

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
Кафедра физических методов и приборов контроля качества

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка методики выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer»

УДК 620.179.152.1:004.93

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БЗА	Кузнецова Ирина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий эксперт кафедры ФМПК	Капранов Борис Иванович	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Елена Александровна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Юлия Владимировна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Физических методов и приборов контроля качества	Суржигов Анатолий Петрович	Доктор физ.- мат. наук, профессор		

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10; ОК-3,9; ПК-2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11.12, 13, 14, 15, 16,17, 18), Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-7; ПК-8,9,10, 11, 12, 13-18) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества	Требования ФГОС (ОК-9, ОПК-3; ППК-14, 15, 16). Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОК-3,ОК-6, ОПК-2, 3,4, 5, 6, 7,8,9, ПК-1,2,9,14). Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6 ОПК-2, 3,4,5,6; ПК-1,2,3,4). Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-6,8,14,17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные компетенции</i>		
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-2, 4, 8, 9,10; ОПК-9) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение
Кафедра физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) _____
(Дата) Суржиков А.П.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1Б3А	Кузнецовой Ирине Сергеевне

Тема работы:

Разработка методики выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	От 30.11.2016 №10278/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект контроля – цилиндрическое изделие диаметром 60 см. Материал объекта контроля имеет пиротехнический состав.</p> <p>Источник излучения – изотоп Co^{60}. Энергия излучения – 1,25 МэВ.</p> <p>Анализируемые величины: площадь, периметр, круглость (эллипсность), пористость, ориентация, эксцентricность, наибольший и наименьший диаметры, средняя толщина.</p> <p>Программный пакет для морфометрического анализа – СТ-analyzer.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Аналитический обзор литературы, математическое моделирование радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта, обзор программного обеспечение SkyScan, сбор проекционных данных с помощью программы uCT, обзор программы CT-Analyzer, разработка методики выполнения операций параметров объекта контроля на базе пакета «CT-Analyzer».</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графическое представление материала – PowerPoint.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Грахова Елена Александровна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Анищенко Юлия Владимировна</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>19.09.2016</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Ведущий эксперт кафедры ФМПК</p>	<p>Капранов Борис Иванович</p>	<p>д.т.н., профессор</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>1Б3А</p>	<p>Кузнецова Ирина Сергеевна</p>		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 97 с., 50 рис., 21 табл., 20 источников, 1 прил.

Ключевые слова: компьютерная томография, методика, морфометрический анализ, ослабление излучения.

Объектом исследования является методика выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer».

Цель работы – разработка методики выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer», моделирование радоновских сумм.

В процессе исследования проводились:

- анализ сечений взаимодействия γ -квантов изотопа Co^{60} с материалом пиротехнических изделий;
- анализ закономерностей прохождения излучения от изотопа Co^{60} через изделия диаметром до 60 см;
- изучение процесса сбора проекционных данных;
- изучение программного пакета «СТ-analyzer»;
- анализ последовательности выполнения операций морфометрических измерений реконструированных изображений.

В результате исследования разработана методика выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer», программа моделирования радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта диаметром до 60 см.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики:

- сканер: TOLMI 150-10;
- источник излучения: РАП-150МН;
- детектор-матрица: 1024*760 пикселей;
- размер пиксела: 136x135 мкм;
- расстояние объект–источник: 164 мм;
- расстояние источник-детектор: 328 мм;
- разрядность данных: 16 бит;
- траектория сканирования: круговая;
- диапазон реконструированных сечений: 120-795;
- шаг сечений: 10 мкм;
- фильтр для фильтрации проекций: Гауссиан;
- программа морфометрического анализа: СТ-analyzer.

Степень внедрения: в настоящий момент согласовывается техническое задание и контракт на разработку томографа ТРД-30 РМ.

Область применения: томография промышленных изделий.

Экономическая эффективность/значимость работы

В будущем планируется результаты работы будут использованы для разработки комплекта программного обеспечения для томографического дефектоскопа ТРД-30РМ.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Артефакт: детали на изображении, не соответствующие каким-либо реальным структурам изображаемого объекта. В КТ артефакты могут появляться в виде ложных структур (например, артефакты наложения, артефакты движения и артефакты частичного заполнения) либо в виде искаженных КТ-чисел.

Единица Хаунсфилда (HU): единица шкалы КТ-чисел. Единица Хаунсфилда характеризует отношение измеренного линейного коэффициента ослабления к коэффициенту ослабления вода, умноженное на 1000.

Компьютерная томография (КТ): метод послойной диагностики организма, основанный на рентгеновском.

Методика: алгоритм, позволяющий среднеодарённому пользователю существенно повысить вероятность решения определенного класса задач, в отсутствие автора методики.

Область интереса (ROI): подмножество пикселей, составляющих область произвольной (круглой, прямоугольной и т.п.) формы, выбранной на двумерном изображении

Ослабление: снижение интенсивности рентгеновских лучей при прохождении через вещество; степень ослабления выражается количественно через линейный коэффициент ослабления.

Оглавление

Введение.....	9
1. Обзор литературы.....	10
1.1 История создания и развития рентгеновской компьютерной томографии	10
1.2 Этапы развития компьютерной томографии.....	11
1.3 Источники рентгеновского излучения.....	13
1.3.1. Рентгеновские аппараты.....	14
1.3.2. Синхротронное излучение	15
1.4 Детекторы.....	17
1.4.1 Ксеноновые детекторы	19
1.4.2 Сцинтилляционные детекторы	20
1.5 Взаимодействие гамма-квантов с веществом	21
1.5.1 Фотоэлектрическое поглощение.....	23
1.5.2 Комптоновское рассеяние.....	24
1.5.3 Образование пар	26
1.6 Шкала Хаунсфилда	27
1.6.1 Понятие «окна» в КТ.....	29
1.6.2 КТ-числа, стабильность и контрастность	29
2. Математическое моделирование радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта	31
3. Обзор программного обеспечения SkyScan	39
3.1 Сбор проекционных данных с помощью программы uCT	39
3.2 Краткая обобщенная инструкция программы «СТ-Analyser».....	46
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	70
Заключение	84
Список публикаций студента.....	85
Приложение А	86

Введение

Целью работы является разработка методики выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer».

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- анализ сечений взаимодействия γ -квантов изотопа Co^{60} с материалом пиротехнических изделий;
- анализ закономерностей прохождения излучения от изотопа Co^{60} через изделия диаметром до 60 см;
- изучение процесса сбора проекционных данных;
- изучение программного пакета «СТ-analyzer»;
- анализ последовательности выполнения операций морфометрических измерений реконструированных изображений.

В отличие от рентгеновской дефектоскопии, с помощью которой только устанавливается наличие дефекта и его вид, рентгеновская компьютерная томография позволяет также определить ориентацию дефекта, его геометрическую форму и размеры.

1. Обзор литературы

1.1 История создания и развития рентгеновской компьютерной томографии

При проведении обычной рентгенографии объекта, изображения его внутренней структуры накладываются друг на друга. Для того чтобы преодолеть этот недостаток, возникла идея проводить диагностику не по одному, а по нескольким рентгеновским снимкам, выполненным под разными ракурсами. Путём специальной математической обработки по такому набору данных можно оценить распределение коэффициента ослабления рентгеновского излучения (а по нему – распределение плотности) внутри объекта.

Компьютерная томография стала возможной лишь с появлением современных вычислительных машин в начале 60-х годов, но отдельные идеи, лежащие в ее основе, восходят к началу прошлого века. В 1917 г. математик Дж. Х. Радон в своей работе привел фундаментальное доказательство возможности вычисления распределения материала или параметра в плоскость объекта по произвольному числу интегральных значений этого параметра, измеренных вдоль прямых, пересекающих объект в той же плоскости. Первые эксперименты по применению томографии с реконструкцией были выполнены физиком А. Кормаком, который разработал метод расчета поглощенной объектом дозы излучения на основе измерений пропускания излучения. В 1972-1973 годах инженер Г. Н. Хаунсфилд, общепризнанный изобретатель компьютерной томографии, разработал первую томографическую систему – сканер головного мозга. Сканер позволял получать изображения размером пикселей с размером 80x80 пикселей с разрешением 3 мм. Данные, которые требовались для получения одного изображения, измерялись примерно в течение четырёх с половиной минут. Такое высокое время регистрации, среди прочих причин, было обусловлено конструкцией первых томографов. В них имелась одна остронаправленная рентгеновская трубка и один детектор, которые

синхронно передвигались вдоль рамы. Измерения обычно проводились в 160-180 положениях трубки, затем рама поворачивалась на угол в 1 градус и измерения повторялись [1].

Рентгеновская компьютерная томография впервые вывела на первый план послойные методы получения изображений, благодаря чему они получили широкое распространение. КТ пришла на смену, стала существенным дополнением классической рентгенографии в большинстве областей лучевой диагностики.

1.2 Этапы развития компьютерной томографии

Технические задачи разработки компьютерных томографов постоянно изменялись в соответствии с уровнем развития техники и актуальными потребностями радиологии. С самого начала развития КТ большое внимание уделялось повышению качества изображения, снижению стоимости и совершенствованию пользовательского интерфейса, однако основные усилия разработчиков были направлены на то, чтобы свести к минимуму не только время получения отдельного изображения, но и продолжительность исследования в целом.

Разработка компьютерных томографов началась с экспериментальной установки Хаунсфилда, принципиальная схема которой во многом совпадала с представленной на рис. 1. Устройства такого типа называют томографами первого поколения.

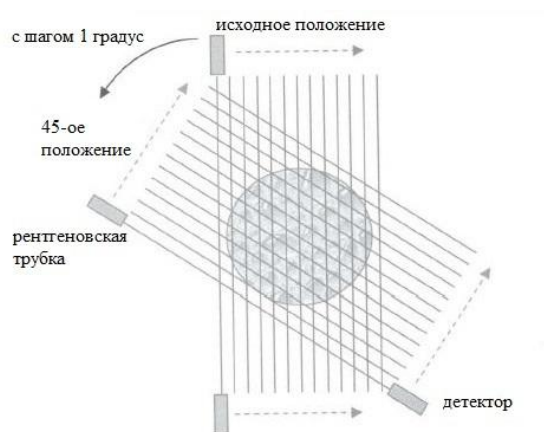


Рисунок 1 – Первое поколение КТ: перемещение/вращение

В томографах второго поколения (рис. 2) использовалась практически та же схема выполнения томограмм. Для повышения скорости исследования были установлены дополнительные детекторы, что дало возможность использовать вместо узкого луча тонкий веерный пучок рентгеновского излучения. Томограф работал, чередуя повороты и линейные перемещения: источник излучения и детектор смещались вдоль исследуемого объекта, затем совершали поворот, после чего эта последовательность повторялась.

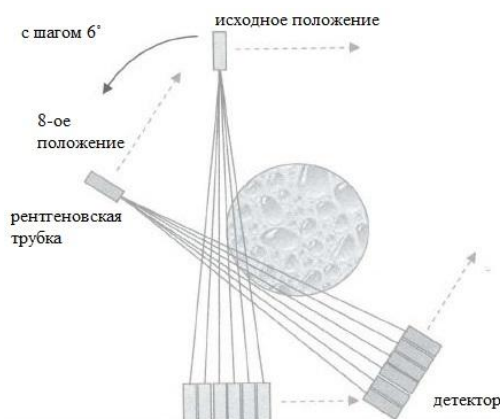


Рисунок 2 – Второе поколение КТ: перемещение/вращение

В томографах третьего поколения (рис. 3) используется достаточно широкий веерный пучок в сочетании с дуговым детектором, что позволяет выполнять измерение для всех точек проекции одновременно. В новых системах источник и детектор совершают только вращательное движение. Скорость исследования на один срез составила 20 с, качество изображений повысилось, стоимость компонентов снизилась.

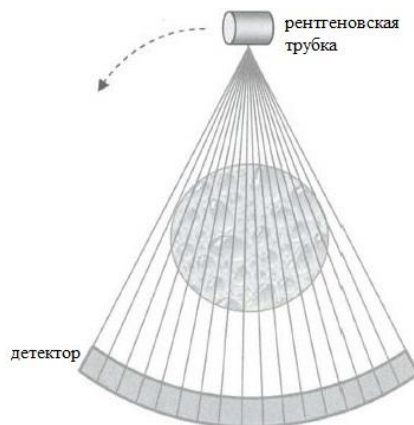


Рисунок 3 – Третье поколение КТ: постоянное вращение

Томографы четвертого поколения (рис. 4) – системы с неподвижными детекторами в форме кольца, вокруг объекта вращалась только рентгеновская трубка.

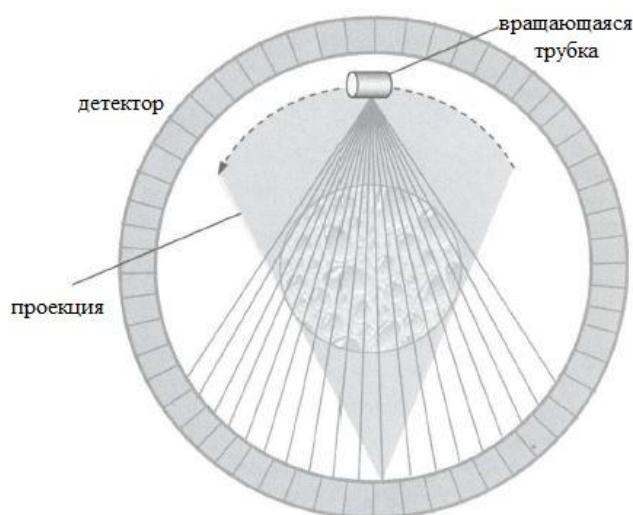


Рисунок 4 – Четвертое поколение КТ: постоянное вращение

В V поколении компьютерных томографов сканирование проводят лучом, управляемым электронной схемой; в этих томографах движущихся элементов нет вообще, однако нужны большие вакуумные трубки для формирования и управления лучом.

1.3 Источники рентгеновского излучения

В современных томографических установках чаще всего используются рентгеновские аппараты различных типов и конструкции, которые будут рассмотрены ниже. Томографические системы, использующие синхротронное излучение в рентгеновском диапазоне, сооружаются зачастую на большинстве существующих синхротронных ускорителях. В последнее время все чаще используются высокоэнергетические источники тормозного рентгеновского излучения: линейные ускорители и бетатроны.

1.3.1. Рентгеновские аппараты

Рентгеновская трубка является важнейшим элементом рентгеновского аппарата. Еще со времен проведения опытов Вильгельма Рентгена конструктивный принцип рентгеновских трубок остался практически неизменным: вакуумный прибор с катодом, эмитирующим электроны и анод-мишень, служащий источником тормозного рентгеновского излучения. Благодаря разности потенциалов между анодом и катодом происходит ускорение электронов. Высоковольтный генератор, как правило, служит источником электрической энергии. Все многообразие существующих рентгеновских аппаратов является собой ряд технических решений для улучшения эксплуатационных характеристик этих устройств.

Основные характеристики трубок, значимые для томографии:

1) Максимальное ускоряющее напряжение и диапазон его регулирования. Чем выше максимальное напряжение и шире диапазон регулирования, тем шире область применения прибора.

2) Сила тока анода. Чем выше фактическое значение тока анода, тем выше доза рентгеновского излучения.

3) Размер фокального пятна. Электронный пучок фокусируется магнитным полем, затем бомбардирует мишень. Малое фокальное пятно дает более резкое изображение на детекторе.

4) Стабильность фокального пятна. В процессе разогрева мишени точка фокусировки меняет свое физическое положение – так называемый дрейф фокального пятна. Значительные смещения от первоначальной позиции приводят к сильной потере резкости томографических изображений.

5) Расстояние от фокального пятна на мишени до выходного окна трубки. Чем меньше это расстояние, тем более эффективно можно использовать проекционное увеличение, повышая пространственное разрешение томографической установки [2].

Рентгеновские аппараты имеют достаточно разнообразные конструкции, исполнение которых определяется кругом решаемых задач. Для

томографии применяются несколько типов устройств. Они делятся на открытые (обслуживаемые) и закрытые (необслуживаемые). По виду мишени они подразделяются на трансмиссионные и отражающие. Комбинируя эти параметры, можно получить четыре основных типа рентгеновских аппаратов:

- 1) открытые, с трансмиссионной мишенью;
- 2) открытые, с отражающей мишенью;
- 3) закрытые, с трансмиссионной мишенью;
- 4) закрытые, с отражающей мишенью.

Аппараты открытого типа требуют периодической замены расходных узлов, что влечет дополнительные затраты в процессе эксплуатации. Однако производители уверяют, что аппараты имеют практически неограниченный ресурс при надлежащем порядке обслуживания.

Аппараты закрытого типа не требуют замены элементов: нитей накала, мишеней, контактных пар и т.д. в процессе эксплуатации. Это облегчает работу с ними в составе томографических установок. С другой стороны, деградация основных характеристик неизбежна, поэтому через некоторое время аппарат подлежит полной замене [3, 4].

1.3.2. Синхротронное излучение

Синхротронное излучение (СИ) – это электромагнитное излучение, которое испускается заряженными частицами, движущимися по круговым орбитам с ультрарелятивистскими скоростями. Со времени его открытия в 1946 г. возможности практического применения СИ непрерывно расширялись. В 80-х годах XX века были получены первые удачные опыты использования СИ в томографии.

В настоящее время в качестве источников СИ используются накопительные кольца (рис. 5).

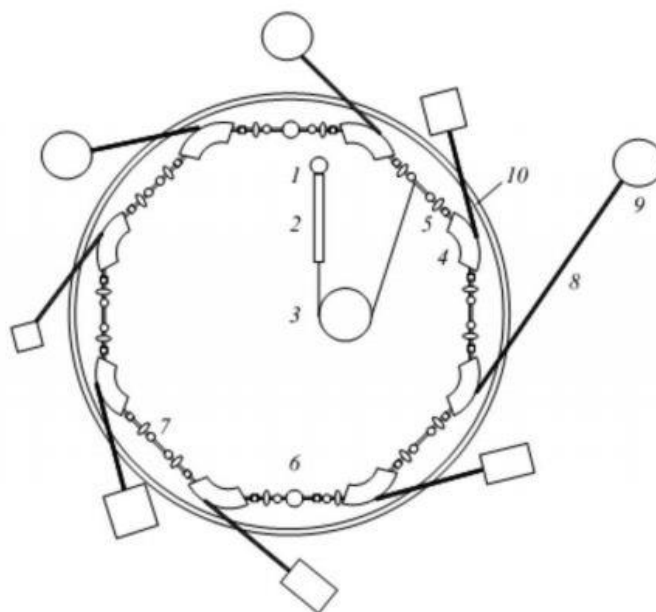


Рисунок 5 – Схема накопительного кольца:

1 – электронная пушка, 2 – линейный ускоритель, 3 – кольцевой ускоритель, 4 – поворотные магниты, 5 – магнитные линзы, 6 – резонаторы, 7 – линейные участки, 8 – вакуумные каналы, 9 – экспериментальные камеры, 10 – биологическая защита

В настоящее время для проведения томографических исследований в рентгеновском диапазоне многие источники СИ оснащаются экспериментальными камерами. Томография в качестве источника рентгеновского излучения, использующая СИ, сложилась как интенсивно развивающееся, самостоятельное направление. Популярность этого подхода обусловлена, уникальностью свойств самого СИ, которые существенно отличают его от тормозного излучения, полученного на аппаратах, бетатронах или линейных ускорителях.

Преимущества СИ как источника таковы с точки зрения практического применения:

1. высокая интенсивность излучения, которая на несколько порядков превосходит самые мощные рентгеновские аппараты;

2. широкий непрерывный спектр в рентгеновском диапазоне от 1 кэВ до 250 кэВ;

3. малая угловая расходимость излучения;

4. когерентность излучения. Свойства СИ приводят к некоторым практически значимым приложениям. Так, высокая светимость позволяет сократить время сканирования до нескольких секунд и даже меньше, что делает возможным исследование быстропротекающих процессов в материалах и живых организмах. Использование «белого» спектра СИ дает приемлемое отношение «сигнал-шум» при быстром сканировании [5, 6].

Для получения узких спектров необходимых длин волн широко используется применение монохроматоров. Большая светимость СИ компенсирует колоссальные потери дозы при монохроматизации излучения. Так, сравнивая полихроматическое излучение и монохроматическое, более предпочтительным является последнее с точки зрения снижения артефактов при математической реконструкции. Кроме того, использование мягкого (до 10 кэВ) спектра при исследовании слабопоглощающих объектов позволяет существенно улучшить контрастную чувствительность.

Для томографии часто используется параллельная схема сканирования, в силу малой расходимости СИ. Рентгеновская оптика позволяет фокусировать первоначально параллельный пучок, что дает возможность применения конического пучка. Данный способ позволяет увеличить пространственное разрешения [7].

