления, с	OCIII
50	70	8,8	180
60	90	3,9	172
75	95	2,4	172
100	100	1,5	155
125	100	1,2	147
150	100	1,05	134

Таблица 1. Время накопления и наибольшие ОСШ детектора



Рис. 4 Алгоритм выбора параметров томографического сканирования

Третья глава посвящена анализу факторов, влияющих на качество реконструированных изображений, применительно к разработанному томографу TOLMI-150-10. Качество восстановления изображение в рентгеновской вычислительной томографии определяется:

- 1. размером фокального пятна трубки;
- 2. величиной дрейфа фокального пятна;
- 3. разрешающей способностью детектора;
- 4. функцией передачи модуляции (ФПМ) детектора;
- 5. линейностью отклика детектора;
- 6. величиной суммарной нерезкости теневых проекций;
- 7. влиянием ужесточения пучка рентгеновского излучения;

8. алгоритмами фильтрации исходных теневых проекций и конечных изображений;

9. точностью позиционирования.

Размер фокального пятна был определен в ортогональных направлениях по методикам, изложенным в стандартах BS EN 12543-5 и ASTM E2903-13. Методики основаны на оценке геометрической нерезкости на границе сильнопоглощающего объекта цилиндрической формы. В эксперименте использована вольфрамовая проволока диаметром 1 мм. Наиболее вероятное значение размера фокального пятна при различном ускоряющем напряжении составило 43 мкм. Установлено, что фокальное пятно имеет форму эллипса, размер и форма которого варьируется с изменением ускоряющего напряжения (рис. 5).



Рис. 5. Форма фокального пятна в зависимости от ускоряющего напряжения

Дрейф фокального пятна был определен по методу Хиллера. Было исследовано временное изменение теневых проекций тестового объекта (стальной шарик диаметром 2,4 мм) при большом геометрическом увеличении. Дрейф фокального пятна оценивался по смещению центра окружности, вписанной в проекцию, в ортогональных направлениях. Установлено, что величина дрейфа при ускоряющем напряжении 140 кВ не превышает 10% размера фокального пятна.

Определение пространственного разрешения рентгеновского детектора проводилось по методике, изложенной в стандарте ISO 17636-2 с применением дуплексного индикатора качества изображения, описанного в стандарте BS EN 462-5.

Размер пикселя детектора Remote RadEye 200 составляет 96 мкм. Установлено, что пространственное разрешение в горизонтальном направлении составляет 99 мкм, в вертикальном – 103 мкм. ФПМ детектора приведена на рис. 6. Базовое пространственное разрешение определяется на уровне модуляции 20%, аппроксимация производится полиномами второй степени.



Рис. 6. ФПМ и базовое пространственное разрешение детектора Remote RadEye 200

Для измеренного размера фокального пятна и пространственного разрешения детектора была установлена величина минимальной нерезкости проекционных изобр ажений. Для томографа TOLMI-150-10 это значение рано 78 мкм или 12,8 пар линий/мм при увеличении 2,8, что соответствует размеру пикселя 34,3 мкм.

ФПМ томографа определялась по методикам, изложенным в стандартах E1695, E1441 и E1570. В качестве тестового объекта использовался цилиндр из поликарбоната с гладкой ровной поверхностью и диаметром 25,4 мм. С помощью разработанной автором программы на реконструированном слое оценивались функции отклика границы, необходимые для оценки ФПМ.

Измерения проводились для двух различных значений геометрического увеличения. Дополнительно исследовалось влияние сглаживания, применения фильтров для устранения круговых артефактов и коррекции ужесточения пучка на итоговую функцию передачи модуляции (рис. 7).

Пространственное разрешение томографа определялось при значении модуляции (контраста) 10%. Основные результаты представлены в таблице 2.

