

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
Отделение контроля и диагностики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы	
Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы	
УДК 620.179.152.1:539.1.074:519.23	

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кузнецова Ирина Сергеевна		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Федоров Е.М.	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.	Требования ФГОС (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6, ОПК-1, ОПК-2, ПК-12), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами, 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю,)
P2	Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, УК-6, ОПК-2, ОПК-3, ПК-6, ПК-8), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектронных, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации послепродажного обслуживания и сервиса, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
P3	Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требований информационной безопасности и корпоративной культуры.	Требования ФГОС (УК-5, УК-6, ОПК-1, ПК-1, ПК-3, ПК-4, ПК-9), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю.
P4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-8, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
P5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ПК-3, ПК-9, ПК-11), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
P6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-15), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п.1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектронных, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам, 29.006 Специалист в области проектирования и

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
		сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов
P7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (УК-2, УК-6, ОПК-3, ПК-7, ПК-8, ПК-10. ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК -15), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5. 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.016 Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов, 29.004 Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, 40.053 Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса)

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
Отделение школы (НОЦ) Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Федоров Е.М.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ71	Кузнецовой Ирине Сергеевне

Тема работы:

Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	От 07.11.2018 №9848/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <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>	Объект контроля – заготовки из углерод-углеродных композиционных материалов диаметром 160 мм и высотой 200 мм Анализируемые величины: определение распределения плотности в объектах Программный пакет для морфометрического анализа – CT-analyzer, ImageJ.
---	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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>	Аналитический обзор литературы, математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности, финансовый менеджмент, социальная ответственность, заключение по работе, раздел, выполненный на иностранном языке.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Графическое представление материала – PowerPoint.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Дашковский Анатолий Григорьевич
Раздел, выполненный на иностранном языке	Щеголихина Юлия Викторовна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Рентгеноская компьютерная томография (Röntgen-Computertomographie)	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кузнецова Ирина Сергеевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ71	Кузнецовой Ирине Сергеевне

Инженерная школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	При проведении исследований используется база лабораторий научного центра №40. В исследовании задействованы 2 человека: студент-исполнитель и научный руководитель. Приблизительная сумма проекта составляет 50000.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– Данная НИР новая, следовательно, норма и нормативы расходования ресурсов отсутствуют.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– Согласно п.3 п.п. 16 ст. 149 НК РФ данная НИР не подлежит налогообложению. – Отчисления во вне бюджетные фонды – 28% от ФОТ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Технико-экономическое обоснование НИР.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование работ по научно-техническому исследованию.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	– Оценка научно-технического уровня исследования. – Оценка рисков.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>График проведения и бюджет НИР (диаграмма Ганта)</i>
2. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кузнецова Ирина Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ71	Кузнецовой Ирине Сергеевне

Инженерная школа	ИШНКБ	Отделение школы	ОКД
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Помещение с естественной вентиляцией воздуха расположено на 2 этаже 2 эт. производственного корпуса. В помещении размещено оборудование: 10 ПК; площадь помещения составляет: 50 м ² , размещено 4 РМ.
2. Отбор законодательных и нормативных документов по теме	– Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123; – Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ вредных факторов	– общая система освещения; – микроклимат рабочей зоны; – электромагнитное излучение от компьютера.
2. Анализ опасных факторов	– электрический ток.
3. Охрана окружающей среды	– утилизация компьютерной техники.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	– возникновение возгорания (пожар) в помещении
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии	– специальные правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ71	Кузнецова Ирина Сергеевна		

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года, осенний /
 весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
04.02.2017	Составление и утверждение технического задания	5
07.02.2017	Аналитический обзор по литературным источникам	15
01.04.2017	Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности	35
06.05.2017	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
	Социальная ответственность	10
	Раздел, выполненный на иностранном языке	10
18.05.2017	Оценка эффективности полученных результатов	10
27.05.2017	Составление пояснительной записки	5
	Итого	100

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Федоров Е.М.	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 110 страница, 20 рисунков, 20 таблиц, 46 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: компьютерная томография, математическая обработка, ослабление излучения, композиционный материал, углерод-углеродный композиционный материал, плотность, распределение плотности.

Объектом исследования является математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы.

Цель работы – математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы.

В процессе исследования проводились:

- компьютерная томография изделий из углерод-углеродных композиционных материалов;
- обработка томографических данных путем среднестатистического осреднения в заданных объемах локальных значений измеренных условных единиц плотности;
- перевод значений условных единиц плотности в значения физической плотности.

В результате исследования разработана и проведена математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы, составлен отчет, содержащий результаты анализа распределения плотности по высоте образца, в цилиндрических объемах и секторах.

Для проведения морфометрического анализа использованы программы CT-analyzer и ImageJ.

