

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт Неразрушающего контроля
Направление подготовки Приборостроение
Кафедра ФМПК

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Импульсный тепловой контроль изделий авиакосмической техники
УДК <u>620.179.13</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Люй Цзинь Е		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимов Е.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФМПК	Суржиков А.П.	Д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или
	Профессиональные компетенции	
P1	Способность совершенствовать и повышать свой интеллектуальный и общекультурный уровень и специальные знания в области математических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;	Требования ФГОС (ОК-1, Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способность адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения коммуникативных задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.	Требования ФГОС (ОК 7, Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-4,50 Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности в областях контроля качества продукции предприятий измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не	Требования ФГОС (ОК-2, ОК—6, ОК-3) Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Умение использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в комплексной инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя стандартные пакеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении.	Требования ФГОС (ПК 1, ПК 10), Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические.	Требования ФГОС (ПК-15,ПК-4,ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.	Требования ФГОС (ПК-10,ПК 7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Умение разрабатывать методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по анализу, синтезу и оптимизации методов измерения контроля и диагностики, используемых в приборостроении; способность разработать и проводить оптимизацию натурных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности и пользоваться правами на объекты интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ПК-16,ПК-23,ПК-25) ПК-2,26,27,28), Критерий 5 АИОР (п.2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Умение организовывать современное метрологическое обеспечение технологических процессов производства приборных систем и разрабатывать новые методы контроля качества выпускаемой продукции и технологических процессов; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.	Требования ФГОС (ПК-18; ПК-19) Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.	Требования ФГОС (ПК-10; ПК-21, ПК-22) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Способность формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ПК-20,ПК-14,ПК-24) Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Неразрушающего контроля

Направление подготовки Приборостроение

Кафедра ФМПК

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФМПК

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

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Люй Цзинь Е

Тема работы:

Импульсный тепловой контроль изделий авиакосмической техники

Утверждена приказом директора (дата, номер)

01.12.2016, 10296/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Композитные материалы для авиакосмической техники. Применение вейвлет-преобразований для улучшения выявляемости дефектов.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

(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).

1. Материалы и изделия в авиакосмической технике.
2. Аппаратура для активных методов теплового контроля.
3. Методы обработки последовательностей термограмм.
4. Экспериментальные исследования.
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.
6. Социальная ответственность.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко В.С.
Социальная ответственность	Анищенко Ю.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.2015
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Якимов Е.В.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Люй Цзинь Е		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Люй Цзинь Е

Институт	ИНК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведение НИ с позиции ресурсоэффективности и	Определение потенциального потребителя результатов исследования, определение возможных альтернатив проведения научных исследований
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование этапов работы, расчет бюджета
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности	Оценка сравнительной эффективности проекта
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Сегментирование рынка	
2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений	
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Люй Цзинь Е		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5Б	Люй Цзинь Е

Институт	НК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Объект исследования: методы обработки последовательностей термограмм. Оборудование для проведения исследований: тепловизор; галогеновые лампы; компьютер; блок управления
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Вредные факторы: -повышение уровень электромагнитного и электростатического полей. -повышенный уровень шума. -повышенная температура внешней среды. Опасные факторы: -опасность поражения электрическим током. -ожоги при контакте с галогеновой лампой.
2. Экологическая безопасность	Анализ влияния на литосферу.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; разработка превентивных мер по предупреждению ЧС.	Вероятны следующие ЧС: пожар.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	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	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5Б	Люй Цзинье		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 102 с., 53 рис., 25 табл., 30 источников, 1 прил.

Ключевые слова: дефекты, тепловизор, термограмм, активный тепловой контроля.

Объектом исследования является (ются) композитные материалы

Цель работы – обработка термограмм методами вейвлет-анализа с помощью программы "Thermofit Pro". Сравнить методы обработки последовательностей с помощью вычисления отношений сигнал/шум(SNR для каждого дефекта).

В данной работе проводилось исследование методами активного теплового контроля изделия из стеклопластика и применялись цифровые методы обработки последовательностей термограмм на основе вейвлет-преобразований.

В результате исследования были получены изображения различными методами обработки последовательности и определены значения сигнал/шум(SNR).