Que ferrire and	Разрешение			
Особенности	пар линий/мм	МКМ		
Идеальный случай	9,5	53		
Реконструкция без фильтров	8	63		
с фильтром круговых артефактов	7,3	68		
со сглаживанием	3,5	143		
с фильтром круговых артефактов и сглаживанием	4,5	111		

Таблица 2. Пространственное разрешение TOLMI-150-10%



Рис. 7. ФПМ для различных фильтров на этапе реконструкции

На основании полученных экспериментальных данных, и взяв за основу существующую классификацию источников погрешностей, была предложена собственная классификация, которая более точно описывает разработанный томограф (табл. 3).

Таблица	3.	Классификация	источников	погрешностей	В	томографе	TOLMI-
150-10							

Радиационный класс					
Фокальное пятно	: размер, форма,	Спектр: наличие	Взаимодействие с		
дрейф, стабильность во времени, зави-		фильтров, тип ми-	веществом: ужесто-		
симость от тока ми	ишени и ускоряюще-	шени, поглощение	чение пучка, рассе-		
го напряжения		воздухом	яние		
	Механиче	ский класс			
Тепловое расши-	Точность и повто-	Вибрации	Биения и «прецес-		
рение	ряемость позицио-		сия» оси вращения		
	нирования манипу-				
	ляторами				
Детектирующий класс					
Коллимация сцин-	Конверсия сцинтил-	Пространственная	Дискретизация		
тиллятором	лятором	дискретизация	(АЦП)		
Программный класс					
Алгоритм рекон-	Фильтрация высо-	Коррекции: круго-	Дискретизация, вы-		
струкции	ких пространствен-	вых артефактов,	бор «КТ-окна»		
	ных частот	ужесточения пучка,			
		несоосности			

В четвертой главе приводятся примеры практического использования томографа TOLMI-150-10.

Исследование каменных углей

Значительный интерес представляет томографическое исследование каменных углей, отличающееся от традиционных методов меньшими трудозатратами при подготовке образцов и возможностью изучения образцов в объеме и без разрушения. Были исследованы образцы углей различных марок из Кузнецкого бассейна. Образцы исследовались в естественном состоянии и после обработки контрастирующим веществом для визуализации пор и трещин. Показано, что метод PBT позволяет установить взаимосвязи между объемной структурой угля и его характеристиками, определяющими безопасность проведения работ в угольных шахтах, – метаноемкость, склонность к самовозгоранию и пылеобразованию.

Два образца угля были отсканированы на томографе GE Phoenix v|tome|x s (производитель – General Electric), что позволило провести качественное сравнение томографических результатов с двух установок. На рис. 8 показаны результаты реконструкции близких сечений одного и того же образца.





б

Рис. 8. Реконструированные сечения угольного образца: a - TOLMI-150-10 (a); $\delta - \text{GE}$ Phoenix v|tome|x s

Измерение толщины покрытий

Метод РВТ позволяет проводить измерения толщины покрытия неразрушающим способом, что выгодно отличает его от измерений с помощью образцовсвидетелей, который используется сейчас. На томографе TOLMI-150-10 были исследованы стандартные образцы предприятия (СОП) (Уральский НИИ композиционных материалов – ОАО «УНИИКМ»), представляющие собой матрицу из углерод-углеродного волокна, покрытую карбидокремниевым составом. Плотность покрытия отличается от плотности матрицы, что позволяет идентифицировать покрытие на томографическом срезе и оценить толщину покрытия с помощью специализированных программ по профилю на томограмме в интересующей области (рис. 9).



Рис. 9. Профиль на томограмме для определения толщины покрытия

Разработана методика томографических измерений толщины покрытий на образцах с использованием алюминиевой фольги известной толщины в качестве эталона. Размер пикселя на томограммах составлял 19,2 мкм для всех образцов. Рассчитывалось среднее арифметическое число пикселей, соответствующих покрытию, по пяти профилям в пяти различных сечениях. Результаты измерений толщины эталонных покрытий и трех СОП представлены в табл. 4. Точность измерений составила 5 мкм для толщин покрытий от 40 мкм.