Таким образом, СИ является удобным источником излучения для томографических систем. Однако у такого излучения существует один существенный недостаток – ограниченная доступность. Имеется и ряд других причин ввиду которых СИ не подходит для решения многих промышленных задач: слишком крупные габариты объектов исследований и их высокая рентгеновская плотность.

1.4 Детекторы

Детектор, являющийся устройством для количественной регистрации ионизирующего излучения, относится к наиболее важным и сложным

компонентам компьютерного томографа. Детектор преобразует падающее на него рентгеновское излучение в электрический сигнал, усиливает его и переводит из аналоговой формы в цифровую. Ключевыми компонентами детектора являются определенным образом ориентированные чувствительные элементы, предусилители и аналогово-цифровые преобразователи. Основное требование, предъявляемое к электронным компонентам – уровень генерируемых этими компонентами помех должен быть существенно ниже, чем случайные вариации регистрируемой интенсивности излучения, возникающие из-за квантового шума. Имеются и другие требования к детекторным системам.

Из множества предложенных и разработанных моделей и систем в КТ нашли широкое применение детекторы следующих типов:

- ионизационные камеры, заполненные инертным газом (обычно ксеноном) под высоким давлением;
- сцинтилляционные детекторы в виде кристаллов солей (йодида цезия, вольфрамата кадмия) или керамических материалов (оксисульфид гадолиния) [8].

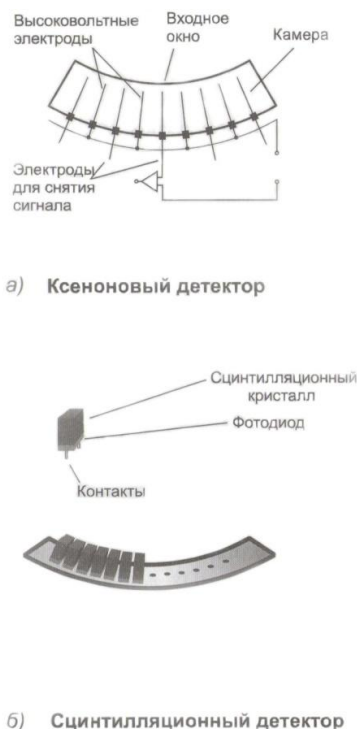


Рисунок 6 – Основные типы детекторов

1.4.1 Ксеноновые детекторы

Ксеноновая ионизированная камера обладает рядом преимуществ: простотой конфигурации и одинаковой чувствительностью отдельных элементов в силу одинакового давления газа во всей детекторной системе, быстротой отклика и затухания сигнала, а также низким послесвечением.

Недостатком ксеноновых детекторов по сравнению с твердотельными считается низкая квантовая эффективность, однако из этого не следует, что сцинтилляционные детекторы превосходят ксеноновые по всем параметрам. Оценка общей эффективности детектора не сводится к квантовой эффективности поглощения и требует учета ряда дополнительных факторов. Большое значение также имеет геометрическая эффективность, определяемая в основном мертвым пространством между отдельными элементами детектора. Для элементов детектора шириной 1 – 2 мм оно обычно составляет 0,1 – 0,2 мм в направлении распространения пучка. Характеристики ксеноновых детекторов сильно зависят от их конструкции.

Качество изображений и частота появления артефактов регистрации являются факторами, которые определяют возможность обнаружения структур с низкой контрастностью, а также прямо или косвенно влияют на характерную для всей системы эффективность использования дозы. В этом отношении ксеноновые детекторы обладают преимуществами равномерного распределения газа и, как следствие, равномерного отклика детектора. Тем не менее при высоких скоростях сканирования, характерных для современных томографов, ксеноновые детекторы утратили свои ведущие позиции.

Другой недостаток ксеноновых детекторов заключается в сложности производства многорядных детекторных систем такого типа. По этой причине многорядные детекторы создаются на основе керамических или сцинтиллирующих кристаллических материалов [9].

1.4.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционные детекторы на базе неорганических монокристаллов являются классическими детекторами, которые используются при регистрации гамма и рентгеновского излучения. Гамма-спектрометрия низких энергий до 3 МэВ и прикладные радиометрические измерения – основная область применения этих кристаллов. Базовыми детекторами, используемыми для решения прикладных задач, являются монокристаллы NaI(Tl) и CsI(Tl), не смотря на появление новых перспективных сцинтиллирующих материалов [10].

Органические сцинтилляторы обычно состоят из двух, трёхкомпонентных смесей. За счёт потери энергии налетающими частицами происходит возбуждение первичных центров флуоресценции. В ультрафиолетовом диапазоне длин волн при распаде этих возбуждённых состояний излучается свет. Длина поглощения этого ультрафиолета, однако, весьма мала: центры флуоресценции непрозрачны для их собственного излученного света. Вывод света осуществляется добавлением к сцинтиллятору второго компонента, поглощающего первично излученный свет и переизлучающего его изотропно с большими длинами волн. Две активных компоненты в органических сцинтилляторах или растворяются в органической жидкости или смешиваются с органическим материалом так, чтобы образовать полимерную структуру. При такой технологии можно производить жидкий или пластиковый сцинтиллятор любой геометрической формы.

Органические сцинтилляторы имеют гораздо меньшие времена высвечивания (порядка единиц – десятков наносекунд) и меньший световыход, по сравнению с неорганическими [11].

Поскольку обратное рассеяние от поверхности органического сцинтиллятора существенно меньше, чем от детектора с большим атомным номером, такие сцинтилляторы широко используют для детектирования и спектрометрии гамма – излучения. Для этой цели чаще всего применяют

пластические сцинтилляторы с геометрией, обеспечивающей уменьшение эффекта обратного рассеяния. Органические сцинтилляторы чаще всего представлены полиморфным состоянием стирола, винилтолуола, винилсилола, метилметакрилата, химически чистого соляра и т.п., с различными люминесцентными добавками – паратерфенила, бензола, дифенилоксазола, оксазола, и т. д. [12].

1.5 Взаимодействие гамма-квантов с веществом

По мере проникновения рентгеновского излучения вглубь объекта первичный пучок излучения ослабляется, и это ослабление носит экспоненциальный характер.

Закон ослабления излучения в веществе описывается уравнением (1)

$$\frac{dI(l, E)}{dl} + \mu(l, E)I(l, E) = 0, \quad (1)$$

где: E – энергия γ -квантов;

l – координата точки на луче;

$I(l, E)$ – интенсивность излучения, регистрируемое детектором;

μ – линейный коэффициент ослабления для материала контролируемого изделия.

Энергия излучения E рассматривается как параметр. Детектор находится на луче в точке $l=b$. Интенсивность источника $I_0(E)$, расположенного в точке $l=a$ является граничным условием для уравнения (1).

Интегрируя его с этими условиями, получаем:

$$I(l, E) = I_0(E)e^{-\int_a^l \mu(l, E) dl}, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность источника излучения.

Выражение (2), взятое при $l=b$, представляет собой интенсивность излучения для энергии E , в месте расположения детектора. Любой детектор измеряет данные в пределах некоторой полосы энергий, причём его чувствительность в зависимости от энергии, как правило, непостоянна. С

другой стороны, источники рентгеновского излучения, в частности, рентгеновские трубки, не являются монохроматическими. Поэтому в процессе регистрации происходит интегрирование интенсивности по энергиям, и показание детектора f выражается следующим образом:

$$f \equiv \int_{J(E)} J(E) I_0(E) e^{-\int_a^b \mu(l,E) dl} dE. \quad (3)$$

Здесь $J(E)$ – чувствительность детектора, интегрирование производится по области, где $J(E)$ отлична от нуля.

Как правило, коэффициент ослабления тем выше, чем меньше энергия зондирующего излучения. В случае если источник не монохроматический, это приводит к тому, что спектральный состав излучения при прохождении через объект изменяется: оно становится более жёстким. Этот эффект в томографии называется *hardness*. Явление *hardness* может существенно исказить результаты реконструкции, особенно тогда, когда диагностируемый участок содержит элементы, сильно различающиеся по своим свойствам.

Предположим, что источник излучения является монохроматическим: $I_0(E) = I_0 \delta(E - E_0)$, а чувствительность детектора на энергии E_0 равна единице. Обозначим $\mu(l, E_0)$ через $\mu(l)$. Тогда из (3) получаем:

$$I = I_0 e^{-\int_a^b \mu(l) dl}. \quad (4)$$

Уравнение (4) является основной математической моделью для рентгеновской томографии, а также для ряда других томографических методов. Поделив (4) на I_0 и прологарифмировав, имеем

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \equiv f \equiv \int_a^b \mu(l) dl. \quad (5)$$

Левая часть (5) предполагается известной, таким образом, мы приходим к уравнению, связывающему проекционные данные с искомой функцией через интеграл вдоль отрезка прямой линии [13].

В этом уравнении $\mu(l)$ – линейный коэффициент ослабления излучения в точке l на луче. Ослабление интенсивности потока γ -квантов происходит за счет следующих физических процессов взаимодействия.

1.5.1 Фотоэлектрическое поглощение

Процесс фотоэлектрического поглощения преобладает при сравнительно малых энергиях γ -квантов и больших атомных номерах вещества поглотителя.

Квант, взаимодействуя с одним из электронов оболочки атомов (обычно это происходит на K -оболочке), полностью передает ему свою энергию, после чего выбивает его из атома. Вместе с тем электрон либо переходит на более высокий уровень, либо покидает атом, если квант полностью превосходит энергию связи электрона в атоме. Вылетающий электрон обладает кинетической энергией, которая равна разности энергии кванта и энергии связи электрона в атоме. В том случае, если энергия квантов и энергия связи электронов будут равны на определенной оболочке K , L и т.д., будет наблюдаться скачок, резкое увеличение коэффициента поглощения.

Сечение фотоэффекта убывает с ростом энергии квантов. При энергиях, меньших 0,2 МэВ, оно убывает приблизительно по закону $1/E^3$, а в области энергий, больших 0,5 МэВ, по закону $1/E$.

С увеличением атомного номера Z сечение фотоэффекта увеличивается приблизительно пропорционально Z^n , где n в зависимости от энергии квантов изменяется в пределах от 4 до 5. Этот процесс является основным при поглощении квантов с энергией меньше 0,3 – 0,5 МэВ.

Фотоэлектрический эффект сопровождается появлением характеристического излучения, энергия квантов при этом доходит до нескольких десятков килоэлектронвольт. При потере электрона освобождаются места в электронных оболочках атома, которые в дальнейшем заполняются электронами с внешних оболочек.

Вероятность взаимодействия зависит от атомного номера вещества и энергии квантов. Для излучения с низкой энергией квантов и для тяжелых элементов фотоэлектрический эффект преобладает над другими видами взаимодействия.

Величина, характеризующая относительное уменьшение потока излучения веществом, обусловленное фотоэлектрическим поглощением на единице пути, называется линейным коэффициентом поглощения τ и измеряется в см^{-1} . Кроме линейного коэффициента в расчетах применяется так же массовый коэффициент τ_p ($\text{см}^2/\text{г}$), где ρ – плотность вещества. Массовый коэффициент τ_p представляет собой относительное уменьшение интенсивности потока излучения в результате фотоэлектрического поглощения после прохождения слоя вещества с единичной поверхностной плотностью.

Коэффициент фотоэлектрического поглощения уменьшается с повышением энергии излучения и резко возрастает с увеличением атомного номера вещества.

Для материалов с малым атомным номером фотоэлектрическим поглощением практически можно пренебречь, начиная с энергии излучения 150 кэВ, а для свинца – с 2 МэВ.

1.5.2 Комптоновское рассеяние

Рассеяние γ -квантов – процесс, при котором ослабление интенсивности излучения происходит в результате отклонения квантов при столкновениях с электронами атомов поглощающего материала. Рассеяние квантов может происходить с изменением их длины волны и энергии или без изменения.

Комптоновское рассеяние – рассеяние квантов, при котором изменяется как направление распространения квантов, так и энергия, часть которой передается электрону (комpton-эффект). Комpton-эффект – основной процесс ослабления излучения, начиная с энергии квантов,

превышающей энергию связи электронов в атоме на К-оболочке – крайней полосы фотоэлектрического поглощения, и до энергий квантов 3 – 5 МэВ.

Взаимодействие γ -кванта с электроном атома носит характер упругого центрального соударения, если энергия падающего γ -кванта намного превышает энергию связи электрона в атоме. При таком взаимодействии квант отклоняется от своего первоначального направления на некоторый угол, так как передает часть своей энергии электрону, который начинает двигаться под углом к направлению движения γ -кванта. В результате комптон-эффекта появляется γ -квант с меньшей энергией и большей длиной волны, изменивший первоначальное направление, и электрон отдачи, вырванный из атома и получивший часть энергии кванта.

Из закона сохранения энергии и импульса следует связь между энергией γ -квантов до и после рассеяния и углом θ_s :

$$E(E_0, \theta_s) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta_s)}, \quad (6)$$

где $m_0 c^2 = 0,511$ МэВ – энергия покоя электрона.

Энергия рассеянных квантов убывает с ростом угла рассеяния и достигает наименьшего значения при $\theta_s = \pi$, т.е. при обратном рассеянии. Следует отметить, что в последнем случае энергия E слабо зависит от энергии первичного фотона E_0 : в области энергий $0,511 \text{ МэВ} < E_0 < \infty$ пределы изменения E лежат в интервале $0,17 \text{ МэВ} - 0,25 \text{ МэВ}$. Кванты же, обладающие малой энергией ($E_0 \ll 0,511 \text{ МэВ}$), при рассеянии почти не меняют своей энергии.

Угол рассеяния кванта θ_s принимает значение от 0 до π , в то время как угол вылета комптоновского электрона не превышает $\pi/2$.

Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения определяется формулой Клейна-Нишины-Тамма [14]:

$$I_{\theta s} = I_0 \frac{3\sigma_0}{16\pi r^2} \frac{1 + \cos^2 \theta_s}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta_s)]^3} \left\{ 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta_s)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta_s)](1 + \cos^2 \theta_s)} \right\}, \quad (7)$$

где $\sigma_0 = 6,57 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$; r – расстояние до рассеивающего электрона, см;

$$\alpha = \frac{E_0}{m_0 c^2} = \frac{E_0 (\text{МэВ})}{0,511 (\text{МэВ})}.$$

С ростом энергии первичного излучения сечение комptonовского рассеяния убывает приблизительно по закону $1/E_0$. Так как вероятность рассеяния зависит от плотности электронов в веществе поглотителя, макроскопическое сечение пропорционально $\frac{\rho N_0}{M} Z$, где ρ – плотность, N_0 – число Авогадро, а M – молекулярный вес вещества.

Величина, характеризующая относительное уменьшение потока излучения за счет процесса комptonовского рассеяния на единице пути, называется линейным коэффициентом комptonовского рассеяния σ (см^{-1}). Линейный коэффициент комptonовского рассеяния тем больше, чем больше электронов в слое, так как в этом случае большая доля рентгеновских γ -фотонов испытывает рассеяние.

Массовый коэффициент комptonовского рассеяния σ_ρ ($\text{см}^2/\text{г}$) характеризует относительное уменьшение потока рентгеновского или γ -излучения за счет комptonовского рассеяния при прохождении через слой вещества с единичной поверхностной плотностью.

С повышением энергии излучения коэффициент комptonовского рассеяния уменьшается в меньшей степени, чем коэффициент фотоэлектрического поглощения, и играет существенную роль вплоть до энергии порядка нескольких МэВ.

1.5.3 Образование пар

В результате процесса поглощения фотонов высокой энергии в электрическом поле ядра фотон преобразуется в электрон и позитрон. Причем поглощение фотонов за счет образования пар возможно лишь при энергии фотонов выше 1,022 МэВ, так как электрон и позитрон имеют массу, неравную нулю и на образование этой массы требуется определенная

энергия. При создании электрон-позитронной пары избыток энергии фотона превращается в кинетическую энергию электрона и позитрона.

Избыток энергии фотона при создании электрон-позитронной пары превращается в кинетическую энергию электрона и позитрона.

Сечение образования пар медленно возрастает в интервале $E_0 = 1,022 - 4,0$ МэВ, а затем с ростом энергии E_0 возрастает примерно пропорционально $\ln E_0$.

С ростом атомного номера Z вещества поглотителя сечения образования пар возрастает пропорционально Z^2 .

Образовавшиеся электрон и позитрон в процессе прохождения через вещество могут аннигилировать с испусканием двух квантов с энергиями 0,511 МэВ, которые могут давать существенный вклад во вторичное излучение, входящее из среды в заднее полупространство.

Относительное уменьшение интенсивности излучения за счет образования пар на единице пути в веществе характеризуется линейным коэффициентом эффекта образования пар ε (см^{-1}). Для свинца, например, коэффициент ε начинает играть существенную роль при энергии порядка 2,5 МэВ, а для легких элементов (алюминий) – при энергиях порядка 10 МэВ.

1.6 Шкала Хаунсфилда

В КТ измеряется и рассчитывается пространственное распределение линейного коэффициента ослабления $\mu(x,y)$. Однако сама по себе физическая величина μ не очень информативна и сильно зависит от применяемого спектрального диапазона. Количественный анализ по картам μ является очень громоздким, а прямое сравнение изображений, полученных на томографах с разным напряжением на трубке и методах фильтрации, едва ли возможно. Поэтому вычисляемый коэффициент ослабления отображается в виде так называемых КТ-чисел – единиц плотности, которые рассчитываются относительно ослабления в воде (рис.7). В честь изобретателя компьютерной томографии, их называют единицами Хаунсфилда (HU). Единица плотности

для произвольного объекта G с коэффициентом ослабления μ_G рассчитывается следующим образом:

$$KT - \text{число} = \frac{(\mu_G - \mu_{H_2O})}{\mu_{H_2O}} \cdot 1000 HU. \quad (8)$$

Воздуху соответствует КТ-число, равное -1000 HU. Поскольку КТ-числа воды и воздуха не зависят от энергии рентгеновских лучей, они являются постоянными точками шкалы Хаунсфилда.

Шкала Хаунсфилда не имеет верхнего предела. Объекты с низкой плотностью и малым коэффициентом ослабления обладают отрицательными значениями КТ-чисел. Вещества, обладающие высоким коэффициентом ослабления, характеризуются положительными значениями КТ-чисел, что соответствует более высокой плотности вещества и (или) большему эффективному атомному числу [15].



Рисунок 7 – Шкала Хаунсфилда. Единицы плотности (КТ-числа) характеризуют линейный коэффициент ослабления объекта относительно μ ВОДЫ

1.6.1 Понятие «окна» в КТ

Единицы плотности (КТ-числа) варьируют от -1024 до +3071 HU, что соответствует 4096 оттенкам серой шкалы, которые невозможно отобразить одновременно на мониторе. Глаз среднестатистического человека различает не более 60-80 оттенков серого цвета. В силу этих причин при осмотре томограмм полная шкала оттенков серого цвета придется только ограниченному, выделенному интервалу КТ-чисел. Этот интервал называют «окном». Значения плотностей, превышающие верхнюю границу окна, отображаются в виде пикселей белого цвета. Если же КТ-число оказывается меньше нижнего порогового значения, оно выводится в виде пикселя черного цвета.

1.6.2 КТ-числа, стабильность и контрастность

Шкала КТ-чисел привязана к двум фиксированным точкам: КТ-числу для воздуха (-1000 HU) и КТ-числу для воды (0 HU). Эти точки устанавливаются индивидуально для каждого томографа путем калибровочных измерений фантома при всех возможных комбинациях фильтров и значений напряжения на рентгеновской трубке. Проверка калибровки входит в регулярные процедуры обслуживания и проверки стабильности. Целью этих процедур является обеспечение постоянства измеряемых КТ-чисел, соответствующих одному и тому же веществу, в пределах сечения объекта. Для воды уровень однородности измерений считается приемлемым, если среднее значение лежит в пределах 0 ± 4 ед. Хаунсфилда, а разброс составляет не более ± 2 ед. Хаунсфилда. Соответствие системы этим требованиям легко проверить с помощью достаточно простых измерений стандартных цилиндрических водных фантомов.

Сложнее проверить однородность распределения КТ-чисел для объектов с различными параметрами сечений. Физически это осуществимо только в том случае, если объект является однородным и варьируется лишь форма его срезов. Хорошие томографы отличаются небольшим отклонением

измеряемых КТ-чисел от эталонного значения (0 HU) даже при овальной и эллиптической форме сечения, однако для объектов, состоящих из различных материалов, достигнуть такой точности уже весьма сложно.

КТ-числа, а стало быть, и контрастность объектов с отрицательным значением КТ-чисел очень слабо зависят от формы среза. Однако если объект исследования неоднороден и содержит вещества, существенно отличающиеся от воды по эффективному атомному номеру, КТ-числа и контрастность будут в значительной мере зависеть от конкретного томографа, спектра излучения и размеров объекта [15].