Степень внедрения: проведена математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы. Результаты полного

подробного анализа распределения плотности по высоте, по радиусу и по углу для исследуемых образцов приведены в приложениях №№1-7 отчета по хоздоговору.

Область применения: томография заготовок из УУКМ типа 4КМС-Л для изготовления защитных конусов изделий ракетно-космической техники.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

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

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

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

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

Математическая обработка данных: вычисление статистических характеристик для количественных показателей либо экспериментально изучаемой совокупности объектов, либо исследуемых процессов.

Композитный материал (КМ): материалы, состоящие из нескольких слоев: слоя-наполнителя и слоя-матрицы, основы. Сочетание в одном материале слоев с разными свойствами позволяет получить новый продукт с качествами, отличными от характеристик каждого слоя в отдельности.

Оглавление

Введение.....	14
1. Обзор литературы.....	15
1.1 Рентгеновская компьютерная томография.....	15
1.1.1 История создания и развития рентгеновской компьютерной томографии	15
1.1.2 Этапы развития компьютерной томографии.....	16
1.1.3 Взаимодействие гамма-квантов с веществом	18
1.1.4 Шкала Хаунсфилда	26
1.2 Композиционные материалы. Особенности, применение	28
1.3 Углерод-углеродные композиционные материалы	33
2. Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности	37
2.1 Усреднение сечений изделий из УУКМ по высоте	38
2.2 Вторичное осреднение результатов измерений	56
2.3 Осреднение в цилиндрических объемах.....	56
2.4 Осреднение по секторам.....	67
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	75
3.1 Технико-экономическое обоснование НИР	76
3.2 Планирование научно-исследовательской работы	76
3.3 Определение трудоемкости выполнения работ	77
3.4 Разработка графика проведения научного исследования	78
3.5 Бюджет научного исследования	80
3.6 Оценка целесообразности исследования	85
3.7 Определение ресурсной эффективности	88
4. Социальная ответственность	90
4.1 Анализ вредных факторов.....	90
4.2 Анализ опасных факторов.....	97
4.3 Охрана окружающей среды	98
4.4 Защита в чрезвычайных ситуациях	99

4.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и социальной защиты работников на предприятии	102
Заключение	104
Список публикаций студента.....	105
Список использованных источников	106
Приложение А	111

Введение

Целью работы является математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильнопоглощающих объектах цилиндрической формы (заготовки из углерод-углеродных композиционных материалов диаметром 160 мм и высотой 200 мм, предоставленные АО «ГРЦ Макеева»).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведение компьютерной томографии изделий из углерод-углеродных композиционных материалов и обработка томографических данных путем среднестатистического осреднения в заданных объемах локальных значений измеренных условных единиц плотности;
- перевод значений условных единиц плотности в значения физической плотности.

При прохождении спускаемого блока через атмосферу к цели блок испытывает большую температурную нагрузку. Для тепловой защиты передней части блока устанавливается защитный конус из материала способного выдержать температуру до 4000 ° С. Такими материалами являются углерод-углеродный композиционные материалы УУКМ. Их отличием являются:

- низкая теплопроводность, теплоемкость, плотность;
- при высоких температурах сохраняются высокие прочностные характеристики (при температурах до 4000° С);
- высокая ударная вязкость и практическое отсутствие ползучести во всех допустимых температурных интервалах.

При изготовлении наконечника к нему предъявляются очень жесткие требования по однородности материала, поэтому, вопрос неразрушающего контроля однородности заготовок из углерод-углеродистого композиционного материала является актуальным. Анализ существующих методов контроля показал, что для этих целей может быть использована только рентгеновская компьютерная томография.

1. Обзор литературы

1.1 Рентгеновская компьютерная томография

1.1.1 История создания и развития рентгеновской компьютерной томографии

В процессе проведения рентгенографического контроля объекта, изображения внутреннего строения этого объекта наслаиваются друг на друга. Этот факт представляется значительным недостатком. Для его преодоления возникла идея проводить диагностику по нескольким рентгеновским снимкам, которые выполняются под разными ракурсами. По такому набору данных с применением специальной математической обработки можно оценить распределение коэффициента ослабления рентгеновского излучения внутри объекта. Коэффициент ослабления обычно пропорционален распределению плотности вещества.

Компьютерная томография стала возможной в начале 60-х годов с появлением современных вычислительных машин. Но лежащие в ее основе отдельные идеи, восходят к началу прошлого века. Физик, А. Кормак, выполнил первые эксперименты по применению томографии с реконструкцией. Ученым был разработан метод на основе измерений пропускания излучения для расчета поглощенной объектом дозы излучения. В 1972-1973 годах инженер, общепризнанный изобретатель компьютерной томографии, Г. Н. Хаунсфилд разработал сканер головного мозга – первую томографическую систему. Сканер позволял получать изображения с размером 80x80 пикселей с разрешением 3 мм. Данные для получения одного изображения измерялись примерно в течение 4-х с половиной минут. Такое высокое время регистрации первых томографов было обусловлено их конструкцией. В них синхронно передвигались вдоль рамы одна остронаправленная рентгеновская трубка и один детектор. Измерения обычно проводились при повороте рамы на угол в 1 градус, в 160-180 положениях трубки [1].