Ofregory	Толщина покрытия		
Ооразец	пикселей	МКМ	
СОП 0	0	0,0	
СОП 0, фольга 40 мкм	2,36	45,3	
СОП 0, фольга 98 мкм	5,22	100,3	
СОП 50	5,04	96,7	
СОП 100	8,19	157,2	

Таблица 4. Результат измерения толщины покрытий

Дендрохронологические исследования

Исследование годичных колец древесины (дендрохронология) проводится с начала XX века и является широко распространенным методом в ряде естественнонаучных дисциплин: экологии, климатологии, истории, археологии. В настоящее время рентгеновское излучение часто используется для определения плотности годичных колец (денситометрия). Стремительное развитие компьютерной томографии пробудило интерес специалистов к исследованиям применимости этого уникального метода для анализа структуры объектов, характерных для дендрохронологии. Приведены результаты исследования древесины образцов молодых растений трех распространенных в Западной Сибири пород: березы, осины и сосны. Исследования проводились на томографе TOLMI-150-10. Распределения плотности в поперечном сечении стволов исследованных пород сильно различаются. Наиболее четко выражены годичные кольца у сосны, в наименьшей степени – у березы, осина занимает промежуточное положение. На рис. 10 показаны профили годичных колец сосны и березы.



Рис. 10. Профили годичных колец: а – сосна; б – береза

Плотность древесины ниже плотности воды, поэтому наличие влаги в стволе влияет на результат томографии. Наиболее выражен указанный эффект для сосны. На рис. 11 приведены томограммы одного и того же образца с разным уровнем влажности: после спила и после длительной сушки в помещении. Светлые участки соответствуют областям с высоким уровнем влаги.





Рис. 11. Сечения соснового образца: а – после спила; б – после сушки

С помощью томографии была определена относительная плотность колец в кернах из сосны, произрастающей в районе Академгородка г. Томска. Керны были взяты с четырех сторон света на одной высоте. Затем данные о плотности древес ины за последние несколько лет, с 2006 по 2014 год, были сопоставлены с данными об интенсивности биологически активного ультрафиолетового излучения. Было установлено, что структура и плотность колец отличаются для разных сторон света. Однако для всех образцов существует корреляционная зависимость между дозами ультрафиолетового излучения и структурой плотности древесины.

Основные результаты работы

1. Сформулированы три основных критерия классификации исследовательских томографических систем: а) геометрическая схема сканирования, б) используемый источник излучения, в) тип применяемого детектора. 2. Обоснован выбор основных узлов переносного томографа. Источником служит рентгеновский аппарат с фокальным пятном диаметром до 50 мкм и мишенью трансмиссионного типа; детектор изготовлен по CMOS-технологии с размером пикселя 96 мкм и сцинтиллятором CsI; механический манипулятор обеспечивает линейное перемещение с точностью до 1 мкм и угловое перемещение с точностью до 0,001°.

3. Разработан алгоритм и программа для управления томографом, обеспечивающая настройку параметров сканирования и сбор исходной информации – теневых проекций.

4. На основании экспериментальных проверок определены основные характеристики TOLMI-150-10. Измерение функции передачи модуляции показало, что установка обеспечивает пространственное разрешение до 10 пар линий/мм при относительном контрасте 10%.

5. Экспериментально подтверждена применимость томографа TOLMI-150-10 для исследований промышленных изделий и объектов живой и неживой природы. Основные результаты практического применения таковы:

– TOLMI-150-10 демонстрирует пространственное разрешение и контрастную чувствительность на уровне лучших мировых образцов, например, томографа Phoenix v|tome|x s производства General Electric.

 Установлена качественная зависимость свойств угля от его внутренней структуры, а именно, слоистая структура характерна для самовозгорающихся углей и углей, склонных к пылеобразованию.

 Для исследованных пород углей системы пор и минеральных слоистых включений имеют облачную структуру, характеристики которой близки для различных пород.

 Метод рентгеновской вычислительной томографии позволяет проводить прямые измерения толщины покрытий от 50 до 500 мкм, нанесенных на матрицу из углеродного волокна, с точностью ±5 мкм.

 Влажность образцов из хвойных пород деревьев искажает распределение плотности. Для образцов из березы присутствие влаги не оказывает значимого влияния на точность распределения плотности.