2. Математическое моделирование радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта

Для отработки алгоритмов и программ сбора проекционных данных и математической реконструкции в томографии используют тест-объекты, имеющие набор стандартных неоднородностей с заданными геометрическими размерами, расположенными в пределах зоны реконструкции. Результирующее ослабление на пути луча через объект определяется зависимостью

$$n(S, \varphi) = n_0 e^{-\int_0^L \mu[l(S, \varphi)] dl}, \quad (9)$$

где: n_0 – интенсивность источника излучения;

$n(S, \varphi)$ – интенсивность излучения на детекторе;

$\mu[l(S, \varphi)]$ – линейный коэффициент ослабления излучения в точке l на луче $L(S, \varphi)$.

Линейный коэффициент ослабления определяется энергией излучения E , плотностью среды ρ , массовым коэффициентом ослабления μ_ρ

$$\mu = \mu_\rho \cdot \rho. \quad (10)$$

В свою очередь массовый коэффициент ослабления μ_ρ определяется химическим составом вещества и сечениями фотопоглощения τ , комптоновского рассеяния σ , образования пар (α) для каждого из входящих в состав элементов для энергии излучения E .

Полный массовый коэффициент ослабления сложного вещества

$$\mu_\rho = \sum_i \omega_i \cdot \mu_\rho^i, \quad (11)$$

где ω_i – массовое содержание i -го элемента в составе вещества, контролируемого объекта в процентах.

В данной работе рассмотрен в качестве источника излучения изотоп кобальт – 60. Он имеет две линии 1173 кэВ и 1332 кэВ, расположенные рядом. Поэтому принято считать γ -излучение от Co^{60} как монохроматическое с энергией $E_0=1,25$ МэВ. Химический состав материала контролируемого

изделия содержит элементы Н (водород), О (кислород), С (углерод), N (азот), Ва (барий): $Ba(NO_3)_2 + C_6H_{10}O_5$ – пиротехнический состав.

Таблица 1 – Содержание химических элементов, входящих в состав материала и массовые коэффициента ослабления для элементов при значении энергии 1,25 МэВ [16]

Элемент	Процентное содержание, ω , %	Массовый коэффициент ослабления, μ_p , cm^2/g
Н	3	0,114
О	41	0,054
С	15	0,062
N	7	0,055
Ba	34	0,052

Массовый коэффициент ослабления рассчитывается как

$$\mu_p = \omega(H) \cdot \mu_p(H) + \omega(O) \cdot \mu_p(O) + \omega(C) \cdot \mu_p(C) + \omega(N) \cdot \mu_p(N) + \omega(Ba) \cdot \mu_p(Ba). \quad (12)$$

Плотность состава $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$. Массовый коэффициент ослабления на энергии 1,25 МэВ равен $0,056 \text{ см}^2/\text{г}$, а линейный – $\mu = \mu_p \cdot \rho = 0,056 \text{ см}^2/\text{г} \cdot 1,8 \text{ г/см}^3 = 0,1013 \text{ см}^{-1}$.

Расчетная геометрия, определяющая длину хорды, на которой будет происходить затухание $l(S, \varphi)$ описаны в работе «Разработка методики выполнения томографической реконструкции на базе пакета «N-Recon» [17].

Для данного химического состава материала составлена программа,

выполнены расчеты и получен массив лучевых сумм $\int_0^L \mu[l(S, \varphi)] dl$.

В томографии для математического моделирования этапа сбора проекционных данных используют цилиндрический тест-объект, который имеет набор стандартных неоднородностей с заданными геометрическими размерами, расположенными в пределах зоны реконструкции (рис. 8).

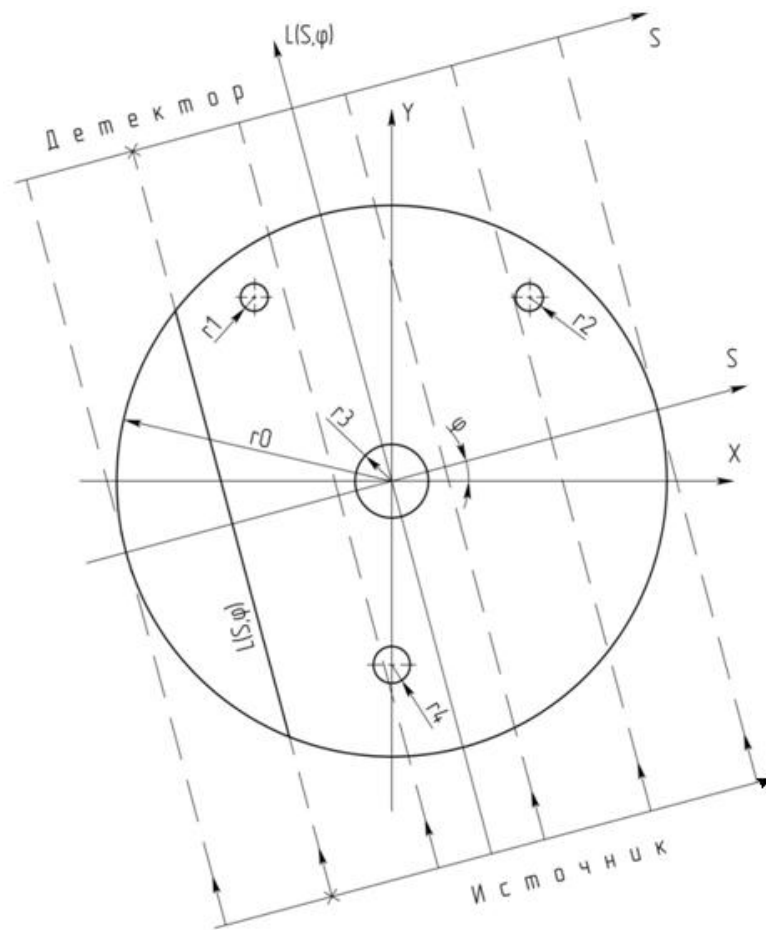


Рисунок 8 – Геометрия сканирования тест-объекта

Для изучения основных закономерностей поведения лучевых проекций $L(s, \varphi)$ возьмем тест-образец с радиусом $r_0=30$ см, содержащий 4 отверстия. Зададим необходимые данные для расчетов (рис. 13 (п.1)): радиусы и координаты центров отверстий в Декартовой системе координат ($r_1=1,5$ см (-15;20); $r_2=1,5$ см (15;20); $r_3=4$ см (0;0); $r_4=2$ см (0;20)), после чего переведем их в цилиндрическую (рис. 13 (п.2)) и определим положения центров всех окружностей в новой системе координат, используя теорему Пифагора ($r\theta_0=0$ – положение центра тест-образца, $r\theta_1=25$ см, $r\theta_2=25$ см, $r\theta_3=0$ см, $r\theta_4=20$ см). Зададим угол смещения каждого отверстия относительно начала координат ($\theta_1 = \pi - a \tan\left(\frac{20}{15}\right)$, $\theta_2 = a \tan\left(\frac{20}{15}\right)$, $\theta_3 = 0$, $\theta_4 = \frac{3\pi}{2}$) и примем начальный коэффициент ослабления для каждого отверстия: $\mu_0=0,1$ см⁻¹; $\mu_1=0$ см⁻¹; $\mu_2=0$ см⁻¹; $\mu_3=0$ см⁻¹; $\mu_4=0$ см⁻¹.

Диапазон углов сканирования φ варьируется от 0 до 2π . При отсутствии каких-либо отверстий внутри тест-объекта для всех углов φ , луч – это есть хорда, длина которой равна (рис. 13 (п.3))

$$L0(s) = 2\mu_0 \sqrt{r_0^2 - s^2}, \quad (13)$$

где s – расстояние от центра в системе (S,R).

Учитывая, что имеется диапазон углов сканирования φ , вводим условие, описывающее координаты произвольной точки s (рис. 13 (п.4)), при которых они находятся внутри отверстия, то есть где s принимает значение $r_0 \cos(\varphi) - r \leq s \leq r_0 \cos(\varphi) + r$ и вводим новую функцию зависимости длины хорды

$$f(s, r_0, \varphi, r) = 2\sqrt{r^2 - (s - r_0 \cos(\varphi))^2}, \quad (14)$$

где r и r_0 – характеристики для объекта без отверстий.

При прохождении излучения через тест-объект происходит его ослабление. Также на интенсивность потока квантов влияет присутствие отверстий внутри объекта. Тогда для n -отверстий, с учетом всех коэффициентов ослабления суммарное уменьшение длины луча запишется (рис. 13 (п.5)):

$$\sum_{i=1}^n f(s, r_{0_i}, \theta_i - \psi, r_i), \quad (15)$$

где: μ_i – коэффициент ослабления;

n – количество отверстий;

r_{0_i} – положение центра i -го отверстия;

ψ – угол проекции (от 0 до 360°);

$\theta_i - \psi$ – угол поворота отверстия относительно начала координат;

r_i – значение радиуса i -ого отверстия.

В результате получаем итоговую функцию, определяющую интенсивность потока γ -квантов:

$$l(s, \psi, r_0, r) = L0(s) - \sum_{i=1}^4 [(\mu_0 - \mu_i) \cdot f(s, r_{0_i}, \theta_i - \psi, r_i)]. \quad (16)$$

Для построения графиков результирующего ослабления на пути луча через объект примем P_i – интенсивность потока квантов от источника излучения (рис. 13 (п.6)), тогда

$$P_i = n_0 \cdot e^k, \quad (17)$$

где: $k = -L(xi, \psi_k, r_0, r)$;

ψ_k изменяется от 0 до 360°;

$xi = -r_0 + 2 \frac{r_0 i}{n}$ – координаты произвольной точки от -30 см до 30 см.

На рис. 9, 10, 11, 12 приведены примеры массивов лучевых сумм для углов сканирования 0°, 45°, 90° и 180° соответственно (рис. 13 (п.7)).

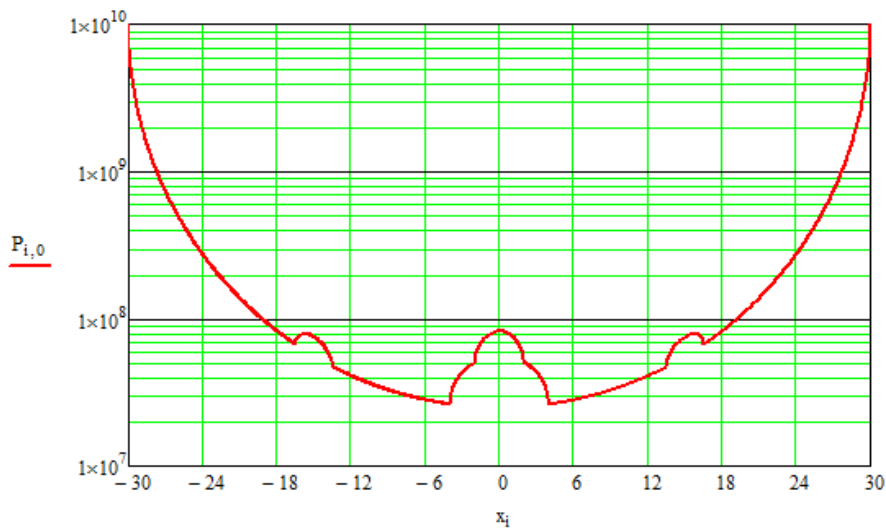


Рисунок 9 – График изменения интенсивности потока γ -квантов при изменении положения линии сканирования от -30 см до 30 см для угла сканирования $\varphi=0^\circ$

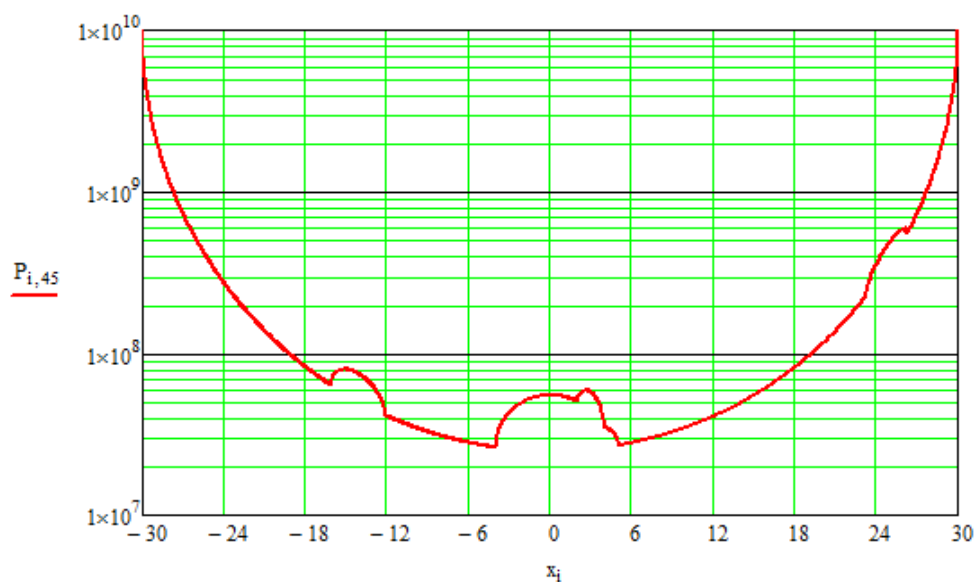


Рисунок 10 – График изменения интенсивности потока γ -квантов при изменении положения линии сканирования от -30 см до 30 см для угла сканирования для угла сканирования $\varphi=45^\circ$

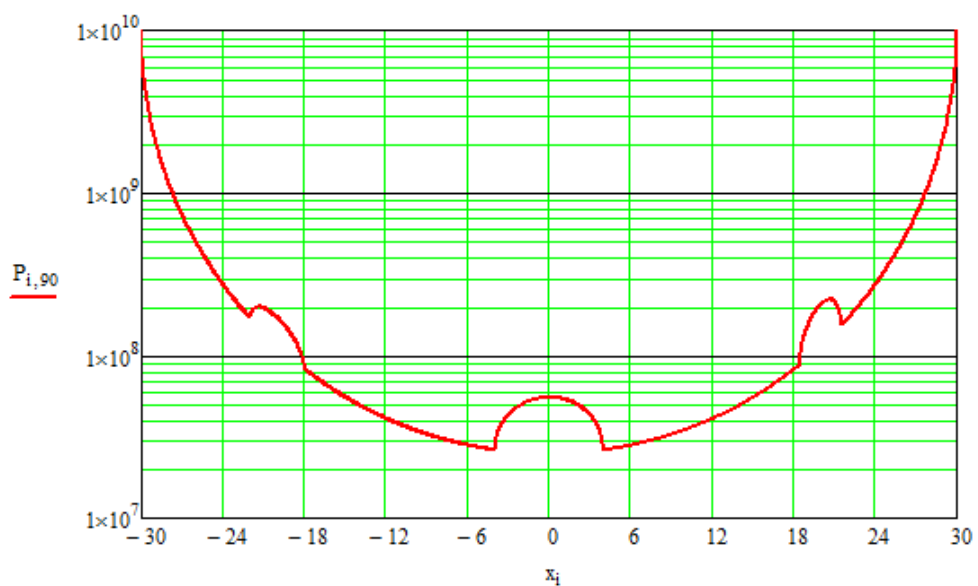


Рисунок 11 – График изменения интенсивности потока γ -квантов при изменении положения линии сканирования от -30 см до 30 см для угла сканирования для угла сканирования $\varphi=90^\circ$

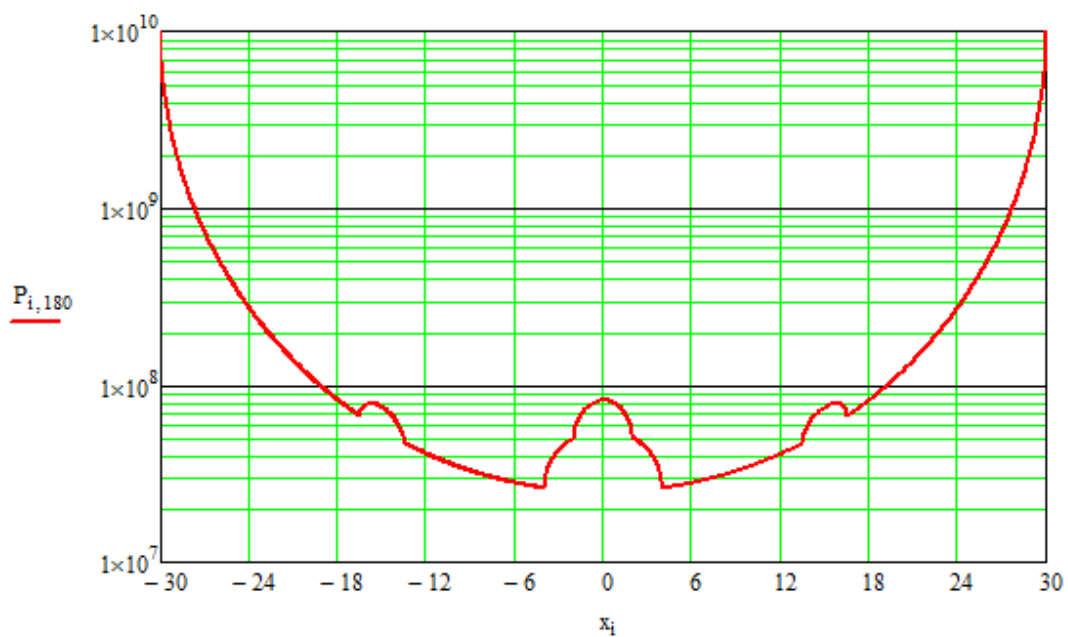


Рисунок 12– График изменения интенсивности потока γ -квантов при изменении положения линии сканирования от -30 см до 30 см для угла сканирования для угла сканирования $\varphi=180^\circ$

Схема алгоритма, реализующего выше приведенные вычисления приведена на рис 13.

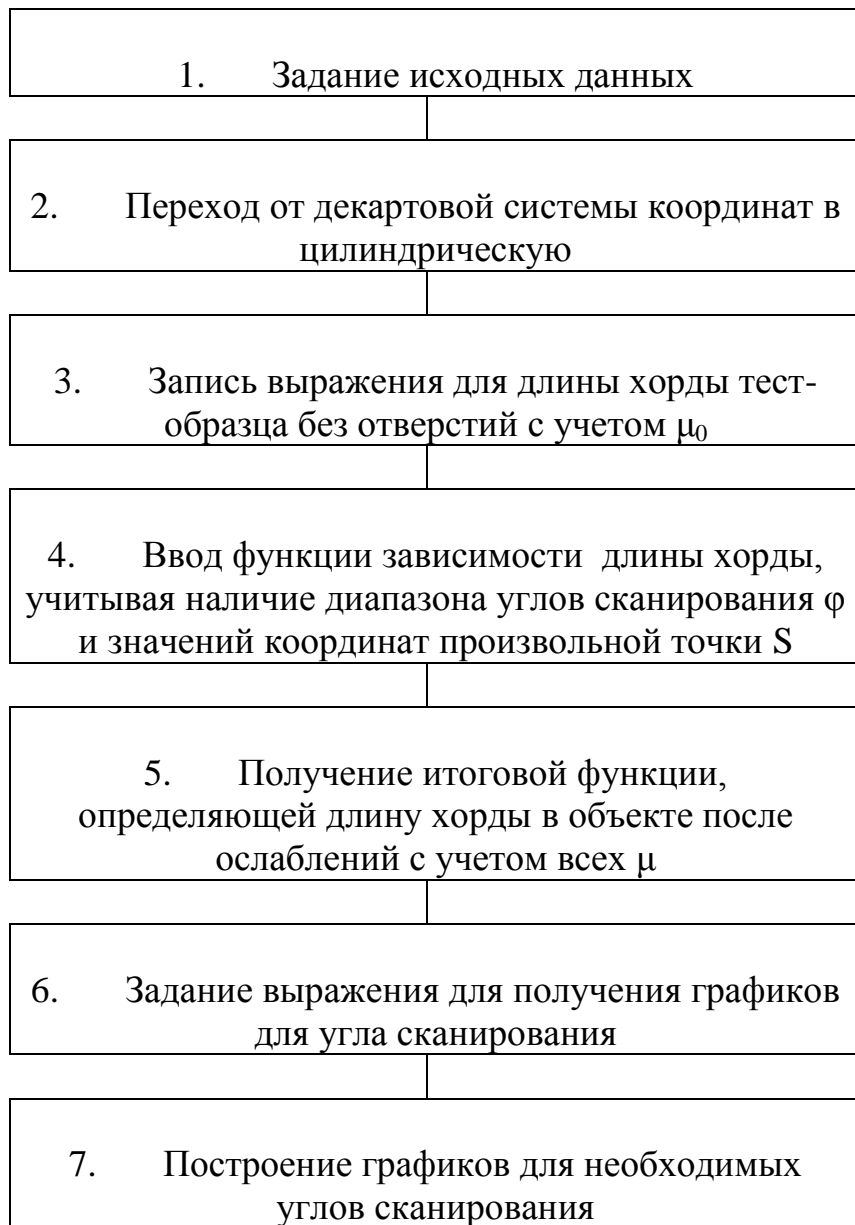


Рисунок 13 – Схема алгоритма вычисления длины луча прохождения излучения в тест-объекте с учетом ослабления

3. Обзор программного обеспечения SkyScan

Система SkyScan комплектуется программным обеспечением:

- программа для сканирования;
- NRecon (трехмерная реконструкция объекта контроля);
- DataViewer(визуализации реконструированных изображений в ортогональных сечениях, при этом оригинальный объем и разрешение сохраняются);
- CTAn(проведение точного детального анализа морфометрических и плотностных характеристик);
- CTvol(отображение модели объекта после реконструкции);
- CTvox(отображение объемного 3D объекта после реконструкции).