Благодаря рентгеновской компьютерной томографии послойные методы получения изображений получили широкое распространение. Компьютерная томография в большинстве областей лучевой диагностики стала существенным дополнением классической рентгенографии.

1.1.2 Этапы развития компьютерной томографии

В соответствии с актуальными потребностями радиологии и уровнем развития техники, технические задачи разработки компьютерных томографов постоянно менялись. С самого начала развития КТ особое внимание уделялось снижению стоимости, совершенствованию пользовательского интерфейса и повышению качества изображения. Все-таки основные усилия разработчиков были направлены на то, чтобы свести к минимуму в основном продолжительность исследования в целом, а не только время получения отдельного изображения.

Разработка компьютерных томографов началась с экспериментальной установки Хаунсфилда. Принципиальная схема такой установки во многом совпадала с той, что представлена на рисунке 1. Устройства такого типа называют томографами 1-ого поколения.

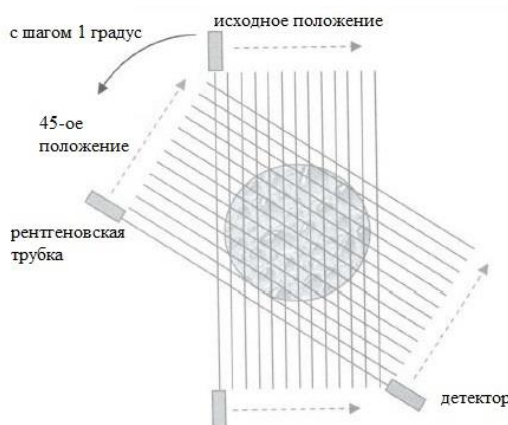


Рисунок 1 – Первое поколение КТ: перемещение/вращение

В томографах 2-го поколения (рисунок 2) используется практически та же схема, что и в томографах 1-го поколения. В них установлены дополнительные детекторы для повышения скорости исследования. Это

введение дало возможность использовать тонкий веерный пучок рентгеновского излучения, вместо ранее использованного узкого луча. Повороты и линейные перемещения такого томографа чередуются: смещение детектора и источника излучения происходит вдоль исследуемого объекта, после чего детектор и источник совершают поворот.

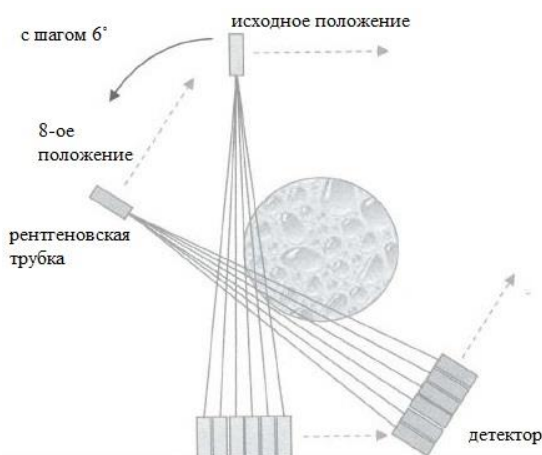


Рисунок 2 – Второе поколение КТ: перемещение/вращение

Достаточно широкий веерный пучок используется в томографах 3-го поколения в сочетании с дуговым детектором (рисунок 3). Такая система позволяет одновременно выполнять измерение для всех точек проекции. Вращательное движение в новых системах совершают только источник и детектор. В результате чего снизилась стоимость компонентов, повысились качество изображений и скорость исследования: на один срез она теперь составляла 20 с.

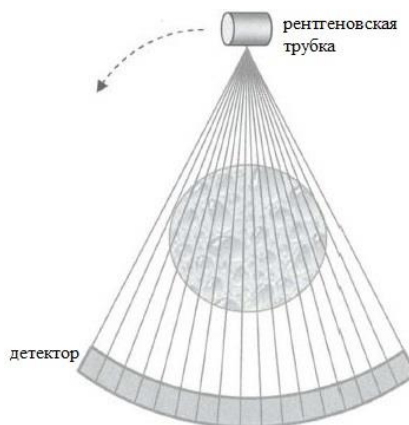


Рисунок 3 – Третье поколение КТ: постоянное вращение

Томографы четвертого поколения (рисунок 4) – системы с неподвижными замкнутыми в форме кольца детекторами, достаточно широким веерным пучком рентгеновского излучения. При этом детекторная система остается неподвижной, вращается только рентгеновская трубка.