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: в работе использовались тепловой дефектокоп в лаб.34 ИНК, программные продукты лаб.34 (NEC Researcher, Thermofit Pro) и объекты котроля, выполненные из стеклопластика.

Степень внедрения: на уровне исследований в лаборатории

Область применения: контроль изделий авиакосмической техники

Экономическая эффективность/значимость работы повышение надежности изделий.

В будущем планируется продолжение работы в производстве

Содержание

Введение.....	12
1.Материалы и изделия в авиакосмической технике.....	14
1.1 Углепластик.....	14
1.2 Стеклопластик.....	15
1.3 Композиционные материалы системы углерод-углерод.....	16
1.4 Типы дефектов в композитах.....	18
2.Аппаратура используемых в ТК.....	20
2.1 Тепловизоры.....	20
2.1.1 Тепловизор Иртис 2000 С.....	22
2.1.2 Тепловизор NEC RS300SR(-S).....	24
2.2 Источники нагрева.....	26
2.3 Тепловые дефектоскопы.....	29
3.Методы контроля.....	32
3.1 Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева.....	32
3.2 Методы обработки последовательностей термограмм.....	33
3.3 Классические методы обработки последовательностей термограмм.....	36
3.3.1 Нормализация динамических термограмм.....	36
3.3.2 Метод главных компонент.....	38
3.3.3 Фурье-анализ.....	39
3.3.4 Вейвлет-преобразование.....	41
3.4 Вейвлет-анализ применительно к методам АТНК.....	42

3.4.1 Общие положения применения вейвлет-преобразования в тепловом контроле.....	42
3.4.2 Скалярные вейвлет-преобразования.....	45
3.4.3 Комплексные (векторные) вейвлет-преобразования.....	45
4.Экспериментальные исследования.....	47
4.1 Математический модель.....	47
4.2 Описание объекта контроля.....	48
4.3 Экспериментальные установки.....	48
4.4 Результаты эксперимента.....	50
4.5 Применение вейвлет-преобразование для обработки последовательности термограмм.....	52
4.5.1 Применение скалярного вейлет-преобразования.....	52
4.5.2 Применение векторного вейлет-преобразования (комплексный вейвлет-преобразование)	57
4.6 Выводы.....	65
5.Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	67
5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	67
5.2 SWOT-анализ.....	68
5.3 Инициация проекта.....	69
5.4 План проекта.....	71
5.5 Бюджет научного исследованиями.....	72
5.5.1 Специальное оборудование для научно-исследовательских работ.....	72

5.5.2 Основная заработная плата.....	73
5.5.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала и отчисление на социальные нужды.....	74
5.5.4 Накладные расходы.....	75
5.6 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	75
6. Социальная ответственность.....	78
6.1 Производственная безопасность.....	79
6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов при разработке устройства.....	79
6.2 Экологическая безопасность.....	83
6.3 Безопасность в ЧС.....	83
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	84
6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	84
6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	84
Заключение.....	87
Список использованных источников.....	88
Приложение А.	

Введение

Тепловые методы контроля (ТНК) являются незаменимыми при контроле материалов и изделий авиакосмической, военной и гражданской промышленности. Материалы и изделия, применяемые в вышеуказанных областях часто имеют сложную структуру и плохо поддаются многим видам неразрушающего контроля. Наилучшими свойствами обладают такие методы контроля, как ультразвуковой контроль и активный тепловой неразрушающий контроль (АТНК).

В данной работе будут рассмотрены различные аспекты цифровой обработки исходной информации, получаемой при АТНК для получения очищенных от шумов и искажений данных с целью проследующего построения дефектных карт изделий.

Ниже приведены области применения активного ТНК:

- дефекты клеевых соединений в многослойных конструкциях
- ИК-влажнометрия,
- дефекты в структурах композитов, в готовых панелях из композитных материалов,
- авиакосмическая индустрия,
- в теплозащитных покрытиях.

Кроме того, тепловые методы контроля применяются в следующих областях:

- Машиностроение - Термоволновая дефектоскопия антикоррозионных покрытий, тепловая толщинометрия пленок.
- Материаловедение - Тепловая диагностика напряженного состояния объектов на основе термоэластического эффекта.
- Лазерная техника - Контроль термонапряжений в лазерных кристаллах, ТФК квантронов, световой прочности элементов силовой оптики.
- Строительство - Контроль теплопроводности строительных материалов, защитных ограждений, обнаружение пустот, промоин.