3.1 Сбор проекционных данных с помощью программы uCT

1. Запуск программы

Для запуска программы uCT существует два различных способа:

- а) дважды кликнуть левой кнопкой мыши на иконке рабочего стола;
- б) в линейке задач выбрать Пуск - Программы - INK TPU - uCT. На экране появится главное окно программы, которое состоит из следующих основных зон:

1.1 Страница *Сбор данных* служит для управления сбором томографических данных.

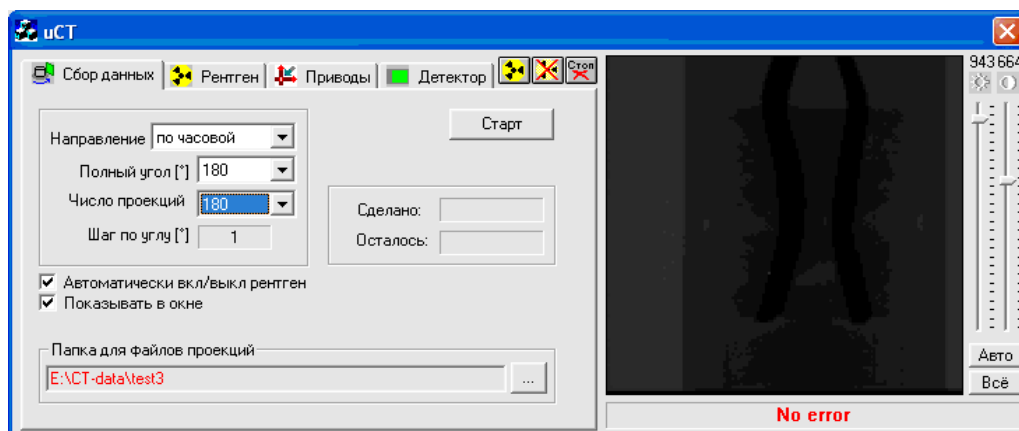


Рисунок 14 – Вкладка «Сбор данных» программы uCT

1.2 Страница *Рентген* содержит параметры управления микрофокусным рентгеновским аппаратом (РА) фирмы ТСНК-лаб.

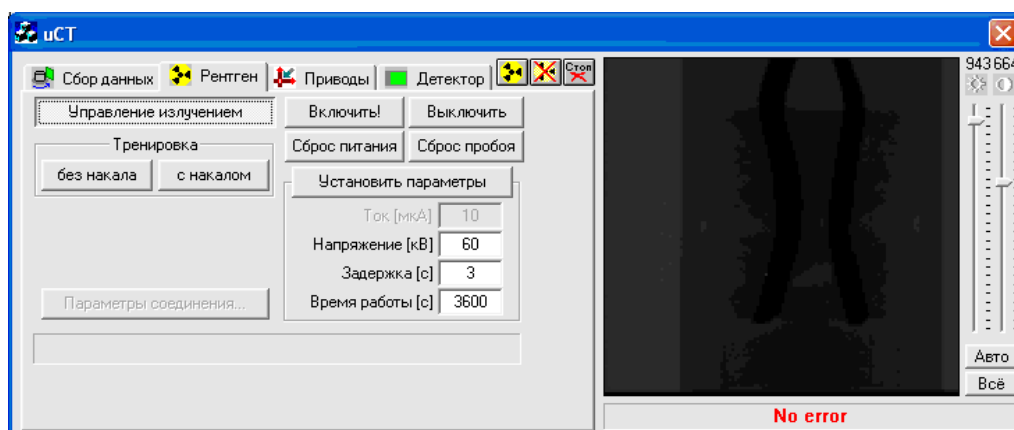


Рисунок 15 – Вкладка «Рентген» программы uST

1.3 Страница *Приводы* содержит параметры управления тремя приводами движения фирмы PI-drive.

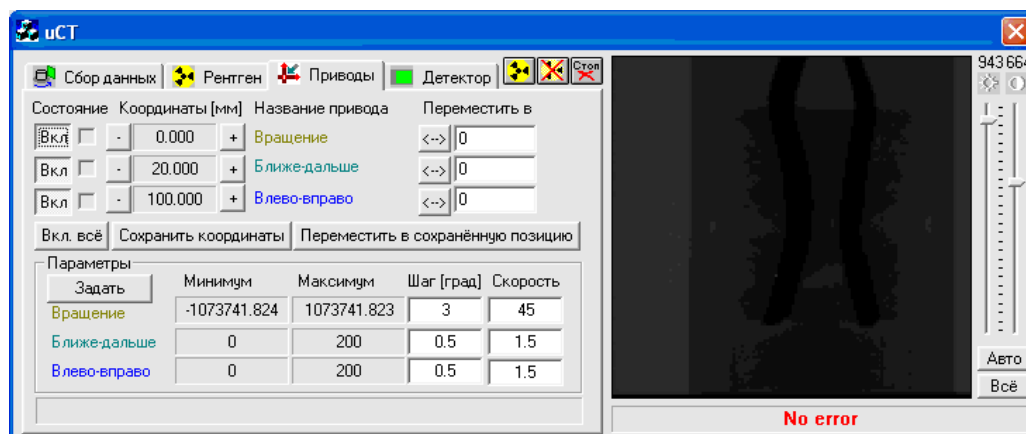


Рисунок 16 – Вкладка «Приводы» программы uST

1.4 Страница *Детектор* содержит инструменты управления матрицей детекторов рентгеновского излучения фирмы Rad-ison.

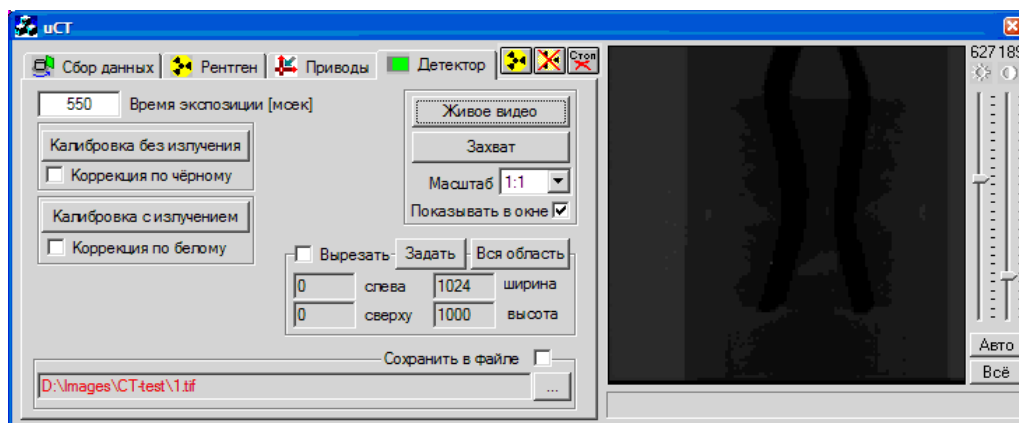





Рисунок 17 – Вкладка «Детектор» программы uCT

1.5 Область отображения изображения.

Данная область содержит уменьшенное в 4 раза текущее изображения с детектора, регуляторы контраста и яркости изображения и две кнопки: Авто (линейное отображение 98% диапазона яркостей) и Всё (линейное отображение всего диапазона яркостей).

1.6 Три кнопки управления наиболее важными параметрами установки: кнопки включения  и выключения  рентгеновского излучения, кнопка, при нажатии которой происходит остановка движения приводов или остановка сбора томографических данных .

2. Порядок работы

2.1 Проверка готовности РА

При запуске программы автоматически выполняется проверка связи с РА. После установления связи выставляются параметры РА (напряжения и максимального времени облучения), сохранённые с предыдущего сеанса работы.

2.2 Инициализация приводов

Для инициализации приводов движения следует нажать кнопку *Вкл.* всё на странице *Приводы*. После процесса инициализации активируются кнопки управления приводами.

Связь с матрицей детекторов устанавливается автоматически при запуске программы.



2.3.1 Задание времени экспозиции.

2.3.2 Выполнение калибровки без излучения. Для этого при выключенном рентгеновском излучении нужно нажать кнопку *Калибровка без излучения*.

2.3.3 Выполнение калибровки с излучением. Для этого следует убрать объект контроля из поля зрения матрицы детекторов. Далее нужно включить рентгеновское излучение, дождаться выхода на режим (примерно 15 секунд), и нажать кнопку *Калибровка с излучением*. Калибровочный файл *white.tif* сохраняется в рабочей папке программы.

2.3.4 Теперь каждое захваченное изображение будет калибровано по черному и белому фону. Для захвата одного кадра следует нажать кнопку *Захват*. Для непрерывного захвата кадров следует нажать кнопку *Живое видео*.

2.3.5 Если же отметить галочку *Показывать в окне*, то изображения будут также показываться в отдельном окне «Кадр №» (для кнопки *Захват*) или «Текущее изображение» (для кнопки *Живое видео*) как показано на рисунке ниже

2.3.6 Яркость и контраст изображений в этих окнах регулируются двумя соответствующими бегунками  и  или с помощью кнопок *Авто* и *Всё*.

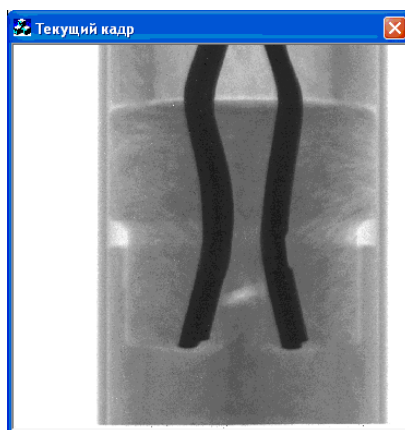


Рисунок 18 – Окно текущего кадра

2.3.7 Из захваченного изображения можно вырезать заданную область, используя соответствующие кнопки *Вырезать*, *Задать* и *Вся область* или с помощью мыши.

2.3.8 Захваченное изображение будет автоматически сохранено в заданном TIFF-файле.

2.3.9 Ранее захваченное и сохранённое изображение можно загрузить для просмотра.

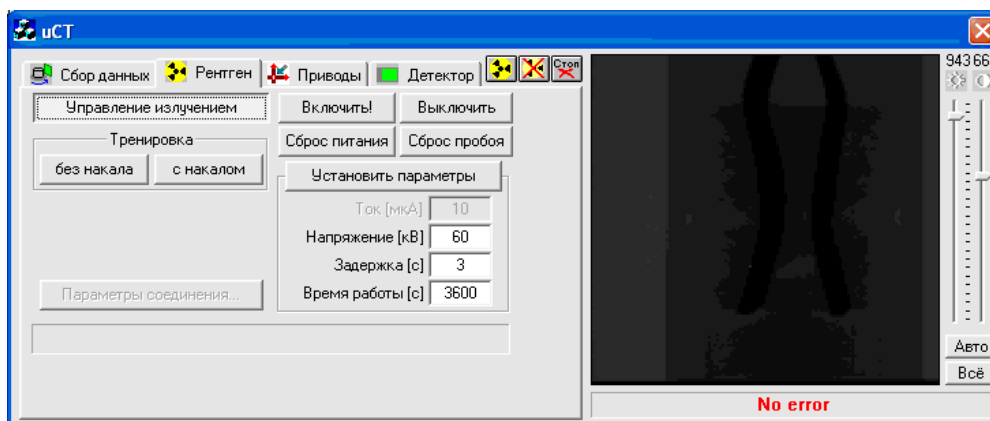


Рисунок 19 – Вкладка «Рентген» программы uCT

2.4 Настройка параметров РА

Для установления связи с РА нужно нажать кнопку *Управление излучением*.

2.4.1 Основным параметром микрофокусного РА является *Напряжение [кВ]* на аноде трубки.

2.4.2 Ток трубки не регулируется.

2.4.3 Максимальное время облучения задаёт кнопка *Время работы [с]*.

2.4.4 Задержку между нажатием кнопки и включением излучения задает кнопка *Задержка [с]*.

2.4.5 Заданные параметры в РА передаёт кнопка *Установить параметры*.

2.4.6 Включают/выключают рентгеновское излучение кнопки *Включить/Выключить* (☸ / ☸).

2.4.7 Тренировки *без накала* и *с накалом* включают соответствующие виды тренировок трубки РА.

2.4.8 Кнопки *Сброс питания* и *Сброс пробы* сбрасывают соответствующие состояния РА.

2.5 Перемещение объекта контроля

Шаговые двигатели используются для перемещения объекта контроля: один – вращения и два – горизонтального перемещения. Со страницы *Приводы* выполняется управление ими.

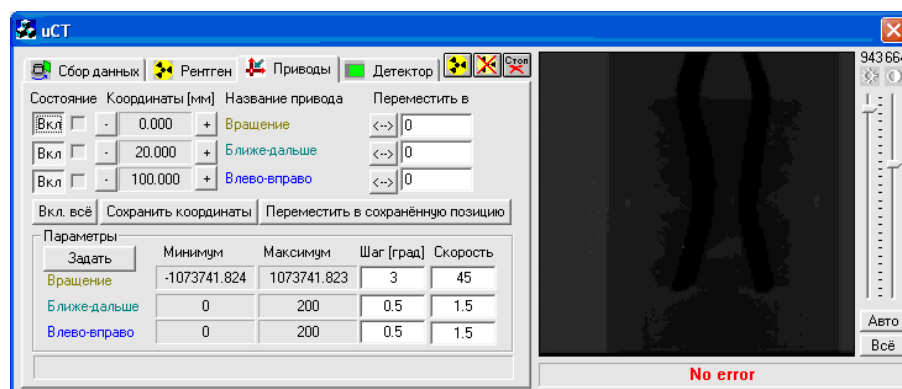


Рисунок 20 – Управление шаговыми двигателями со страницы *Приводы*

2.5.1 Перед использованием приводы необходимо инициализировать (кнопки *Вкл* или *Вкл. всё*).

2.5.2 Кнопки «-», «+» осуществляют перемещение на заданный шаг, перемещение в заданную позицию выполняется кнопками <-->.

2.5.3 Кнопка *Сохранить координаты* запоминает текущую горизонтальную позицию (2 координаты) объекта контроля.

2.5.4 Кнопка *Переместить в сохраненную позицию* позволяет вернуть объект контроля в сохраненную позицию.

2.5.5 Кнопка  останавливает движение приводов.

2.5.6 В режиме *Живого видео* удобно следить за перемещением объекта контроля, задаваемого на странице *Детектор* при включенном излучении.

3. Сбор данных для томографии

Страница *Сбор данных* служит для сбора томографических данных.

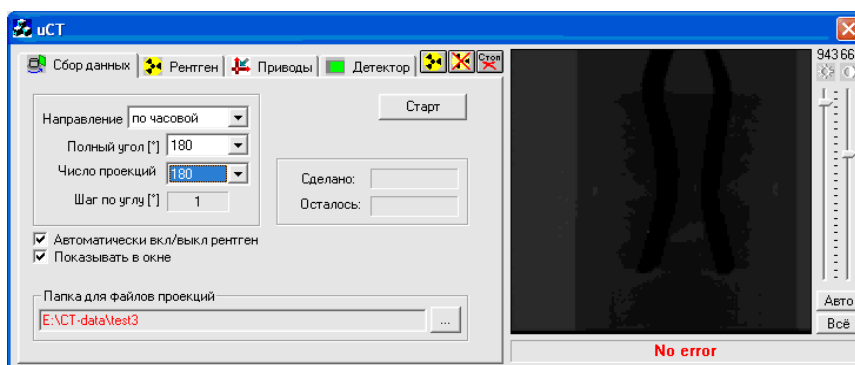


Рисунок 21 – Окно сбора данных

3.1 До перехода на эту страницу следует предварительно настроить изображение.

3.2 Затем задается число проекций (изображений).

3.3 После указывается полный угол вращения.

3.4 Шаг по углу вычисляется автоматически.

3.5 Впоследствии выбирается направление вращения (по часовой или против часовой стрелки).

3.6 Задается имя папки для файлов проекций.

3.7 Отметить галочку *Показывать в окне*.

3.8 Отметить галочку *Автоматически вкл/выкл рентген*.

3.9 Нажать кнопку *Старт*.

3.10 В ходе сбора данных сохраняются проекции и текстовый файл *data.set* для загрузки захваченных данных в программу Диада.

3.11 Процент выполнения задачи отображается в поле *Сделано*.

3.12 Время, оставшееся до окончания задачи отображается в поле *Осталось*.

3.13 Кнопка  останавливает сбор данных в любой момент времени.

После сбора проекционных данных изображения проходят процесс реконструкции в программе NRecon. Подробный процесс описан в работе

«Разработка методики выполнения томографической реконструкции на базе пакета «N-Recon». Затем проводится морфометрический анализ реконструированных изображений в программе CT-Analyser.

3.2 Краткая обобщенная инструкция программы «CT-Analyser»

Программа CT-Analyser осуществляет полный двумерный и трехмерный количественный анализ реконструированных изображений:

- импорт и экспорт данных в *tiff*, *bmp*, *jpg* и др.;
- пространственная перекомпоновка под любым объемным углом;
- свободный выбор части объекта для изучения (VOI, ROI);
- измерения расстояний и углов в пространстве;
- создание изображений максимальной интенсивности (MIP);
- калибровка плотности по HU, BMD или коэффициенту поглощения;
- сглаживание, удаление шумов, морфологические преобразования и т.д.;
- программирование порядка выполняемых функций (постановка сценария);
- анализ структур внутри VOI в 2D, 3D;
- анализ всех объектов внутри ROI/VOI в 2D, 3D;
- параметры измерений (площадь поверхности, степень анизотропии и т.д.);
- возможность работы в пакетном режиме анализа;
- калибровка измерений по эталонным образцам.

1. Настройка параметров

В меню *File / Preferences* находятся несколько закладок отвечающих за настройки различных частей программы.



Рисунок 22 – Диалоговое окно «Preferences»

Краткое описание параметров:

– *General* (общее). Параметры отображения измеренных 3d и 2d данных: используемая номенклатура, единицы измерения, параметры изображения, формат текстовых отчётов и т.д. А также опции и форматы импорта изображений и степени сжатия JPG и параметры отображения положения изображения относительно осей XY.

– *Animation* (анимация). Устанавливает скорость анимации как для отображения (visualisation) так и для экспорта видеороликов в *avi* формате.

– *Region of interest* (область интереса). По умолчанию область ROI выбирается круглой или квадратной.

– *Histogram* (гистограмма). Панель позволяет использовать калибровку по плотности (bone mineral density (BMD)). С помощью этой функции можно произвести калибровку по любому стандартному образцу плотности, сохранив название файла.



– *Volume* (объём). Закладка позволяет настраивать параметры пространственного моделирования в программе STAn, которые обеспечивают возможности графической карты компьютера.

– *Tools* (инструменты). Задание пути к программе SkyScan CTVol для автоматического запуска 3D моделей.

– *Directories* (директории). В данной закладке указываются пути для временных файлов (необходимо для STAn, по умолчанию папка выбирается автоматически) и / или внешних подключаемых модулей.

– *Advanced* (продвинутые настройки). В этой закладке находятся опции выбора алгоритмов формирования 3d моделей, межстрочного интервала в (mean intercept length (MIL)) для анализа анизотропии и другие опции для 3d морфометрии, кэширования данных (используется при загрузке данных по сети) и опция лицензирования STAn на несколько рабочих профилей пользователей.

2. Панель выбора данных

Для переключения между отображаемыми сечениями предназначена панель, на которой отображается список загруженных файлов изображений. Для перемещения по списку вверх и вниз можно использовать   или ползунок, расположенный слева от панели.