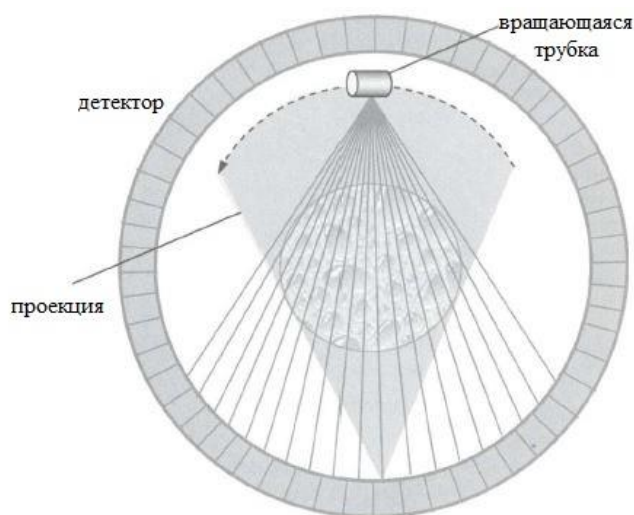


Рисунок 4 – Четвертое поколение КТ: постоянное вращение

В 5-ом поколении компьютерных томографов сканирование проводят лучом, управляемым электронной схемой. Движущихся элементов в этих томографах нет вообще. При всем том для формирования и управления лучом в таких системах требуются большие вакуумные трубки [2].

1.1.3 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 [3].

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 [4].

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:

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

Здесь $J(E)$ – чувствительность детектора, интегрирование производится по области, где $J(E)$ отлична от нуля [5].

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 [6].

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 [5].

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.

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, за счет чего электрон выбивается 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 [7].

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 [8].

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 [7].

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.

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 [9].

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 комpton-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 [10].

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 МэВ – 0,25 МэВ. Кванты же, обладающие малой энергией ($E_0 < 0,511$ 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 [11]:

$$I_{0s} = I_0 \frac{3\sigma_0}{16\pi r^2} \frac{1 + \cos^2 \theta_s}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta_s)]^3} \left\{ 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta_s)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta_s)](1 + \cos^2 \theta_s)} \right\}, \quad (7)$$

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 комптоновского 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 комптоновского рассеяния на единице пути, называется линейным коэффициентом комптоновского рассеяния σ (см^{-1}). Линейный коэффициент комптоновского рассеяния тем больше, чем больше электронов в слое, так как в этом случае большая доля рентгеновских γ -фотонов испытывает рассеяние [10].

Массовый коэффициент комптоновского рассеяния σ_p ($\text{см}^2/\text{г}$) характеризует относительное уменьшение потока рентгеновского или γ -излучения за счет комптоновского рассеяния при прохождении через слой вещества с единичной поверхностной плотностью [10].

С повышением энергии излучения коэффициент комптоновского рассеяния уменьшается в меньшей степени, чем коэффициент фотоэлектрического поглощения, и играет существенную роль вплоть до энергии порядка нескольких МэВ [9].

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 $\kappa(\text{см}^{-1})$. Для свинца, например, коэффициент κ начинает играть существенную роль при энергии порядка 2,5 МэВ, а для легких элементов (алюминий) – при энергиях порядка 10 МэВ [12].

В КТ измеряется и рассчитывается пространственное распределение линейного коэффициента ослабления $\mu(x,y)$.

В таблице 1 приведены сечения взаимодействия гамма-излучения с углеродом в диапазоне энергий от 0,01 МэВ до 1 МэВ. Приведены значения массовых коэффициентов ослабления для фотоэффекта τ , некогерентного рассеяния σ , полный массовый коэффициент ослабления μ_p и линейный коэффициент ослабления μ с учетом плотности изделия $\rho=1,8 \text{ г/см}^3$. Данная таблица представлена для анализа характеристик ослабления излучения с материалом объекта, а именно углеродом C^6

Таблица 1 – Сечения взаимодействия гамма-излучения с углеродом, $\rho=1,8 \text{ г/см}^3$.