- Энергетика - Тепловизионный контроль статоров, защитных покрытий, термоизоляции.
- Агрокомплекс - Контроль ТФК продуктов, дефектоскопия деталей с.х. техники.
- Нефтехимия - Термографический контроль уровня жидкостей в резервуарах.

1. Материалы и изделия в авиакосмической технике

1.1 Углепластик

Углепластики (или карбон, карбонопластики, от «carbon», «carbone» — углерод) — полимерные композиционные материалы из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Плотность — от 1450 кг/м³ до 2000 кг/м³.

Материалы отличаются высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче (по удельным характеристикам превосходит высокопрочную сталь, например 25ХГСА) [1].

Вследствие дороговизны (при экономии средств и отсутствии необходимости получения максимальных характеристик) этот материал обычно применяют в качестве усиливающих дополнений в основном материале конструкции.

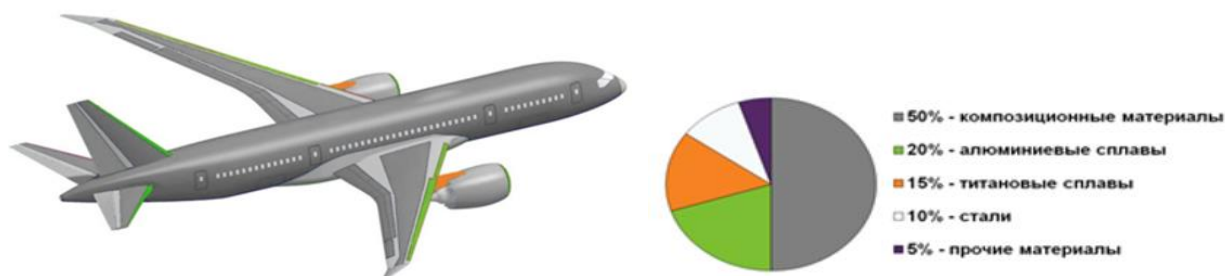


Рисунок 1.1 – Состав материалы сомолета



Рисунок 1.2 – Углеродные композитные материалы

При производстве углепластиков необходимо очень строго выдерживать технологические параметры, при нарушении которых прочностные свойства

изделий резко снижаются. Необходимы сложные и дорогостоящие меры контроля качества изделий (в том числе, ультразвуковая дефектоскопия, рентгеновская, токовихревая, оптическая голография и даже акустический контроль).

Другим серьёзным недостатком углепластиков является их низкая стойкость по отношению к ударным нагрузкам. Повреждения конструкций при ударах посторонними предметами (даже при падении инструмента на неё) в виде внутренних трещин и расслоений могут быть невидимы глазу, но приводят к снижению прочности; разрушение повреждённой ударами конструкции может произойти уже при относительной деформации, равной 0,5%.

1.2 Стеклопластик

Стеклопластик — материал с малым удельным весом и заданными свойствами, имеющий широкий спектр применения. Стеклопластики обладают очень низкой теплопроводностью (примерно, как у дерева), прочностью как у стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью полимеров, не обладая недостатками, присущими термопластам [2].