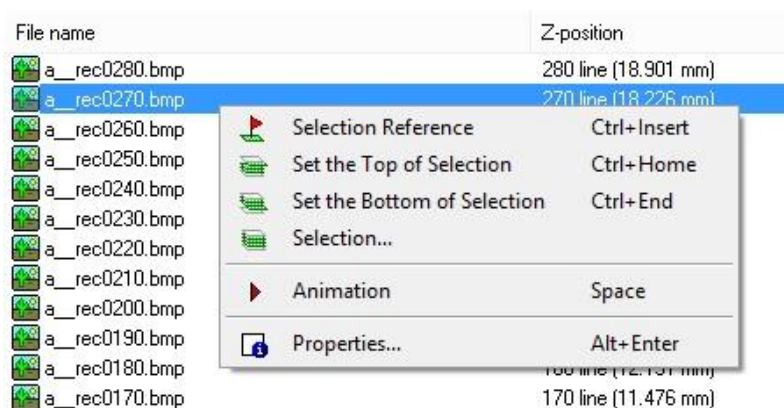






Рисунок 23 – Панель выбора данных


Щелчок правой кнопкой мыши в окне списка по какому-либо сечению вызывает меню (рис. 23), которое предлагает следующие функции:

 Selection Reference Ctrl+Insert – функция устанавливает уровень яркости выбранного изображения в качестве эталонного уровня для автоматической настройки верхней и нижней границы выбранного объема интереса (VOI).

 Set the Top of Selection Ctrl+Home – использование этой опции устанавливает текущий уровень яркости изображения в качестве верхней границы VOI.

 Set the Bottom of Selection Ctrl+End – использование текущего уровня яркости изображения в качестве нижней границы VOI.

 Selection... – активация этой опции открывает диалоговое окно, как для прямого ввода верхнего и нижнего предела, так и для "аналитической" функции, использующей заданное смещения и величину VOI.

 Animation Space – запуск и остановка анимации сечений в выбранном диапазоне VOI.

 Properties Alt+Enter – отображение свойства изображения.

3. Общая структура CT-Analyser

Структура CT-Analyser базируется на пяти «столпах», которые отображаются в отдельных окнах с панелями и представляют собой правильную последовательность шагов для достижения нужных результатов в процессе анализа. Эти шаги следующие (рис. 24):

- исходные изображения;
- область интереса;
- бинарные изображения;
- обработка изображения (обсчета);
- пользовательская обработка.

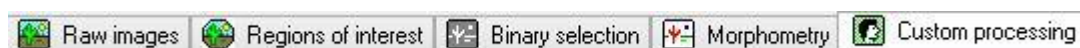


Рисунок 24 – Меню VIEW (Просмотр)

4. Запуск пространственного моделирования

Кнопка, обведенная красной окружностью (рис. 25), запускает пространственное моделирование:



Рисунок 25 – Запуск пространственного моделирования

После открытия окна моделирования, первым делом необходимо произвести бинаризацию изображения, установить границы градаций серого с помощью ползунков: белые воксели будут включены в модель, чёрные нет. Затем можно выбрать различные палитры и параметры для создания модели (объёмная модель, степень поглощения, режим максимальной интенсивности).

Кнопка с символом «Инь-Янь» позволяет инвертировать цвета.

5. Кнопки панели моделирования



Рисунок 26 – Кнопки панели моделирования


 Сохранить текущее изображение.

 Создать модель на основе текущего набора данных.

 Создать модель на основе выделенного объема интереса.

 Восстановить параметры модели на исходные значения.

 Применить пороговое значение объема интереса.

 Включение и выключение куба, в который вписывается модель.

Куб можно перемещать, удерживая кнопку *shift* и перетаскивая его мышкой.

Для перемещения модели вместе с кубом нужно перетаскивать их мышкой, при необходимости поворота куба относительно неподвижной модели необходимо вращать его мышкой, удерживая нажатой кнопку *control*.

Включение плоскости, по которой можно проводить сечение и отсекают верхнюю или нижнюю (по отношению к плоскости) часть модели.

 Отсечение части модели по плоскости.

 Поворот модели вдоль осей XYZ.

 Отображение пространственной модели.

 Модель в виде карты поглощения.

 Модель в виде проекций максимальной интенсивности.

 Модель в виде проекций плотности.

6.1 Панель настроек

Панель включает в себя ряд функций, таких как профиль плотности линии, продольные сечения изображения через набор данных и генерацию проекций максимальной интенсивности (MIP) изображений с разных углов.

Для активации панели необходимо нажать на кнопку линии профиля на верхней панели (обведено красным):



Рисунок 27 – Панель настроек

При этом панель активируется, на сечении появляется красная линия. Эта линия может быть перемещена в любое место. На панели справа от сечения изображен профиль серого вдоль центральной линии (рис. 28).

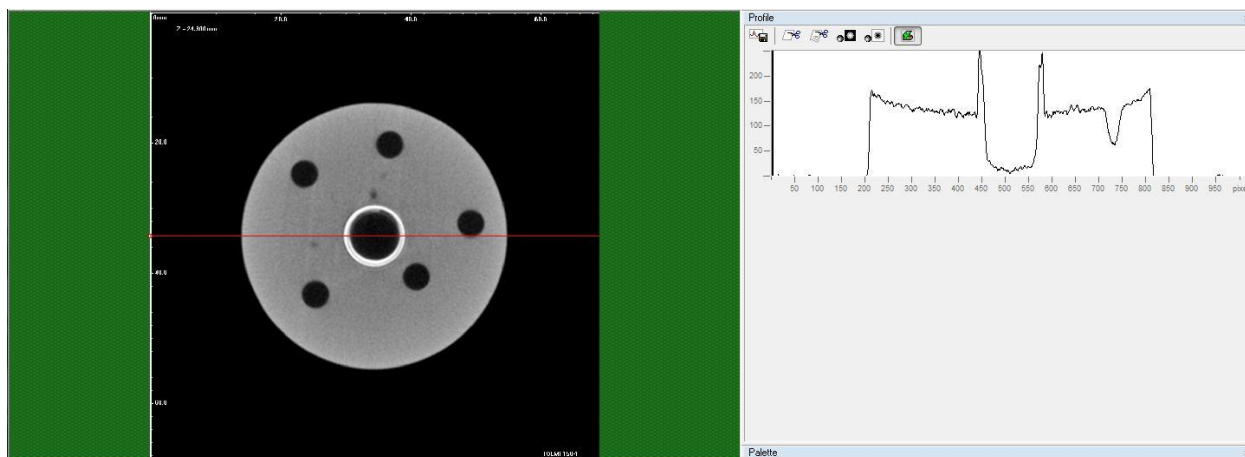







Рисунок 28 – Активация панели профилей


На панели над профилем графика расположены следующие команды:

 *Save profile* – сохраняет текстовый файл с результатами профиля плотности линии;

 *Cut model* – создание единого продольного сечения вдоль линии профиля через набор данных, в пределах области интереса. Сечение отображается в открывшемся диалоговом окне, его можно сохранить, нажав на кнопку  *Save image*;

 *Reslice model* – создание нового набора сечений вдоль линий, параллельных линии профиля.

 *Maximum intensity projection* – получение проекции максимальной интенсивности, которую можно сохранить в отдельном файле.

 *Shadow projection* – получение теневой проекции, которую также можно сохранить отдельно от исходного файла.

Параметры для построения таких продольных наборов данных задаются в появляющемся диалоговом окне. *Background color* указывает, какой цвет (черный или белый) заполнит районы новых сечений, выходящих за пределы исходных изображений. Используя *Slice spacing* можно задать расстояние между разрезами, а *Number of slices* указывает общее количество срезов в наборе данных.

6.2. Инструмент угломер.

Угломер доступен для измерения углов на изображении любого набора данных. Его внешний вид показан на рисунке 29 (обведено красным).

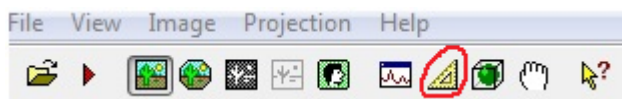


Рисунок 29 – Инструмент угломер



СТAn оснащен инструментом для ручного измерения углов, длин прямых и произвольных кривых линий. Измерения производятся на проекции и в сечении.

Панель измерений имеет четыре вкладки: угол, линия, путь и координата. Выбор одной из этих опций позволяет проводить измерение изображения на экране с помощью левой кнопки мыши.


7. Регион интереса


Переход ко второй странице – область (регион) интереса (ROI) – позволяет разграничивать области интереса в полученных изображениях. По умолчанию ROI является прямоугольным регионом, который имеет тот же размер, как и само изображение.


Существует семь типов ROI, которые вы можете выбрать из выпадающего меню *Region of Interest*:


-  *Rectangle* – прямоугольная область интереса;
-  *Square* – квадратная область интереса;

 *Elliptic* – эллиптическая область интереса;

 *Round* – круглая область интереса;


 *Polygonal* – полигональная, нарисованная от руки, область интересов;


 *Empty* – пустая область показывает, что в данном изображении не выбраны ROI;


 *Interpolated* – область интереса интерполирована из соседних изображений.


На странице ROI, каждое изображение в панели Dataset имеет значок с указанием его типа по отношению к ROI. После загрузки набора данных все изображения по умолчанию отображаются как интерполированные ROI.


Для управления ROI используются следующие команды:

Region of interest / Expand – увеличивает размеры активной фиксированной области интересов до размеров сечения  ;

Region of interest / Copy to All – копирует активный ROI во все изображения открытого набора данных  ;

Region of interest / Reset All – сбрасывает ROI всех изображений к интерполированному (по умолчанию). Это действие можно рассматривать как кнопку "начать все сначала"  ;

Region of interest / Invert ROI – переключает выбранный (активный) ROI от региона внутри выбранной формы к ROI за пределами выбранной формы, и наоборот  ;

Region of interest / Static; Dynamic; Adaptive interpolation – статическая, динамическая или адаптивная интерполяция  ;

Region of interest / Edited above – переключает на следующий редактируемый ROI, расположенный выше текущего изображения **Ctrl. + ↑** ;

Region of interest / Edited below – переключает на следующий фиксированный ROI, расположенный выше текущего изображения **Ctrl. + ↓** ;

Region of interest / Last Modified – переключает на изображение, содержащее последний модифицированный ROI ;

Region of interest / Build Cube – создает кубический объем интереса (ВОИ), основанный на квадратном ROI, с текущим изображением, принимаемым за экваториальный уровень этого куба. ROI для изображений вне этого куба будут установлены как пустые. Экваториальный уровень задается как квадратный ROI, а все остальные уровни отображаются в виде прямоугольных ROI;

Region of interest / Build Sphere – создает сферический VOI на основе круглого ROI с текущим изображением, принимаемым за экваториальной уровень этой сферы. ROI для изображения за пределами этой сферы будут установлены как пустые. Экваториальный уровень задается как круглый ROI, а все остальные уровни отображаются в виде эллиптических ROI;

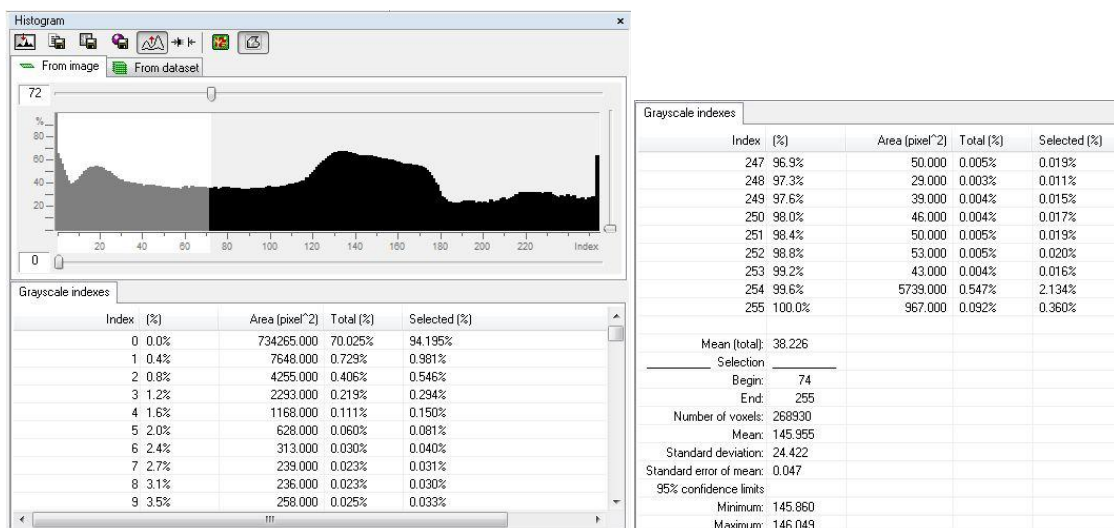
Region of interest / Load – загружает ROI, сохраняемый на диске  .

8. Бинарные изображения

Третий режим бинарных изображений – изображения с двоичным отображением полутонов на дисплее, в которых белый цвет соответствует районам с яркостью в пределах бинарного порогового значения "твердый", а районам за пределами этого промежутка соответствует черный цвет "пустота". ROI накладывается на бинарное изображение, таким образом, что области внутри ROI остаются черно-белыми, а часть изображения за пределами ROI подсвечивается текущим цветом фона окна.

8.1 Панель Гистограмма

Панель *Histogramm* разделена на две части. В верхней части окна гистограммы отображается распределение яркости (рис. 30, а). Ниже находится текстовая таблица с данными этого распределения (рис. 30, б).



а) распределение яркости


б) таблица


Рисунок 30 – Гистограмма


Таблица гистограммы состоит из пяти колонок, которые отображают абсолютное значение яркости изображения (1), относительную яркость, % (2), абсолютное значение площади изображения с этой яркости в текущих единицах измерения (3), области с конкретными значениями яркости, % от общей площади всех значений яркости (4), и области с конкретными значениями яркости, % от общей площади с яркостью в пределах выбранного диапазона (5).


В верхней части таблицы гистограммы есть четыре вкладки с альтернативными единицами яркости или плотности. Это оттенки серого, единицы Хаунсфилда (HU), минеральная плотность кости (BMD) и коэффициент затухания.


8.1.1 Команды меню *Histogramm*:


Histogram / Save Histogram – сохраняет в текстовый файл (prefix_hist.txt) данные, отображаемые в таблице гистограммы  ;

Histogram / Save Auto threshold – автоматически назначает пороговые значения  ;

Histogram / Logarithm scale – переключает режим отображения гистограммы между линейным и логарифмическим  ;

Histogram / Calibration – реализует калибровку плотности в единицах Хаунсфилд и весового коэффициента затухания  .

Histogram / From Image – показывает распределение яркости гистограммы только по текущему изображению  .

Histogram / From Selection – показывает распределение яркости гистограммы по площади выделенного изображения  .


Histogram / From Dataset – показывает распределение яркости гистограммы по всей площади всех изображений открытого набора данных.


Grayscale indexes – устанавливает отображаемую шкалу плотности масштаба в единицах оттенка серого. Оттенки серого называются "индексами".

Hounsfield Units – устанавливает отображаемую шкалу плотности в единицах Хаунсфилда.

Bone Mineral Density (BMD) – устанавливает отображаемую шкалу плотности в единицах минеральной плотности кости, в г/см^3 гидроксиапатита кальция.

Attenuation coefficient – устанавливает отображаемую шкалу плотности в единицах коэффициента затухания (μ) в соответствии с $I = I_0 e^{-\mu x}$.

Histogram / Halftone view – подсвечивает исходное изображение в градациях серого зеленым подсветки, с бинаризованным изображением выделенным красным цветом  ;

Histogram / ROI view – отображает часть изображения внутри ROI в черно-белом, а область вне ROI с зелеными затенением  .

8.2. Калибровки BMD во вкладке настроек гистограммы

Вкладка *Histogram* в настройках позволяет откалибровать минеральную плотность кости, определяемую как г/см^3 кальция гидроксиапатита, по плотности в единицах Хаунсфилда (HU) или коэффициента затухания.

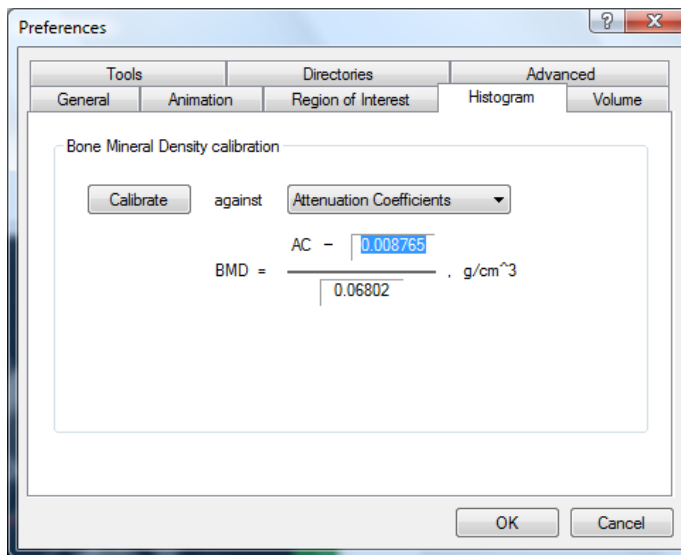


Рисунок 31 – Окно «Гистограмма»

Кнопка *calibrate* позволяет выбирать калибровку BMD в единицах Хаунсфилда или коэффициента затухания.

8.3. Файловое меню на странице гистограммы.

File / Save Binary – сохранение данных в виде бинарных изображений с текущим порогом в 1-битном формате BMP (небольшой размер файла);

File / Create 3D-model – создает файл трехмерной модели (для просмотра в программе STvol.exe), также здесь можно выбрать тип файла модели.

3D модели, созданные в СТАп могут быть сохранены в виде файлов трех типов:

- 1) .STM файлов, сохраняя модель с единицами измерения вокселей;
- 2) P3G файлов, который также имеет пространственную единицу вокселей, и имеют гораздо меньший размер файла (который также открывает быстрее в STVol, хотя на создание файлов в СТАп может потребоваться больше времени, чем для STM моделей);
- 3) .STL файлов, широко используемых в 3d изображениях и стереолитографическом ПО, сохраняется с пространственной информацией, закодированной в единицах (мм, мкм, дюймы, пиксели) выбранных в *File /*

Preferences во вкладке *General* в поле *Unit*. Активация поля происходит в нижней части меню *create 3d model* для автоматического запуска соответствующей программы (например, CT-volume), для демонстрации модели сразу же после завершения её построения.

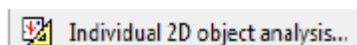
9. Морфометрия

Окно расчета морфометрии, где производятся 3D и 2D измерения, становится доступной только после того, как набор данных будет преобразован из формата градаций серого цвета в бинарный. Области, окрашенные в белый цвет идентифицируются как объекты, а всё, что окрашено в черный цвет считается окружающим фоном. Перейдя к панели с названием анализ (*Analysis*) появится доступ к командам морфометрического анализа.

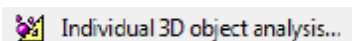
9.1. Панель анализа

Панель *Analysis* разделена на две части. В верхней части – гистограмма распределения количественных параметров 2d изображений (под гистограммой отмечена шкала по оси x). Всего существует шесть возможных параметров для выбора (размеры объекта, периметр и т.д.), которые отображаются в панели над гистограммой.


9.2. Команды меню анализа





Измеряет и выводит параметры 2d морфометрии всех дискретных бинарных объектов текущего сечения.





Измеряет и выводит параметры 3d морфометрии индивидуально для каждого дискретного бинарного объекта в выбранном объёме интереса текущего набора данных. Отчётный лист содержит в себе данные по каждому объекту.


 3D analysis... Измеряет и выводит интегральные параметры 3d морфометрии всех бинарных объектов внутри объёма интереса. Отчётный лист содержит в себе усреднённые значения параметров по всем объектам.


 Save 2D analysis results... Измеряет и выводит параметры 2d морфометрии всех объектов из всех сечений внутри VOI. Отчётный лист содержит значения параметров для каждого сечения.


 Save histogram of distribution... Команда сохраняет текстовый файл с отображёнными на гистограмме 2d параметрами для всех дискретных бинарных объектов с текущего сечения. Файл получает название «datasetname_dst.txt» (или .csv), сокращение dst для распределений «distribution».


 Show absolute values Показывает абсолютные значения каждого столбца гистограммы.

 Area histogram В случае выбора размера или длины в качестве параметра для отображения гистограммы, кнопка *area histogramm* переключает между общим числом (N) и общей площадью или поверхностью (S) объектов в каждой категории, в качестве единиц оси Y.

 Show absolute values Данная кнопка отображает численное значение, связанное с каждым столбцом гистограммы.

 User defined histogram intervals... В случае, если в качестве опции гистограммы выбрана длина (диаметр круга эквивалентной площади), эта кнопка открывает диалоговое окно, в котором можно указать интервалы гистограммы значений длины.