Е, МэВ	σ	τ	$\mu_p, \text{см}^2/\text{г}$	$\mu, \text{см}^{-1}$
0,01	0,193	1,91	2,21	3,978
0,015	0,189	0,489	0,742	1,3356
0,02	0,186	0,192	0,419	0,7542
0,03	0,180	0,0491	0,250	0,45
0,04	0,174	0,0186	0,205	0,369
0,05	0,169	0,00887	0,186	0,3348
0,06	0,164	0,00481	0,175	0,315
0,08	0,155	0,00179	0,160	0,288
0,1	0,148	0,0000862	0,151	0,2718
0,15	0,133	0,000234	0,135	0,243
0,2	0,122	0,0000918	0,123	0,2214
0,3	0,106	-	0,107	0,1926
0,4	0,0953	-	0,0958	0,17244
0,5	0,0867	-	0,0867	0,15606
0,6	0,0802	-	0,0802	0,14436
0,8	0,0707	-	0,0707	0,12726
1,0	0,0637	-	0,0637	0,11466

1.1.4 Шкала Хаунсфилда

Физическая величина линейного коэффициента ослабления μ сама по себе 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 [13]. Поэтому вычисляемый коэффициент ослабления отображается в виде так называемых КТ-чисел – единиц плотности, которые рассчитываются относительно ослабления в воде (рисунок 5). В честь изобретателя компьютерной томографии, их называют единицами Хаунсфилда (HU) [1]. Единица плотности для произвольного объекта G с коэффициентом ослабления μ_G рассчитывается следующим образом:

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

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 [5].



Рисунок 5 – Шкала Хаунфилда. Единицы плотности (КТ-числа) характеризуют линейный коэффициент ослабления объекта относительно μ воды

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 [5]. 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.

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 [14]. 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 [5].

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 [5].

1.2 Композиционные материалы. Особенности, применение

Среди наиболее важных требований, предъявляемых к конструкциям современных летательных аппаратов (ЛА) и ракетно-космической техники, можно назвать минимальную массу, максимальную жесткость и прочность, максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации, высокую надежность. В значительной мере перечисленные требования обеспечиваются

выбором материала и совершенством технологии изготовления конструкции из данного материала [15].

Комплексу перечисленных требований больше всего удовлетворяют композиционные материалы (композиты) на основе современных углеродных, борных, органических и стеклянных волокон в сочетании с полимерными, металлическими, углеродными, керамическими и другими видами матриц.

Особенность композитов, как известно, в том, что они не являются материалом в классическом смысле этого слова, таким как, например, металлы, фактически это – конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия [16]. При этом композиты, выполненные из одного и того же наполнителя (волокна) и связующего по одинаковой технологии, могут иметь различные физико-механические характеристики, которые способны изменяться в широком диапазоне за счет выбора числа направлений армирования и объемных долей волокна в каждом направлении армирования.



Рисунок 6 – Применение углерод-углеродных композиционных материалов в различных областях народного хозяйства

В современных конструкциях широко используются композиты, где структура каркаса образована пространственным плетением нитей и жгутов, и композиты со стержневым армированием (свойства их определяются свойствами стержней, изготовленных из прямолинейных нитей и жгутов).

Углеродная матрица объединяет в одно целое армирующие элементы в композите, что позволяет наилучшим образом воспринимать различные внешние нагрузки. Определяющими факторами при выборе материала матрицы являются состав, структура и свойства каркаса [15].

Нестабильность технологических процессов изготовления конструкций из композиционных материалов, связанная с новизной и сложностью их реализации, ставит на первый план проблемы качества выпускаемой продукции. Для обеспечения контроля качества всего объема выпускаемой продукции применяются методы и средства неразрушающего контроля (НК), которые относятся к числу наиболее приоритетных направлений научно-технического прогресса.

При изготовлении силового каркаса необходимо контролировать нарушения заданной схемы армирования, а при заполнении каркаса матрицей требуется исследовать распределение плотности материала в объеме заготовки.

Изготовление конструкций из пространственно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) является сложным, длительным, многоступенчатым процессом и зависит от десятков технологических параметров, изменение любого из которых может привести к необратимым нарушениям заданной структуры или неравномерным распределениям плотности по объему изделия [16].

Наиболее информативные МНК для контроля композиционных материалов

Неразрушающие физические методы контроля (НФМК) в последнее время все более активно начинают применяться в производстве изделий из КМ. Они вполне удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к контролю, и

не имеют недостатков, присущих разрушающим и аналитическим методам. В соответствии с ГОСТ 18353-73, принято 10 видов неразрушающего контроля: акустический, капиллярный, магнитный, оптический, радиационный, радиоволновой, тепловой, течеисканием, электрический, электромагнитный (вихревых токов) [15].

Композиционные материалы – весьма сложный объект контроля, так как характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности ($0,02-2,0 \text{ г/см}^3$). Большинство видов композиционных материалов в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все композиты являются немагнитными материалами, поэтому методы контроля, используемые при дефектоскопии изделий из металла, например магнитные и токовихревые, в большинстве случаев не подходят для дефектоскопии изделий из композиционных материалов. Однако эти методы могут быть применены для толщинометрии таких изделий [17]. Не эффективны для контроля композитов также высокочастотные ультразвуковые методы, так как ультразвуковые волны с частотой выше 1 МГц либо невозможно ввести в контролируемую среду из-за их сильного поглощения и рассеяния и существенной шероховатости поверхности, либо они значительно ограничивают диапазон контролируемых значений толщины [15].