 Доказана прямая значимая связь между значениями мощности дозы жесткого ультрафиолетового излучения и пространственно-временной структурой плотности хвойных пород древесины.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи

1. Batranin A.V. Study on the spatial structure of ultrafine-grained light alloys by microtomography / A.V. Batranin, V.A. Skripnyak, V.V. Skripnyak, S.V. Chakhlov, S.G. Stuchebrov, K.V. Keltsieva // Advanced Materials Research. - 2015 - Vol. 1084. - p. 54-57.

2. Batranin A.V. Performance evaluation of micro-CT scanners as visualization systems / A.V. Batranin, D.V. Ivashkov, S.G. Stuchebrov // Advanced Materials Research. - 2015 - Vol. 1084. - p. 694-697.

3. Stuchebrov S.G. Radiation burden decline to the objects in the X-ray investigation / S.G. Stuchebrov, A.V. Batranin, A.A. Krasnykh, I.A. Miloychikova, A.R. Vagner // Advanced Materials Research. – 2015 – Vol. 1084. – p. 698–701.

4. Stuchebrov S.G. Setups for tomographic imaging with submillimeter spatial resolution / S.G. Stuchebrov, A.V. Batranin, D.A. Verigin, A.R. Vagner // Journal of Physics: Conference Series. - 2014 - Vol. 517 - №. 1, Article number 012046. - p. 1-5.

5. Stuchebrov S.G. Estimation of radiation doses in X-ray visualization of biological objects / S.G. Stuchebrov, A.V. Batranin, D.A. Verigin, E.V. Lukjyanenko, M.A. Sinyagina, A.R. Vagner // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 880. – p. 53–56.

6. Стучебров С.Г. Установки-прототипы для томографической визуализации с субмиллиметровым пространственным разрешением / С.Г. Стучебров, А.В. Батранин, Е.В. Лукьяненко, М.А. Синягина // Известия вузов. Физика. - 2014 - Т. 57 - №. 2/2. - С. 78-82.

7. Ворошилов С.П. Исследование каменных углей с использованием рентгеновской томографии / С.П. Ворошилов, В.А. Клименов, Б.И. Капранов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов, Д.А. Трубицына, А.В. Батранин, Е.В. Мазаник // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – Т. 1.2. – С. 5–11.

8. Batranin A.V. Design of the X-ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation / A.V. Batranin, S.V. Chakhlov, D.V. Grinev, B.I. Kapranov, V.A. Klimenov // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. p. 3–10.

9. Клименов В.А. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции / В.А. Клименов, Ю.В. Алхимов, А.М. Штейн, С.В. Касьянов, С.А. Бабиков, А.В. Батранин, С.П. Осипов // Контроль. Диагностика. - 2013 - №. 13. - С. 31-42.

10. Осипов С.П. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям / С.П. Осипов, А.В. Батранин, В.С. Воронова, А.В. Шиндина // Технологии техносферной безопасности. – 2013 – № 5 (51). – С. 1–10.

Другие издания

1. Батранин А.В. Расчет геометрических параметров томографического сканирования (ScanPar). Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2016612800 (дата регистрации: 10.03.2016).

2. Батранин А.В. Расчет функции передачи модуляции рентгеновских томографических систем. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2016612690 (дата регистрации: 04.03.2016).

3. Чахлов С.В., Батранин А.В. Управление рентгеновским микротомографом ТОLMI–150–10 (иСТ). Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2015615768 (дата регистрации: 22.05.2015).

4. Смирнов С.В. Анализ воздействия биологически активного солнечного излучения на плотность годичных колец хвойных деревьев / Смирнов С.В., Батранин А.В., Бондаренко С.Л., Стучебров С.Г. // 8-я Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: сборник трудов, Томск, 28 Июня – 5 Июля 2014. – Томск: Томский ЦНТИ, 2014 – С. 109–111.

5. Ивашков Д.В. Исследование производительности томографических сканеров как систем визуализации / Ивашков Д.В., Батранин А.В. // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14–18 Апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – Т. 1 – С. 95–96.