 Size distribution Приводит единицы отображаемой гистограммы по оси Y, к размеру объекта (диаметр эквивалентного круга).

 Length distribution Приводит единицы по оси Y отображаемой гистограммы к длине объекта (максимальное расстояние между двумя точками объекта).



Perimeter distribution

Приводит единицы по оси Y отображаемой гистограммы к периметру объекта.



Form distribution

Приводит единицы по оси Y отображаемой гистограммы к форм-фактору.



Orientation distribution

Приводит единицы по оси Y отображаемой гистограммы к ориентации.



Porosity distribution

Приводит единицы по оси Y отображаемой гистограммы к пористости (доля области полностью замкнутого пространства в 2d).

9.3. Анализ отдельного объекта в 2d

Можно выбрать любой объект в отчете 2d анализа одиночного изображения с помощью клика левой кнопки мыши. Кроме того, в той же области изображения, если щелкнуть правой кнопкой мыши на любом отдельный бинарный объект, появится меню, верхним элементом которого будут «свойства объекта». Выбор *object properties* откроет окно 2d результатов с одной строкой данных, соответствующей выбранному бинарному объекту. Можно выбрать одну или несколько строк. Сохранить результаты анализа отдельных объектов изображения можно в виде текстового файла, нажав кнопку *Save results*. При этом есть возможность выбрать, какие 2d параметры будут включены в виде столбцов, нажатием на кнопку *Choose details*.

9.4. Анализ отдельного объекта в 3D

Этот анализ вычисляет и отображает 3d параметры каждого отдельного 3d бинарного объекта в VOI.

Анализ/3D анализ – инициирует трехмерный анализ выбранных бинарных объектов (белый цвет) в объеме интереса.

При выборе этой команды открывается диалоговое окно 3D анализа и показывает список параметров, которые могут быть рассчитаны. Выбор параметров осуществляется при помощи соответствующих меток.

Нажатие кнопки *Continue* запускает анализ, и если была выделена опция *Auto save result as*, появится диалоговое окно, в котором можно указать имя текстового файла с результатами 3d анализа. Если отмечена опция *text table*, результаты сохраняются в виде таблицы со значениями каждого параметра в отдельной строке.

Сохранить результаты 3d анализа можно как текстовый файл, нажатием кнопки *Save results*, или как одну строку текста разделенного запятыми, нажатием кнопки *Append results to file*. При щелчке левой кнопкой мыши на значок *Print results*, результаты анализа будут напечатаны.

9.5. Дополнительные параметры для 3D морфометрических расчетов.

В нижней части вкладки дополнительных параметров, есть четыре клеточные поля активации (рис. 32):

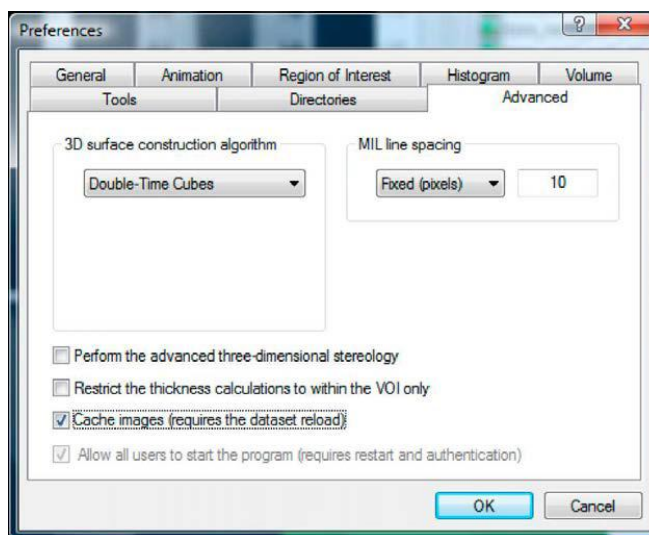


Рисунок 32 – Вкладка дополнительных параметров

– *Perform the advanced 3-dimensional stereology*. Выбор этого параметра добавляет список параметров, относящихся к расчету анизотропии

минимального интервала усреднения сечений (MIL) и MIL тензора, к концу отчета 3D анализа;


– *Restrict the thickness calculations to within the VOI only*. Выбор этого параметра сокращает время, необходимое для расчета 3d толщины и распределения, с помощью использования методики трансформации расстояния для определения локальной толщины;

–*Cache images* – требуется перезагрузка данных;

–*Allow all users to use the program* – требуется перезапуск и аутентификация.

10. Специальная обработка

Страница специальной обработки представляет другой способ работы с СТАп. Функции анализа из предыдущих разделов СТАп (бинаризация, 2D и 3D анализ и др.) также могут быть использованы в специальной обработке, равно как и множество дополнительных функций, таких как операции по обработке изображений (сглаживание, удаление пятен). Выбранные операции будут выполнены в "списке задач", который создается и конфигурируется пользователем. Комбинации доступных операций могут реализовать очень широкий спектр 3d функций анализа изображений.

При активации страницы специальной обработки при помощи кнопки  на контрольной панели появляется сообщение, указывающее о начале загрузки текущего набора данных.

Страница специальной обработки позволяет применять к изображениям одну или несколько операций из списка внутренних или внешних модулей или «плагинов» подключенных к программе. Эта страница СТАп имеет открытую архитектуру, так что пользователь может добавлять собственные процедуры анализа, как внешние плагины. Внутренними плагинами являются те, что запускаются из ядра программы СТАп.

10.1. Панель плагинов.

Панель имеет следующие вкладки (рис. 25):

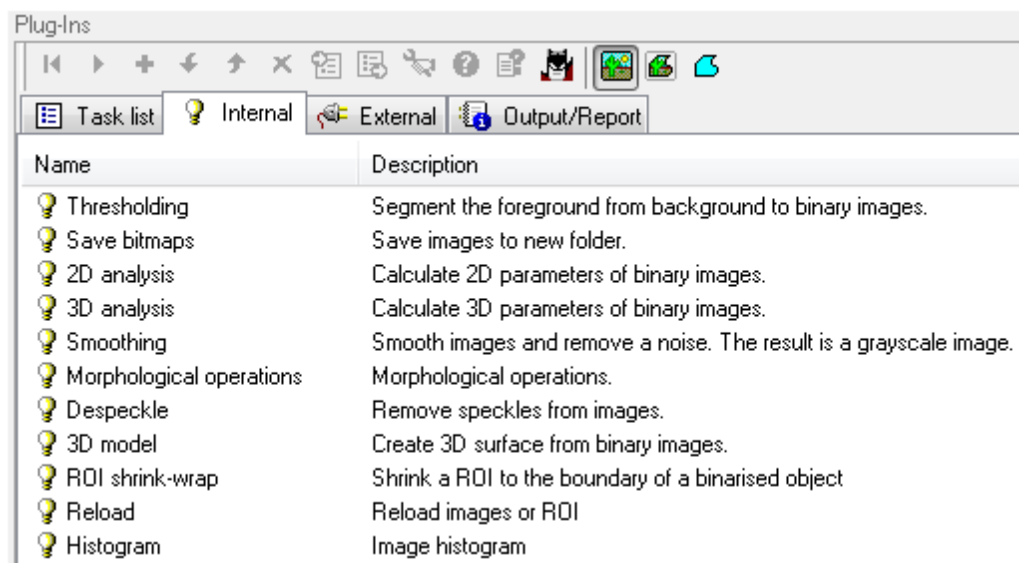


Рисунок 33 – Панель плагинов

Task list – показывает список операций, которые могут включать в себя внутренние и/или внешние плагины, которые будут применены к набору данных в отображаемом порядке (сверху вниз);


Internal – показывает список внутренних плагинов;


External – показывает список внешних плагинов, загружаемых из каталога, указанного *File/Preferences/Directories/Plug-In Directory*.


Output / Report – пути и имена текстовых файлов с результатами анализа (*Output file*) и отчет или журнал проведенных операций (*Report file*).


Кнопка открывает этот файл для просмотра.


В панели плагинов есть команды, которые становятся активными в некоторых вкладках и неактивными в других:


Restore dataset  – восстанавливает копию изображения данных, отменяя предыдущие изменения. Эта команда становится активной после изменения изображения.


Ru nplug-ins  – запускает выполнение выбранного внешнего или внутреннего модуля при активированной вкладке *internal* или *external* и запускает набор плагинов, когда активирована опция *Task list*.


Add plug-in to task list  – добавляет выбранный внутренний или внешний модуль в список задач во вкладке *Task list*.


Move plug-in down  – сдвигает выбранный модуль вниз на одну строку в списке, изменяя последовательность выполнения плагинов во вкладке *Task list*.


Move plug-in up  – сдвигает выбранный модуль вверх на одну строку в списке, изменяя последовательность выполнения плагинов во вкладке *Task list*.

Delete plug-in  – удаляет выбранный плагин из списка во вкладке *Tasklist*.

Import task list  – считывает с диска (.СТТ файл) список плагинов и показывает их во вкладке *Task list*.

Export task list  – сохраняет на диске(.СТТ файл) список подключаемых модулей, показанных во вкладке *Task list*.

Plug-in configuration  – показывает диалог настройки выделенного плагина.

About plug-in  – показывает диалог с информацией о выбранном плагине.

Plug-in help  – показывает окно помощи для выбранного модуля.


Batch manager  – запускает еще один экземпляр ПО СТАп в режиме пакетной обработки, и посылает на него текущий список операций из *Task list* – каждый плагин сохраняет свою конфигурацию, установленную в настоящее время.




Image preview  – режим просмотра в специальной обработке, просмотр полного исходного изображения.

Image inside ROI preview  – режим просмотра в специальной обработке, просмотр части изображения внутри текущего ROI.

ROI preview  – режим просмотра в специальной обработке, просмотр только текущих ROI, как бинаризованных изображений.

10.2. Пакетный режим обработки

В режиме пакетной обработки программа запускается как диалоговое окно, разделенное на два сегмента-верхний и нижний. Элементы управления отображаются в верхнем сегменте так же, как и элементы в панели Plug-Ins на странице специальной обработки. Над верхним окном имеются три вкладки:

Task list – показывает список операций, набранных из внутренних и внешних плагинов, которые будут применены к текущему набору данных в указанной последовательности (сверху вниз).

Internal– показывает список внутренних плагинов.

External– показывает список внешних плагинов загружаемых из каталога, *File/Preferences.../ Directories/ Plug-Indirectory*.

Для управления списком задач используются кнопки, расположенные справа от верхнего диалогового окна:

– добавляет выбранный модуль из вкладки *internal* или *external* в список плагинов в *Task list*.

– удаляет выделенный плагин из *Task list*.

– сдвигает выбранный модуль на строку вверх, изменяя последовательность выполнения плагинов в *Task list*.

– сдвигает выбранный модуль на строку вниз, изменяя последовательность выполнения плагинов в *Task list*.

–читает с диска список плагинов (.СТТ -файл) и показывает их в *Task list*.

Export – сохраняет на диск список плагинов показанных в *Task list*, плюс конфигурирует каждый плагин как .СТТ файл.

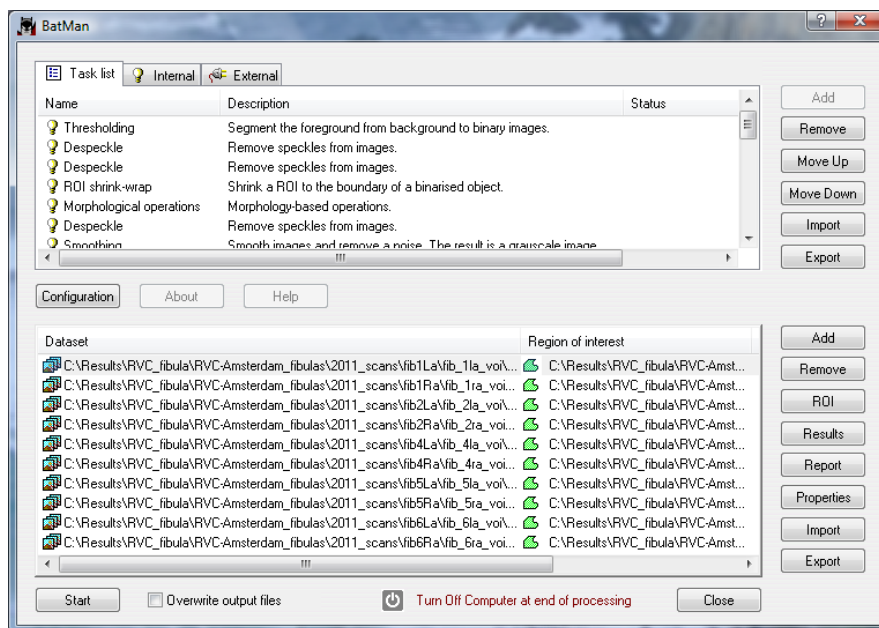


Рисунок 34 – Диалоговое окно пакетного режима обработки

В нижнем диалоговом окне находится список данных, подлежащих обработке, а в правой части этого окна – несколько кнопок для настройки списка и контроля пакетной обработки:

Add – добавляет в список набор данных. В открывающемся диалоговом окне могут быть выбраны любые изображения из набора данных.

Remove – удаляет из списка выделенный набор данных.

ROI – указывает на файл .ROI, который будет открыт при обработке соответствующих данных. Когда этот файл будет открыт, факт применения пороговых значений шкалы серого и вертикальных границ VOI определяется в настройках *File/Preferences/ Regionofinterest*.

Results – открывает файл результатов анализа для выбранного набора данных. Этот файл имеет тот же префикс, как и набор данных изображений с двойным расширением .Batman.txt.


Report – открывает файл отчета для выбранного набора данных. Этот файл имеет тот же префикс, как и набор данных изображений с двойным расширением `.batman.log`.

Properties – открывает диалоговое окно с информацией о данных, ROI и расположении файлов результатов и отчетов.


Import – Импорт списка ранее сохраненных данных в формате CTL.

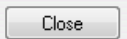
Export – Экспорт и сохранение списка загруженных данных, в формате CTL.

В нижней части окна *Batman*, с левой стороны, присутствуют следующие функции:

 – запускает пакетную обработку списка наборов данных в последовательности, изложенных в списке задач. Информация о ходе анализа отображается в колонке *Status* в верхнем окне заданий и в нижнем окне результатов.

Overwrite output files – выбор этого параметра приведет к перезаписи любого из предыдущих результатов расчетов *Batman* в любом из перечисленных наборов данных, сохраненного в формате по умолчанию [префикс]_batman.txt и [префикс]_batman.log, результатами текущего анализа.

 **Turn Off Computer at end of processing** – выбор этого параметра приведет к полному выключению ПК в конце работы по списку задач. Это может быть полезно, если вы запускаете пакетный расчет на несколько наборов данных, которые требуют работы на полную ночь или на выходные.

 – закрывает окно *Batman* и останавливается пакетную обработку, если она велась.

Task List состоит из трех столбцов, относящихся к каждой выбранной задаче:

Name – названия внутренних или внешних плагинов;

Description – описание задач, выполняемых плагином;

Status – текущее состояние плагина во время пакетной обработки, показанное в режиме реального времени;

Dataset list имеет пять колонок на каждый выбранный набор данных;

Dataset – путь и наименование файла данных, который будет открыт для анализа;

Region of interest – путь и имя файла .goi, применяемого к текущему набору данных при пакетном анализе;

Status – статус анализа данных, показываемый в режиме реального времени.

Results – Статус анализа данных, показан в режиме реального времени.

Report – путь и имя файла, в котором будет написан отчет.

Настройки *Batman*

Щелчок правой кнопкой мыши в левом верхнем углу *Batman* открывает окно настроек. Еще одна настройка находится во вкладке tools: «*apply global read-only CTAn preferences...*» означает, что при запуске *Batman* настройки будут взяты из предыдущей сессии основного блока CTAn; «*apply last used preferences in BatMan...*» – при новом запуске *Batman*, применять настройки предыдущей сессии.

11. Печать отчета

В диалоге, открываемом командой *File / Print Layout*, настраивается печать аналитического доклада (рис. 27). В верхней части этого диалогового окна отображается в уменьшенном виде страница отчета. В нижней части находятся элементы настройки страницы отчета.

В группе *Layout item* можно выбрать активный пункт распечатки из списка. Нажатием кнопки в меню *Layout dialog*, можно указать размер и ориентацию страницы, выбрать активный принтер и определить его свойства. Также можно ввести любой текст, который будет отображаться на распечатке страницы.

Кнопка **Print** посылает печатаемую страницу на активный принтер.

Кнопка **Reset All** сбрасывает позиции всех распечатанных объектов. Эта команда позволяет вернуть объекты в пределы видимой области страницы, если какой-либо причине, при распечатке, объекты находятся вне границ страницы.

Кнопка **OK** закрывает окно *Print layout* и сохраняет все изменения, в то время как **Cancel** кнопка закрывает окно без сохранения изменений.

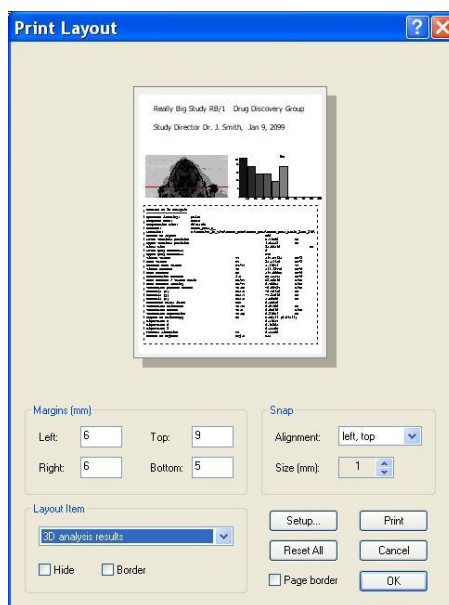


Рисунок 35 – Печать аналитического доклада

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Данная выпускная квалификационная работа заключается в разработке методики выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer». Объектом исследования является методика выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer».

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

Технико-экономическое обоснование НИР

При решении разного рода задач неразрушающего контроля для анализа внутренней структуры контролируемого объекта используют различные виды излучений: электроны, фотоны, ионы, нейтроны.

В отличие от рентгеновской дефектоскопии, с помощью которой только устанавливается наличие дефекта и его вид, рентгеновская компьютерная томография позволяет также определить ориентацию дефекта, его геометрическую форму и размеры.

Промышленная рентгеновская компьютерная томография (КТ) позволяет измерять в трёх координатах и локализовать даже малоконтрастные дефекты в литых деталях, например, пустоты и раковины, трещины. Анализ дефектов может выполняться как по нескольким секущим плоскостям, так и по объёмному изображению.

Планирование научно-исследовательской работы

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований [18].

Перечень этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Капранов Б.И.
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Капранов Б.И.
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Кузнецова И.С.
	4	Календарное планирование работ	Капранов Б.И., Кузнецова И.С.
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Создание процесса математического моделирования томографического сканирования	Капранов Б.И., Кузнецова И.С.
	6	Разработка методики	Кузнецова И.С.
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Кузнецова И.С.
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Кузнецова И.С.

Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (18)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (19)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [18].

Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным представлением проведения научных работ является построение ленточного графика в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (20)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (21)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Расчет коэффициента календарности:

$$T_{\text{кал}} = 365$$

$$T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}} = 118$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - 118} = 1,47$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t_{min} , чел- дни	t_{max} , чел- дни	$t_{\text{ож}}$, чел- дни	$T_{\text{рi}}$, раб.дн	$T_{\text{кi}}$, кал.дн
1	Капранов Б.И.	2	2	2	1	2
2	Капранов Б.И.	1	3	2	2	3
3	Кузнецова И.С.	15	25	19	19	28
4	Капранов Б.И., Кузнецова И.С.	3	5	4	2	3
5	Капранов Б.И., Кузнецова И.С.	28	36	31	16	23
6	Кузнецова И.С.	22	37	24	24	36
7	Кузнецова И.С.	5	12	8	8	12
8	Кузнецова И.С.	4	8	6	6	9
ИТОГО						116

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 8 позиций. Для построения таблицы временных показателей проведения НИР был рассчитан коэффициент календарности. С помощью данных показателей был разработан календарный - план график проведения НИР по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, что указывает на целесообразность проведения данного исследования.

Бюджет научного исследования

Затраты представляют собой все производственные формы потребления денег и измеримых в денежном измерении материальных ценностей, которые служат непосредственной производственной целью.

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}} \quad (22)$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции [18].

Для проведения научно-исследовательской работы требуются следующие виды оборудования: микрофокусный рентгеновский аппарат РАП-150МН, детектор матричный Shad-o-Vox-1769, поворотная платформа М-061.РD с контроллером С-863, 2 прецизионная линейная платформа М.403-82S с контроллером С-663, программное обеспечение SkyScan и компьютер. Все оборудование принадлежит центру реконструкции, поэтому личных материальных затрат нет.