Радиационные методы более эффективны для контроля плотности или толщины композитов, чем для дефектоскопии, так как чувствительность их дефектоскопии данными методами при равнозначной энергии излучения в 3–4 раза ниже чувствительности дефектоскопии стали [17]. Следует также отметить, что для этого метода контроля композиты могут находиться как в

твердом, так и в пастообразном (полуфабрикат), жидком или гелеобразном (связующее) состояниях [15]. В таблице 2 приведена чувствительность радиационного метода контроля для разных толщин и разных плотностей изделий из УУКМ.

Таблица 2 – Чувствительность радиационного метода контроля

Толщина просвечиваемого УУКМ, мм		Напряжение на рентгеновской трубке, кВ
$\rho=0,5 \text{ г/см}^3$	$\rho=1,8 \text{ г/см}^3$	
340	95	60
400	110	90
430	120	120
460	135	150
510	145	225
550	160	300

Некоторыми методами можно найти отклонения плотности, различные дефекты, другие методы представляют визуальную наглядность наличия дефекта. Но ни один из данных методов не решает вопрос определения распределения плотности по всему объему материала. Только благодаря развитию компьютерной томографии появилась возможность проводить данные измерения. Сам принцип работы томографии основан на том, чтобы получать информацию об ослаблении рентгеновского излучения в каждом элементарном объеме [15].

Методы просвечивания ионизирующими излучениями требуют доступа с обеих сторон детали. При этом с одной стороны находится источник излучения, а с другой – детектор.

1.3 Углерод-углеродные композиционные материалы

Углерод-углеродные композиционные материалы содержат углеродный армирующий элемент в виде дискретных волокон, непрерывных нитей или жгутов, войлоков, лент, тканей с плоским и объемным плетением, объемных каркасных структур. Волокна располагаются хаотически, одно-, двух- и трехнаправленно [18].

Углеродная матрица объединяет в одно целое армирующие элементы в композите, что позволяет наилучшим образом воспринимать различные внешние нагрузки. Определяющими факторами при выборе материала матрицы являются состав, структура и свойства кокса.

К числу специальных свойств относится низкая пористость, низкий коэффициент термического расширения, сохранение стабильной структуры и свойств, а также размеров изделий при нагревах до 4000°C и охлаждении, высокие механические свойства, а также хорошая электропроводность. Основное применение УУКМ находят в изделиях, которые работают при температурах выше 1200°C .

Основные свойства УУКМ

По характеру свойств УУКМ относится к композитам с керамической матрицей, но отличается способом получения. Армирующая часть углерод-углеродного композита находится в частично кристаллической форме графита, матричная часть обычно аморфна. В отличие от большинства композитов с керамической матрицей при высоких температурах этот материал подвержен окислению [19]. Чтобы предохранить его от окисления, на поверхность обычно наносят тонкий слой керамики [18].

Основные свойства УУКМ, обуславливающие их применение в таких областях как авиация и космонавтика, металлургия, машиностроение, реакторостроение, медицина являются термическая стойкость и ударная прочность. Прочность УУКМ может быть в 5 -10 раз выше, чем у графита, их высокая температуростойкость сочетается с малой плотностью (от $1,35\cdot 10^{-3}$ до

$2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³), высокими прочностью и модулем упругости, стойкостью к тепловому удару.

Свойства УУКМ изменяются в широком диапазоне, так как определяется многими факторами: свойством армирующего наполнителя и природой матрицы, степенью наполнения, взаимодействием на границе раздела наполнитель - матрица, условиями пропитки, отверждения, карбонизации, графитизации, геометрией армирования и др.

В зависимости от температуры эксплуатации изделия из УУКМ проявляют разнообразные механические свойства. Для УУКМ в отличие от других материалов характерно улучшение некоторых механических характеристик с повышением температуры [19].

Методы получения и области применения УУКМ

Изделия из однонаправленно-, перекрестно- и хаотически армированных углеродуглеродных композитов получают карбонизацией углепластиков при температуре около 1000°C или уплотнением пористой углеродной матрицы с помощью повторяющихся процессов пропитки волокон термореактивными смолами с последующей карбонизацией [20].

Основные методы получения углерод-углеродного композита включают высокотемпературную обработку углепластиков и нанесение на углеродный волокнистый наполнитель пироуглерода, образующегося при разложении углеводородов [21]. Существуют жидкофазный, газофазный и комбинированный способы получения УУКМ [20].