6. Красных А.А. Разработка алгоритма калибровки томографических установок по индексам Хаунсфилда / Красных А.А., Батранин А.В., Стучебров С.Г. // Физикотехнические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, Томск, 5–7 Июня 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – С. 80.

7. Степаненко А.А. Исследование древесины методом объемной рентгеновской томографии высокого разрешения / Степаненко А.А., Батранин А.В., Стучебров С.Г. // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов VI Международной научно–практической конференции, Томск, 5–7 Июня 2014. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 91.

8. Stuchebrov S.G. X-ray computed tomography in dendrochronology studies / Stuchebrov S.G., Batranin A.V., Bondarenko S.L., Sapozhnikova V.A. // 9th International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications: Book of Abstracts, Valencia, July 6–11, 2014. – Valencia: Projectem Comunicacio (Violeta Martin Nunez), 2014 – p. 256.

9. Batranin A.V. Design and Development of the Bespoke X-ray Tomography System TOLMI-150-10: a Comparative Case Study / Batranin A.V., Chakhlov S.V., Grinev D.V., Kapranov B.I., Klimenov V.A. // 5th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, February 25–28, 2014. – Austria: University of Applied Sciences, 2014 – p. 243.

10. Бабиков С.А. Радиографические свойства цифровых матричных детекторов для контроля стальных и алюминиевых изделий / Бабиков С.А., Батранин А.В. // ХХ Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: доклады конференции, Москва, 3–6 Марта 2014. – Москва: Изд. дом "Спектр", 2014 – С. 158–159.

11. Батранин А.В. Разработка экспериментальных рентгеновских томографических установок / Батранин А.В., Капранов Б.И., Чахлов С.В. // ХХ Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: доклады конференции, Москва, 3–6 Марта 2014. – Москва: Изд. дом "Спектр", 2014. – С. 160–162.

12. Stuchebrov S.G. Setups for tomographic imaging with submillimetric spatial resolution / Stuchebrov S.G., Batranin A.V., Vagner A.R. // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS–13): Book of Abstracts of X International Symposium, Erevan, September 23–27, 2013. – Tomsk: TPU Publishing House, 2013 – p. 133.

13. Клименов В.А. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции / Клименов В.А., Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабиков С.А., Батранин А.В., Осипов С.П. // Инновации в неразрушающем контроле: сборник трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Томск, 12–17 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – С. 140–159.

14. Батранин А.В. Исследования трещиноватой и микропористой структуры каменных углей методом рентгеновской микротомографии / Батранин А.В., Капранов Б.И., Клименов В.А., Чахлов С.В., Ворошилов Я.С. // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16–18 Августа 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 18–26.

15. Ивашков Д.В. Практические аспекты применения рентгеновской томографии в неразрушающем контроле / Ивашков Д.В., Батранин А.В., Стучебров С.Г. // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов II Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых: в 4 т., Томск, 8–12 Октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – Т. 1 – С. 72–76.

16. Стучебров С.Г. Дозовые нагрузки при томографических и проекционных визуализациях на установках с субмиллиметровым пространственным разрешением / Стучебров С.Г., Батранин А.В., Вагнер А.Р. // IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 23–25 Октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 48.

17. Батранин А.В. Томографический метод эталонирования образцов толщины карбидокремниевого покрытия / Батранин А.В., Белкин Д.С., Капранов Б.И., Крёнинг Х.В., Чахлов С.В., Блинов В.М., Чечулин Е.Г., Чунаев В.Ю. // Механика и процессы управления: материалы XXXXII Всероссийского симпозиума, Миасс, 18–20 Декабря 2012. – СПб.: РАН, 2012 – Т. 1 – С. 38–46.

18. Батранин А.В. Возможности и перспективы рентгеновской томографии в науке и технике / Батранин А.В. // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: Сборник научных трудов I Всероссийской конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых: в 3 т., Томск, 8–11 Октября 2012. – Томск: ТПУ, 2012 – Т. 1 – С. 14–17.