Срок полезного использования каждого вида оборудования:

- 1) Микрофокусный рентгеновский аппарат РАП-150МН – по пятой группе (оборудование испытательное): 2,5 года.
- 2) Детектор матричный Shad-o-Vox-1769 – по пятой группе (оборудование испытательное): 2 года.
- 3) Поворотная платформа М-061.PD – по пятой группе (оборудование испытательное): 7 года.
- 4) Компьютер – по третьей группе (техника электронно-вычислительная): 5 лет.

Таблица 5 – Материальные затраты

Наименование	Единицы измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Затраты на материалы, (З_м), руб.
Микрофокусный рентгеновский аппарат РАП-150МН	Килограмм	1	764 тыс.	764 тыс.
Детектор матричный Shad-o-Vox-1769	Килограмм	1	1300 тыс.	1300 тыс.
Поворотная платформа М-061.PD	Шт	1	170 тыс.	170 тыс.
Компьютер	Шт	1	1000 тыс.	1000 тыс.
Итого				3 234 тыс.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{\text{ам.обор}}$, по следующей формуле

$$I_{\text{ам.обор}} = \left(\frac{T_{\text{исп.обор}}}{365} \right) \times K_{\text{обор}} \times H_a, \quad (23)$$

где $T_{\text{исп.обор}}$ – время использования оборудование;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{с.с.обор}}}, \quad (24)$$

где $T_{\text{с.с.обор}}$ – срок службы оборудования.

$$I_{\text{ам.рент.ап}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{рент.ап}} \cdot H_a = \left(\frac{1}{365} \right) \cdot 764000 \cdot \frac{1}{2,5} = 837,3 \text{ руб.},$$

$$I_{\text{ам.комп}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{комп}} \cdot H_a = \left(\frac{1}{365} \right) \cdot 1000000 \cdot \frac{1}{5} = 548 \text{ руб.},$$

$$I_{\text{ам.дет}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{дет}} \cdot H_a = \left(\frac{1}{365} \right) \cdot 1300000 \cdot \frac{1}{2} = 1780,8 \text{ руб.}$$

$$I_{\text{ам.пов.пл}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{пов.пл}} \cdot H_a = \left(\frac{1}{365} \right) \cdot 170000 \cdot \frac{1}{7} = 66,5 \text{ руб.}$$

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{ам.обор}} &= I_{\text{ам.рент.ап}} + I_{\text{ам.комп}} + I_{\text{ам.дет}} + I_{\text{ам.пов.пл}} \\ &= 837,3 + 548 + 1780,8 + 66,5 = 3232,6 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Основная заработная плата исполнителей темы

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;

- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;
- другие виды выплат.

Примем, что полный фонд заработной платы ($\Phi_{зп}$):

$$\Phi_{зп} = 28000 \text{руб.}$$

Отчисления на социальные нужды выражаются в виде единого социального налога, который включает в себя: обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования.

Единый социальный налог – 30%.

Рассчитываем отчисления на социальные нужды ($I_{соц.отч.}$):

$$I_{соц.отч.} = ЕСН = 0,3 \cdot \Phi_{зп} = 0,3 \cdot 28000 = 8400 \quad (25)$$

Накладные расходы используют на следующее:

- 1) затраты на текущий ремонт;
- 2) амортизацию основных производственных фондов;
- 3) затраты на охрану труда и пожарную безопасность.

Для проектных отделов накладные затраты составляют 200% от полного фонда заработной платы. Тогда:

$$I_{накл.расх.} = 2 \cdot \Phi_{зп} = 2 \cdot 28000 = 56000 \text{руб.}, \quad (26)$$

Рассчитываем себестоимость проекта ($K_{проекта}$).

$$K_{проекта} = I_{ам.обор} + \Phi_{зп} + I_{накл.расх} + I_{соц.отч} = 3232,6 + 28000 + 56000 + 8400 = 95632,6 \text{руб.} \quad (27)$$

Рассчитываем плановые накопления (ПР). Стоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$ПР = 0,3 \cdot K_{проекта} = 0,3 \cdot 95632,6 = 28689,8 \quad (28)$$

Рассчитываем стоимость проекта (Π).

$$\Pi = K_{проекта} + ПР = K_{проекта} + ПР = 95632,2 + 28689,8 = 124322,4 \quad (29)$$

Таблица 5 – Смета затрат на научно-исследовательскую работу

Виды затрат	Обозначение	Сумма затрат, руб.
Амортизация оборудования	$I_{ам,обор}$	3232,6
Затраты на оплату труда	ЗП	28000
Отчисления на социальные нужды	$I_{соц.отч}$	8400
Накладные расходы	$I_{накл.расх}$	56000
Себестоимость проекта	$K_{проекта}$	95632,6
Плановые накопления (прибыль)	ПР	28689,8
Стоимость проекта (цена)	Ц	124322,4

Исходя из расчетов и полученных результатов приведенных в таблице 5, можно сделать вывод, что данная научно исследовательская работа входит в обозначенные бюджетные ограничения, так как стоимость проекта равная 124322,4 рублей, меньше приблизительной суммы затрат равной 3,243 млн. рублей.

Оценка целесообразности исследования

Оценка научно-технического уровня следования

Для определения научно - технического уровня проекта, его научной ценности, технической значимости и эффективности необходимо, рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i * П_i, \quad (30)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

$П_i$ – количественная оценка i – го признака.

Таблица 6 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,8
Теоретический уровень	0,7
Возможность реализации	0,6

Таблица 7 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 8 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Разработка нового метода	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ	8
Разработка численных экспериментов	6
Элементарный анализ результатов исследования	3

Таблица 9 – Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Расчет НТУ:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * P_i, \quad (31)$$

где $k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,7$; $k_3 = 0,6$;

$P_1 = 9$; $P_2 = 6$; $P_3 = 4$;

$\text{НТУ} = 0,8*9+0,7*6+0,6*4 = 13,8$.

По полученным значениям коэффициент научно-технического уровня (НТУ) можно сказать о достаточно высоком научно - техническом уровне исследования, его научной ценности, технической значимости и эффективности.

Оценка возможных рисков

Произведем оценку рисков. Определение рисков является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков даст возможность избежать опасные факторы, которые негативно отражаются на внедрении в жизнь проекта.

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 10-14.

Таблица 10 – Социальные риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Низкая квалификация персонала	0	2	0,061	0
2	Непросвещенность предприятий о данном методе	50	4	0,168	8,928
3	Несоблюдение техники безопасности	25	6	0,23	6,25
4	Увеличение нагрузки на персонал	50	4	0,168	8,928
	Сумма		16	0,627	24,1

Таблица 11 – Экономические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Инфляция	100	2	0,029	1,960
2	Экономический кризис	25	3	0,049	0,980
3	Непредвиденные расходы в плане работ	25	5	0,126	5,862
4	Сложность выхода на мировой рынок	75	6	0,136	10,29
	Сумма		16	0,34	19,92

Таблица 12 – Технологические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Возможность поломки оборудования	25	6	0,24	5,25
2	Низкое качество поставленного оборудования	25	8	0,313	7,0357
	Сумма		14	0,553	12,2857

Таблица 13 – Научно-технические риски

№	Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
1	Развитие конкурентных методов	50	5	0,135	8,936
2	Отсутствие результата в установленные сроки	25	6	0,123	6,25
3	Несвоевременное патентование	25	8	0,176	3,657
Сумма			19	0,434	18,843

Таблица 14 – Общие риски

№ п/п	Риски	b_i	w_i	$b_i \cdot w_i$
1	Социальные	16	0,627	10,03
2	Экономические	16	0,34	5,44
3	Технологические	14	0,553	7,742
4	Научно-технические	19	0,434	8,246
Итого				31,458

Расчет рисков дает общую оценку в 31,458. Эта цифра говорит, что проект имеет право на жизнь, хотя и не лишен вероятных препятствий.

В экономическом разделе выпускной квалификационной работы было проведено планирование и составлены графики научно технического исследования. Всего требуется 116 рабочих дней на реализацию научно технического исследования. Составлена смета затрат на научно техническое исследование. Проведен расчет амортизационных вложений, расчет заработной платы, эксплуатационные и накладные расходы. Величина затрат на реализацию НТИ составила 124322,4 рубля.

Заключение

В результате исследования разработана методика выполнения операций анализа параметров объектов контроля на базе пакета «СТ-analyzer», программа моделирования радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта диаметром до 60 см.

В процессе исследования проводились:

- анализ сечений взаимодействия γ -квантов изотопа Co^{60} с материалом пиротехнических изделий;
- анализ закономерностей прохождения излучения от изотопа Co^{60} через изделия диаметром до 60 см;
- изучение процесса сбора проекционных данных;
- изучение программного пакета «СТ-analyzer»;
- анализ последовательности выполнения операций морфометрических измерений реконструированных изображений.

Список публикаций студента

1. Кузнецова И.С., Волчкова А.В. Методы неразрушающего контроля, используемые в ходе строительства резервуаров // Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», 3-8 октября, 2016 Томск, Россия.

2. Кузнецова И.С., Капранов Б.И. Математическое моделирование радоновских сумм для цилиндрического тест-объекта // Ползуновский вестник. – 2017. / Принято к публикации

Приложение А
(обязательное)

**Методика выполнения операций анализа параметров тест-объекта на
базе пакета «СТ-analyzer»**

Оглавление

Общая информация.....	3
1. Запуск программы.....	4
2. Порядок работы.....	4
2.1. Выбор изображения для дальнейшего анализа.....	4
2.2. Просмотр сечений объекта.....	5
3. Проведение количественного анализа	6
3.1 Выбор области объекта для анализа.....	6
3.2. Анализ, выбранной области изображения в автоматическом режиме.....	7
3.3. Анализ, выбранной области изображения в ручном режиме.....	8
3.4. Получение проекции максимальной интенсивности.....	8
3.5. Получение теневой проекции.....	9
3.6. Выбор области интереса.....	10
3.7. Выбор области объекта для анализа.....	10
3.8. Анализ, выбранных областей изображения.....	11
4. Создание 3D модели.....	12
5. Создание анимации сечений.....	13
6. Закрытие программы.....	13

Общая информация

Работой микротомографа управляет программа uCT. Прибор состоит из следующих функциональных блоков.

1) Аппарат рентгеновский микрофокусный РАП-150МН.

Название характеристики	Значение
Минимальный размер фокусного пятна рентгеновской трубки	50±100% мкм
Диапазон регулирования напряжения	20 – 150 кВ
Ток	100 мкА
Максимальная экспозиция	10000 с

2) Детектор матричный Shad-o-Box-1769

Название характеристики	Значение
Размер матрицы	1024 x 760 пикселей
Размер активной зоны	135 x 135 мм
Шаг пикселей	135 мкм
Динамический диапазон	4000:1
Время считывания с матрицы в память	540 мс
Время передачи полного изображения на ПК	0,5 с

3) Поворотная платформа M-061.PD с контроллером C-863.

Название характеристики	Значение
Диаметр платформы	100 мм
Диапазон угловых перемещений	> 360°
Минимальный шаг углового перемещения	17,5 мкрад (0,001°)
Люфт	200 мкрад
Точность поворотного позиционирования	50 мкрад
Максимальная скорость вращения	90 °/с


4) 2 прецизионная линейная платформа М.403-82S с контроллером С-663.

Название характеристики	Значение
Диапазон перемещения	0–200 мм
Минимальный шаг перемещения	0,2 мкм
Люфт	6 мкм
Точность повторного позиционирования	1 мкм
Максимальная скорость перемещения	3 мм/с

1. Запуск программы

Для запуска программы СТ-analyzer можно либо дважды кликнуть левой кнопкой мыши на иконке рабочего стола, либо в линейке задач выбрать Пуск – Программы – INK TPU – СТАп. На экране появится главное окно программы. Для того, чтобы начать работу в СТАп, необходимо открыть папку, хранящую изображения тест-объекта после реконструкции в программе NRecon. Сделать это можно несколькими способами:



– File – Open – выбрать папку, хранящую реконструированные изображения – выбрать изображение (например, A_recXXXX.bmp, где XXXX – номер сечения, а .bmp – расширение) – Открыть;







–  *Open image or dataset* или сочетанием клавиш Ctrl+O – выбрать папку, хранящую реконструированные изображения – выбрать изображение (например, A_recXXXX.bmp, где XXXX – номер сечения, а .bmp – расширение) – Открыть.

2. Порядок работы

В программе СТАп работа осуществляется с отдельными сечениями объекта.

2.1. Выбор изображения для дальнейшего анализа

После загрузки изображений в программу, необходимо, чтобы были нажаты следующие кнопки и открыты окна:  – *Volume rendering*,  –

Full volume,  – Toggle,  – Over,  – Show or hide dataset bar,  – Show or hide shadow projection,  – Show or hide palette bar. В окне  – Raw images необходимо выбрать нужное изображение, для проведения его дальнейшего морфометрического анализа (рис. 1).

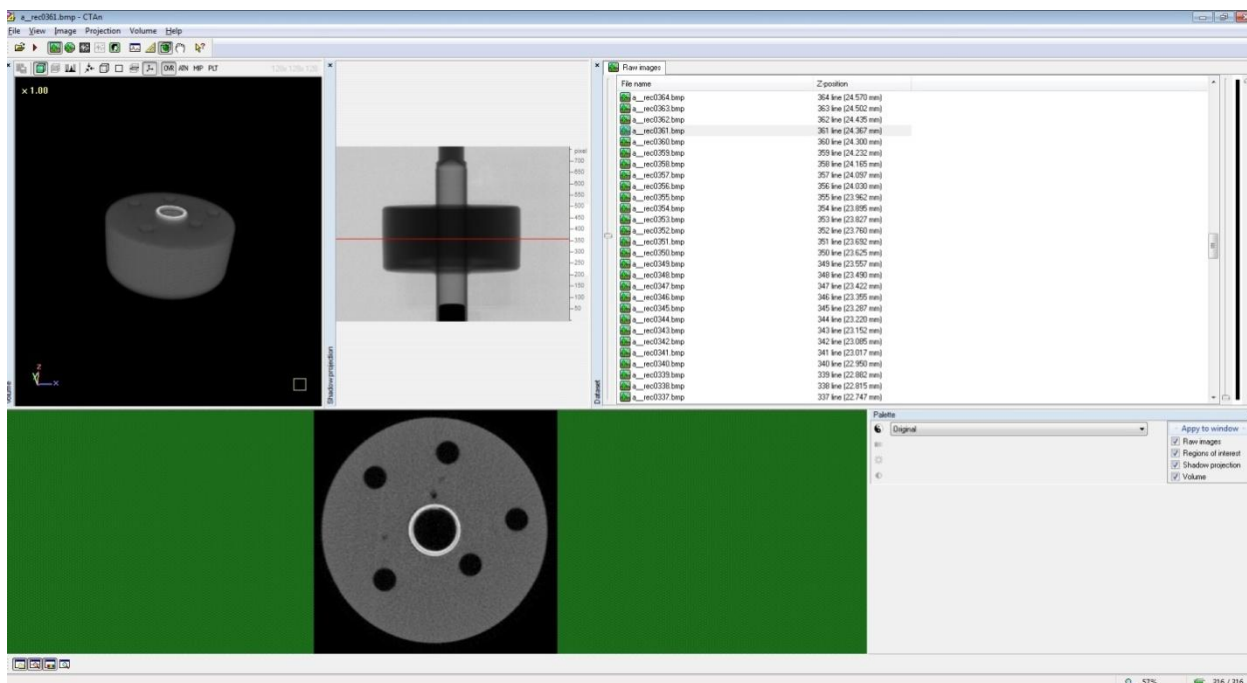



Рис. 1. Все активные окна программы СТAn после загрузки изображений

2.2. Просмотр сечений объекта

Кнопка  – *Toggle clip box* включает куб, в котором вписана модель. Нажав одновременно *Shift* и левую кнопку мыши, можно перемещать одну из граней куба, «отрезая» часть модели (рис. 2, 3, 4).

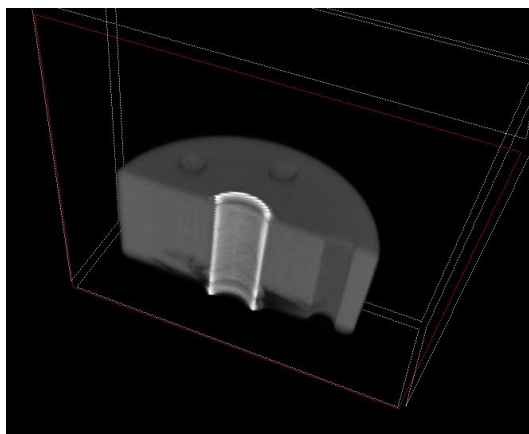


Рис. 2. 3D модель объекта с одной отсеченной частью с боку

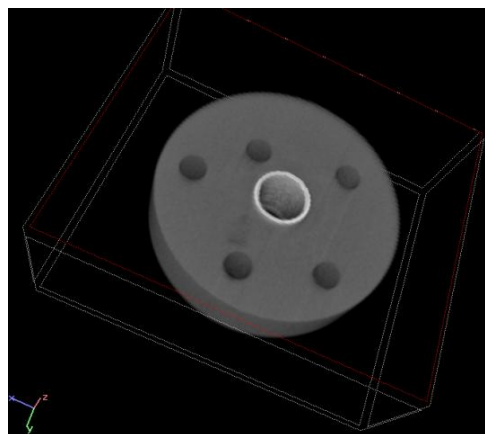


Рис. 3. 3D модель объекта с одной отсеченной частью сверху

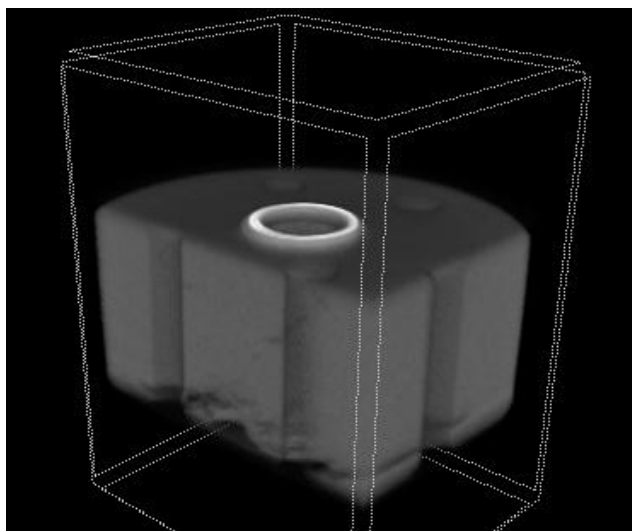




Рис. 4. 3D модель объекта с отсеченными частями с двух сторон

3. Проведение количественного анализа

3.1 Выбор области объекта для анализа

Кнопки  – *Binary selection* и  – *Show of hide profile bar* активируют бинаризацию изображения, т.к. только бинарные изображения могут быть проанализированы количественно, и окно гистограммы распределения яркости изображения. При помощи бегунков, обведенных на рис. 5 справа, расположенных сверху и снизу гистограммы, выделим те области объекта, параметры которых необходимо определить. Например, «тело» самого объекта.

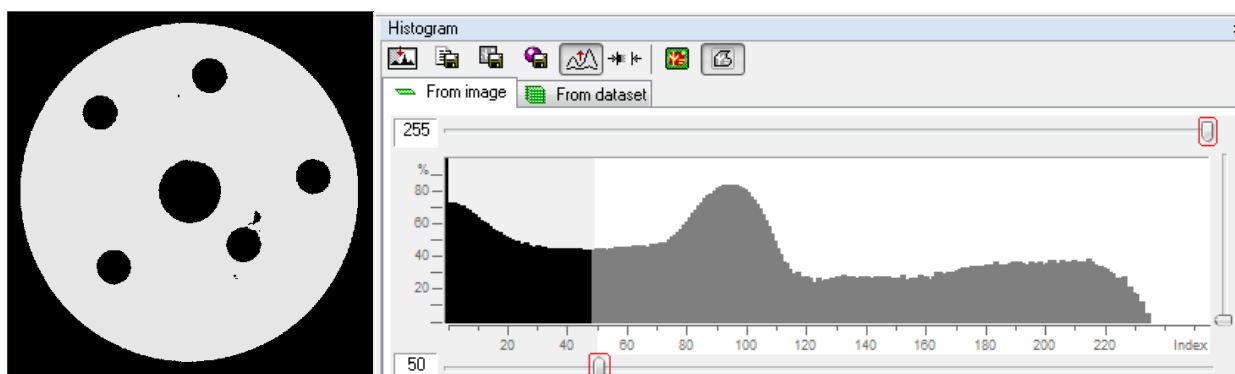





Рис. 5. Выделение области объекта для анализа

3.2. Анализ выбранной области изображения в автоматическом режиме

Активировать окно  – *Morphometry preview*, на открывшейся панели *Analysis* кнопку  – *Individual 2D object analysis*.