Жидкофазный метод включает пропитку исходных армирующих углеродных каркасов специальным, например, фенолформальдегидным связующим (высокоуглеродсодержащими органическими смолами), которое отверждают, а затем карбонизируют при высокой температуре (2000°C и выше). Так как при этом материал становится пористым, его еще раз пропитывают связующим и опять карбонизируют. Эту операцию повторяют несколько раз. Другой способ – газофазный, включает химическое осаждение пироуглерода из

газовой фазы на армирующий каркас при высоких температурах и давлениях [21]. Перспективен и комбинированный метод, суть которого заключается в жидкофазной пропитке или газофазном уплотнении армирующего каркаса пироуглеродом с последующим доуплотнением газофазным или жидкофазным способами до получения необходимых свойств. Полученный материал может работать при температурах до 3000°C, если его поверхность защитить от окисления [20].

Первые стадии производства углерод-углеродного композита аналогичны изготовлению композита с полимерной матрицей. Углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, т.е. термореактивной смолой. Затем соответствующим образом собранные и пропитанные смолой волокна нагревают в инертной атмосфере. При этом происходит пиролиз смолы (обугливание, аналогичное процессу превращения дерева в древесный уголь) и остается углерод. Полученный композит снова под давлением пропитывают смолой и подвергают пиролизу. В результате многократного повторения процесса образуется прочный материал с минимальным числом внутренних пустот.

Уникальные свойства УУКМ – высокая температуростойкость в сочетании с малой плотностью, высокими прочностью и модулем упругости, стойкостью к тепловому удару, а также способностью устойчиво работать при температурах до 773К в окислительной среде и до 3273К в инертной среде и вакууме обусловили их широкое применение [21].

Области применения углерод-углеродных композитов чрезвычайно разнообразны: авиация и космонавтика, металлургия, машиностроение, реакторостроение, медицина и др.

Из УУКМ делают носовые обтекатели ракет, детали скоростных самолетов, подвергающиеся максимальным аэродинамическим нагрузкам, сопла ракетных двигателей и др.

Пресс-формы для горячего прессования тугоплавких металлов и сплавов из УУКМ обладают высокой прочностью (в 5 – 10 раз выше, чем у графита),

термостабильностью, высоким сопротивлением к термическому удару, малой массой, химической инертностью, способностью быстро охлаждаться и более длительным сроком эксплуатации [21].

Углерод-углеродные композиты обладают высокой радиационной стойкостью. Поскольку они по своим прочностным характеристикам превосходят все известные марки реакторных графитов, представляется перспективным их применение для узлов активной зоны высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Их применение позволяет значительно повысить надежность работы реактора.

3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

Данная выпускная квалификационная работа заключается в описании математической обработки первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы. Объектом исследования является математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы.

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.

3.1 Техничко-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 получить снимок определенного поперечного слоя (среза) объекта контроля. С помощью КТ можно увидеть структуры, которые не видны на обычных рентгенограммах. При обычном исследовании рентгеновские лучи проходят через объект и оставляют след на пленке, затем изображение на ней расшифровывается. Компьютерный томограф позволяет детально осмотреть внутреннюю структуру объекта контроля. В этом отличие его от рентгеновского снимка, представляющего собой проекционное изображение, на котором видны лишь тени, которые накладываются друг на друга. При КТ лучи попадают на специальную матрицу, передающую информацию в компьютер, который обрабатывает полученные данные о поглощении X-лучей объектом и выводит изображение на экран монитора. Таким образом, фиксируются мельчайшие изменения поглощаемости лучей, что, в свою очередь, и позволяет увидеть то, что не видно на обычном рентгеновском снимке

3.2 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 [27].

Перечень этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	4	Календарное планирование работ	Научный руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы	Научный руководитель, студент
Обобщение и оценка полученных результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	Студент
Оформление отчета по НИР	7	Составление пояснительной записки	Студент

3.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях 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 $t_{ожи}$ используется следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (12)$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{C_i}, \quad (13)$$

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

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

C_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [35].

3.4 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:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (14)$$

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

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

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (15)$$

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 5.

Таблица 5 – Временные показатели проведения научного исследования

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ				
		t_{min} , чел- дни	t_{max} , чел- дни	$t_{\text{ож}}$, чел- дни	$T_{\text{пр}}$, раб.дн	$T_{\text{к}}$, кал.дн
1	Руководитель	2	2	2	1	2
2	Руководитель	1	3	2	2	3
3	Студент	15	25	19	19	28
4	Руководитель, Студент	3	5	4	2	3
5	Руководитель, Студент	50	73	55	40	59
6	Студент	5	12	8	8	12
7	Студент	4	8	6	6	9
ИТОГО						116

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план. Общее содержание работ для проведения исследования составило 7 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 (таблица 6).

Из диаграммы видно, что работа над дипломным проектом началась в первой декаде февраля, а закончилась в последней декаде мая. Некоторые виды работ выполнялись параллельно, например, поиск и изучение материала по теме выполнялись одновременно с подбором, изучением и анализом требований нормативных документов. Так же можно увидеть, что один вид работ выполнялся несколькими исполнителями, например, работу по оценке эффективности полученных результатов студент и научный руководитель выполняли совместно.