В открывшейся вкладке необходимо выбрать интересующие параметры для анализа объекта:

- *Area, mm²* – площадь;
- *Perimeter, mm* – периметр;
- *Roundness* – круглость или эллипсность;
- *Porosity, %* – пористость;
- *Orientation, °* – ориентация;
- *Eccentricity* – эксцентричность;
- *Major diameter, mm* – наибольший диаметр;
- *Minor diameter, mm* – наименьший диаметр;
- *Mean Thickness, mm* – средняя толщина.

Все произведенные измерения программа делает автоматически и записывает в таблицу (рис. 6), которую, при необходимости, можно распечатать отдельно ( – *Save results*).

Особое внимание нужно обратить на единицы измерения. Изменить их можно в меню *File – Preferences – General* – кнопка *Uni* позволяет выбрать необходимые единицы: например, *mm*.

3.3. Анализ выбранной области изображения в ручном режиме

Полученные результаты измерений в автоматическом режиме можно проверить вручную, используя  – *Measure angle, distance or path* (угломер). При помощи этого инструмента можно проводить измерения углов – *Angle*, линейные измерения – *Line*, путь – *Path*, координаты – *Coordinate* и площадь – *Area*.

Individual 2D object analysis

File name: a_rec0316.bmp
 Number of objects: 1 Note:

#	Area, mm ²	Perimeter, mm	Roundness	Porosity, %	Major diameter, mm	Minor diameter, mm
1	1185.07150	241.34371	0.90680	8.700	40.79159	40.63449





Рис. 6. Таблица, содержащая анализ выбранной области изображения

Кнопка *Autofill* сохраняет все измеренные значения автоматически, если такой необходимости нет, то после нужного измерения необходимо нажать *Add*. По завершении кнопка *Save* сохраняет измерения в отдельный файл, например, *a_rec_msr.txt* (рис. 7).



Рис. 7. Результат измерения диаметра объекта, полученный в ручном режиме

3.4. Получение проекции максимальной интенсивности

В окне  – *Raw images* необходимо выбрать  – *Show of hide profile bar* (в нижнем левом углу) и в появившемся окне выбрать  – *Maximum intensity projection*. В результате объект рассматривается послойно снизу вверх и пиксели с наибольшей интенсивностью записываются, составляя проекцию максимальной интенсивности (рис. 8), которую можно сохранить в отдельном файле, нажав кнопку .

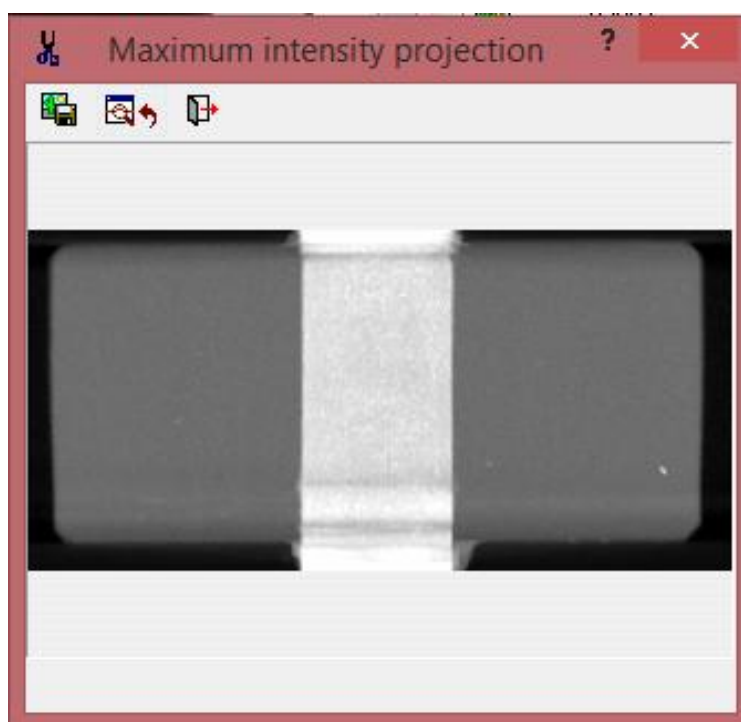




Рис. 8. Проекция максимальной интенсивности объекта контроля

3.5. Получение теневой проекции

В том же окне имеется кнопка  *Shadow projection* – получение теневой проекции. Принцип работы этой команды полностью противоположен той, которая описана в п. 3.4. В результате получается теневая проекция минимальной интенсивности (поры) (рис. 9), которую также можно сохранить в отдельном файле, нажав кнопку .

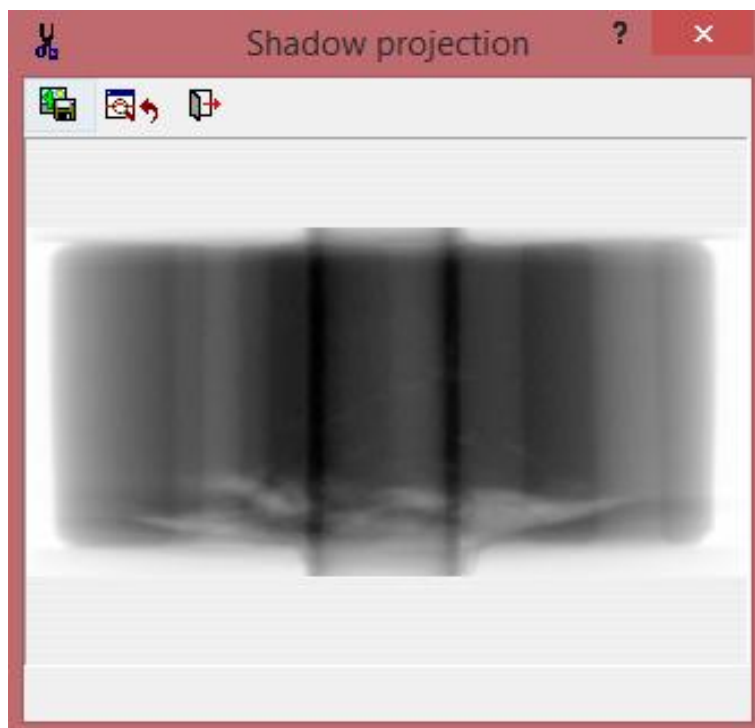





Рис. 9. Теневая проекция объекта

3.6. Выбор области интереса.

В окне  – *Regions of interest* на панели *ROI Tool bar* при нажатии кнопки  – *Round* (так как объект контроля имеет круглую форму) появляется область интереса. Все, что находится внутри данной области, является активным, снаружи – неактивным. Подстраиваем область интереса под размер объекта (рис. 10).

Кнопка  – *Volume of interest* активирует область интереса.

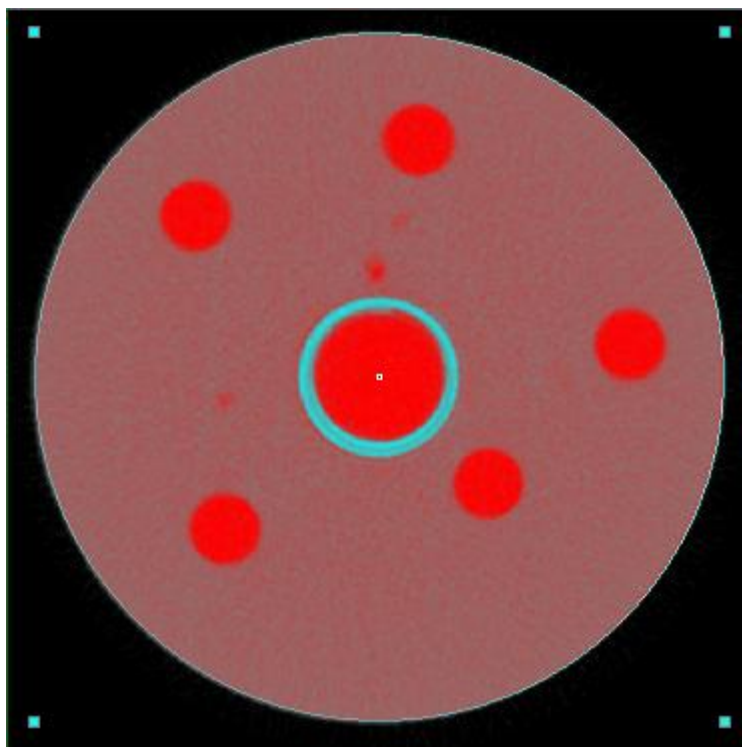




Рис. 10. Область интереса, наложенная на объект

3.7. Выбор области объекта для анализа

Кнопки  – *Binary selection* и  – *Show of hide histogram bar* активируют бинаризацию изображения и окно гистограммы распределения яркости изображения. При помощи бегунков, обведенных на рис. 11 справа, расположенных сверху и снизу гистограммы, выделим те области объекта, параметры которых необходимо определить (рис. 11). Например, отверстия и поры внутри объекта.

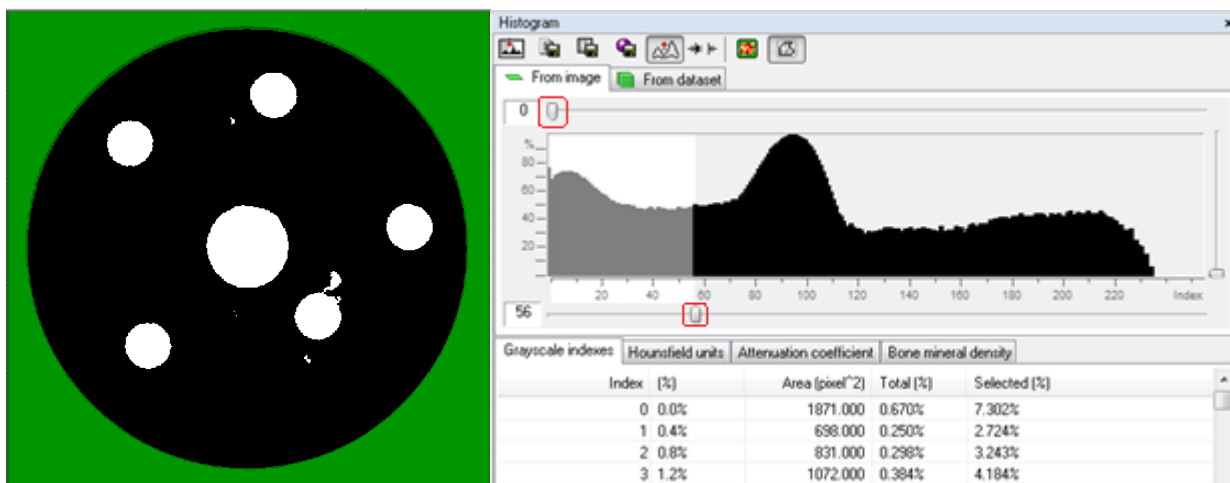




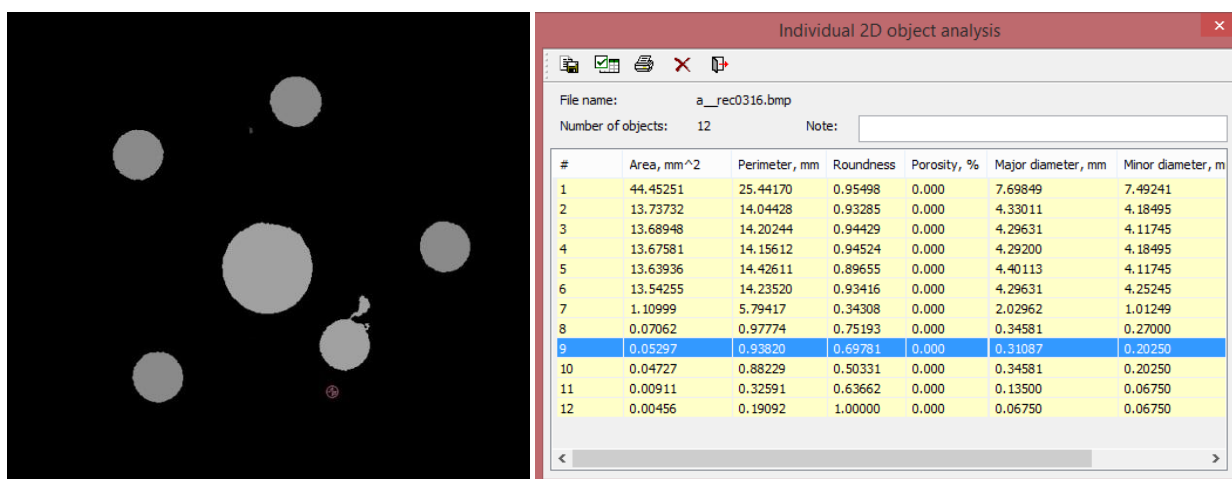
Рис. 11. Выделение области объекта для анализа

3.8. Анализ выбранных областей изображения

Активировать окно  – *Morphometry preview*, на открывшейся панели *Analysis* кнопку  – *Individual 2D object analysis*.

Повторить пункт 3.2, но над другой областью интереса объекта.

Так как область интереса состоит из нескольких объектов (отверстия и поры), то каждое из них имеет свой номер и отмечается «мишенью» на области интереса (рис. 12, а) при выделении объекта в таблице (рис. 12, б)



а) область интереса
изображения

б) таблица, содержащая результаты
анализа

Рис. 12. Анализ выбранных областей изображения

Во вкладке *Palette* выбрать *Color* (рис. 13), тогда выделенные области объекта будут окрашиваться в разные цвета, в зависимости от плотности (рис. 14).

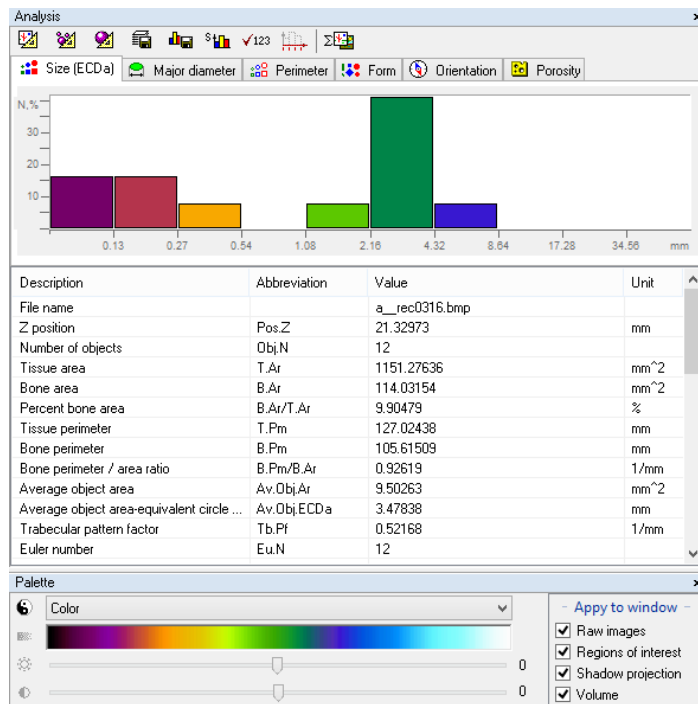


Рис. 13. Гистограмма распределения цвета в зависимости от плотности выделенных областей объекта

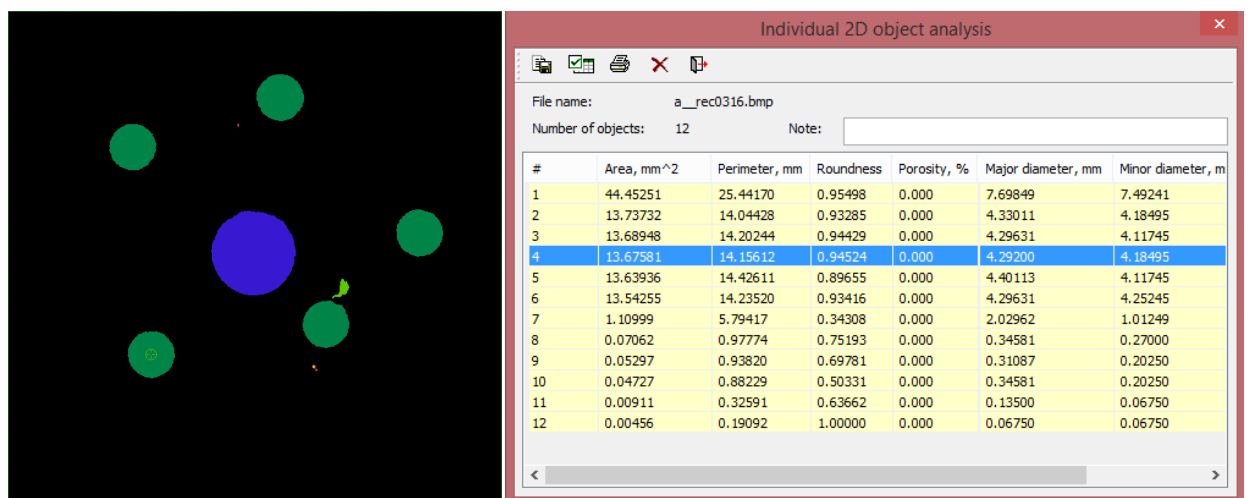






Рис. 14. Анализ выбранных областей изображения

4. Создание 3D модели

При создании трехмерной модели необходимо выполнить п. 3.6, для того, чтобы воздух, присутствующий вокруг объекта после реконструкции, не смоделировался.

Для лучшей визуализации все составляющие объекта моделируются отдельно: «тело» объекта, поры и отверстия (при необходимости), стержень, на котором закреплен объект.

Для того чтобы исключить лишние шумы или объекты, находящиеся вне объекта контроля, устанавливаем верхнюю и нижнюю границы объема интереса кнопками  Set the Top of Selection Ctrl+Home и  Set the Bottom of Selection Ctrl+End соответственно. Кнопка  активирует новые границы. Изменения будут видны в окне *Volume rendering*.

Кнопка  – *Create 3D model* создает 3D модель, которую можно загружать в CTvol (*Tuna файла – CTM files (.ctm)*) (рис. 15) для ее просмотра или различные программы типа AutoCAD, SolidWorks и т.д.

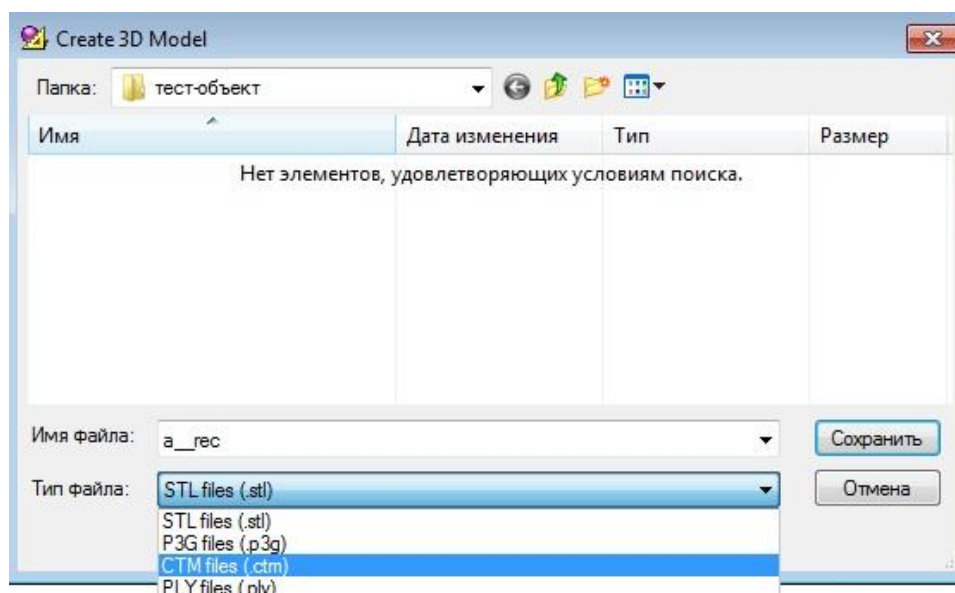


Рис. 15. Создание 3D модели

Все составные части для трехмерного моделирования имеют свое название и сохраняются отдельно друг от друга.

5. Создание анимации сечений

Для создания анимации всех сечений объекта выбрать в меню *File – Export – to movie file*, выбрать папку, в которую сохранится видео, тип файла – *AVI files (.avi)*. Если необходимо, выбрать сжатие видео.

6. Закрытие программы

После окончания работы программа может быть закрыта нажатием на красный крестик в правом верхнем углу экрана либо «Action» – «Exit».