3.5 Бюджет научного исследования

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

При планировании бюджета научно-техническое исследование должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (16)$$

где, m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м^2 и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./ м^2 и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы в пределах 15-25%.

Таблица 6 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				ян-варь 2019			фев-раль 2019			март 2019			апрель 2019			май 2019		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2															
2	Выбор направления исследований	Руководитель	3															
3	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	28															
4	Календарное планирование работ	Руководитель, Студент	3															
5	Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы	Руководитель, Студент	59															
6	Оценка эффективности полученных результатов	Студент	12															
7	Составление пояснительной записки	Студент	9															

 – руководитель;  – студент.

Таблица 7 - Матрица затрат на материалы

Наименование материала	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб	Затраты на материалы (З _м), руб.
Бумага для офисной техники (А4)	лист	150	2	253
Картридж для принтера	шт.	1	1250	1437,5
Интернет	М/бит (пакет)	1	500	575
Шариковая ручка	шт.	1	30	34,5
Итого				2300

Материальные затраты на выполнение научно-технического исследования составили 2300 рублей.

Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.

Для проведения работ по данной теме не требуются затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов).

Основная заработная плата

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

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (17)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 28%.

Отчисления во внебюджетные фонды составляет 7840 руб.

Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}} \quad (18)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, накладные расходы равны: $(2300 + 28000 + 7840) \cdot 0,16 = 6102,4$ руб.

Формирование бюджета затрат научного исследования

Расчетная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта (таблица 8).

Таблица 8 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Материальные затраты	2300	Пункт 3.5
Затраты на специальное оборудование	-	Отсутствуют
Затраты по основной заработной плате	28000	Пункт 3.5.1
Отчисления на социальные нужды	7840	Пункт 3.5.2
Накладные расходы	6102,4	Пункт 3.5.3
Бюджет затрат на НТИ	44242,4	Сумма

Бюджет затрат на выполнение научно-исследовательской работы составил 44242,4 рублей.

3.6 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:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot P_i, \quad (19)$$

где: k_i – весовой коэффициент i -го признака;

P_i – количественная оценка i -го признака.

Таблица 9 – Весовые коэффициенты НТУ

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

Таблица 10 – Шкала оценки новизны

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

Таблица 11 – 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 12 – 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 ($k_1 = 0,8$; $k_2 = 0,7$; $k_3 = 0,6$; $\Pi_1 = 9$; $\Pi_2 = 6$; $\Pi_3 = 4$):

$$HTU = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i = 0,8 \cdot 9 + 0,7 \cdot 6 + 0,6 \cdot 4 = 13,8;$$

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 13 – 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 14 – 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 15 – 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 16 – 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 17 – 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. Величина затрат на реализацию НТИ составила 44242,4 рубля.

3.7 Определение ресурсной эффективности

На данном этапе требуется определить показатели ресурсной эффективности данной разработки. В таблице 18 представлена сравнительная оценка характеристик трёх вариантов исполнения проекта. Первый вариант (текущий проект) это математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности в сильно поглощающих объектах цилиндрической формы используя две основные программы: ST-Analyzer и ImageJ. Второй вариант (аналог 1) представляет собой ту же систему с ПК, но обработка полностью осуществляется в одной из программ. Третий вариант (аналог 2) представляет собой все вычисления вручную, используя программный пакет Microsoft для отображения результатов обработки.

Интегральный показатель ресурсоэффективности для текущего проекта:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 = 4,8.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 1:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4 = 3,6.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога 2:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i = 0,2 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 2 + 0,25 \cdot 3 = 2,7.$$

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5	4	2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	3
3. Помехоустойчивость	0,1	5	3	2
4. Энергосбережение	0,1	3	3	5
5. Надёжность	0,2	5	3	2
6. Материалоёмкость	0,25	5	4	3
Итого:	1	28	21	17

Основываясь на полученных результатах расчётов, можно сделать вывод, что наибольшей ресурсной эффективностью обладает текущий вариант проекта.

Список публикаций студента

1. Кузнецова И.С. Математическое моделирование радоновских сумм тест-объекта // Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», 9-14 октября, 2017 Томск, Россия.

2. Mathematical modeling of tomographic scanning of cylindrically shaped test objects [Electronic resource] / B. I. Kapranov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 363 : Cognitive Robotics. — [012015, 7 p.]. — Title screen. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/363/1/012015>
<http://earchive.tpu.ru/handle/11683/51795>

3. Кузнецова И.С. Математическая обработка первичных томографических данных для определения распределения плотности по объему изделий цилиндрической формы из УУКМ // Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», 8-13 октября, 2018 Томск, Россия.