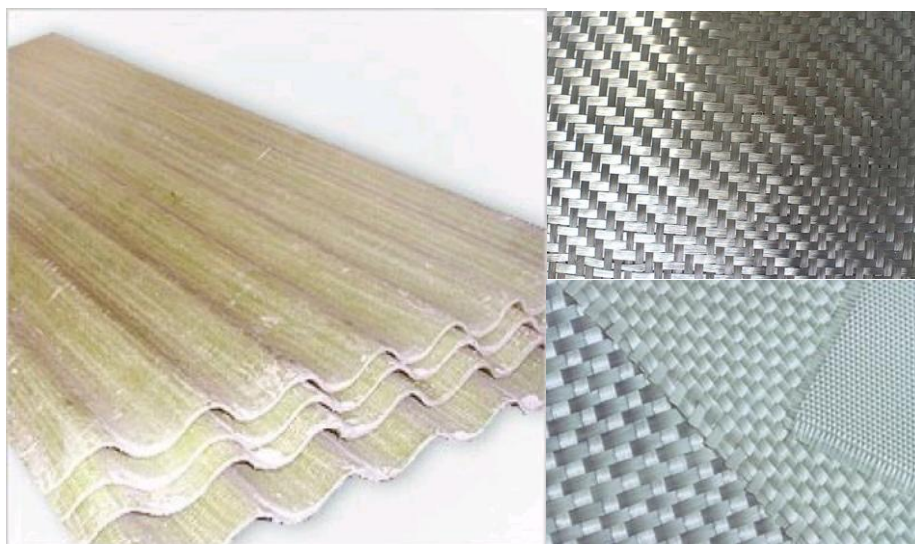


Рисунок 1.3 – Изделия из стеклопластика

Стеклопластики уступают стали по абсолютным значениям предела прочности, но в 3,5 раза легче её и превосходят сталь по удельной прочности. При изготовлении равнопрочных конструкций из стали и стеклопластика,

стеклопластиковая конструкция будет в несколько раз легче. Коэффициент линейного расширения стеклокомпозита близок к стеклу (составляет $11-13 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$), что делает его наиболее подходящим материалом для светопрозрачных конструкций [2]. Плотность стеклопластика, полученного путем прессования или намотки, составляет $1,8-2,0 \text{ г/см}^3$.

Стеклопластики являются одним из самых доступных и недорогих композиционных материалов. Основные затраты при производстве изделий из стеклопластика приходятся на технологическое оборудование и рабочую силу, затраты на которую велики за счет трудоёмкости и больших временных затрат на производство. Соответственно, на данный момент изделия из стеклопластика проигрывают по цене изделиям из металла из-за трудоёмкого и длительного процесса выклейки стеклопластиковых деталей, что вызывает большие затруднения при массовом производстве [3]. Наиболее выгодно использование стеклопластика при мелкосерийном производстве. Крупносерийное производство становится более выгодным при использовании вакуумного формования. Также выгодным может быть и контактное формование, в случае если цена рабочей силы невелика.

1.3 Композиционные материалы системы углерод-углерод

Композиционные материалы системы углерод-углерод впервые были созданы в начале 60-х годов прошлого столетия одновременно с появлением высокопрочных углеродных волокон.

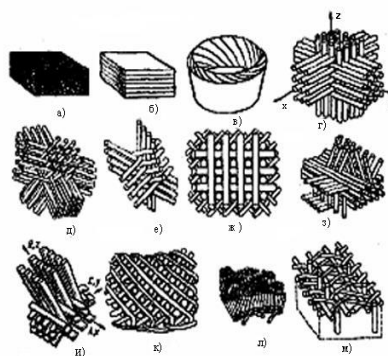


Рисунок 1.4 – Расположение волокон в УУКМ

Способ получения волокон из углерода – неплавкого и нерастворимого

вещества – подсказан впервые Эдисоном и Сваном. Им удалось, нагревая органические волокна в определенных условиях, не разрушать их, а превращать в углеродные [3]. Этот же принцип был использован в концептидесятих годов прошлого века, когда независимо друг от друга, в СССР, США и Японии развернулись исследования, положившие начало созданию промышленности углеродных волокнистых материалов (УВМ). За прошедшие годы в качестве исходного сырья для этих целей были испробованы практически все промышленные, а так же ряд специально полученных волокон. Однако большинство из них не удовлетворяло предъявленным требованиям, основные из которых – неплавкость или легкость ее придания, выход готового волокна и его высокие показатели.

Таблица 1.1 – Сравнительные механические свойства материалов [4]

Сравнительные механические свойства материалов [10-4]

Материал	Плотность 10^{-3} кг/м ³	Прочность при рас- тяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная разрывная прочность, МПа·м ³ /кг	Удельный модуль упругости, МПа·м ³ /кг
Стеклоуглерод	1,4	124	32	0,09	22,8
Поликристалличес- кий графит выс- шего качества	1,9	42	12	0,02	6,42
Углеродные волокна: высокопрочные высокомодульные	1,74	2900	215	1,66	123,6
	1,95	2200	290	1,12	200,0
КМУУ UD 3D	1,45	1350	175	0,93	120,0
	1,85	250	90	0,14	48,5
Угленпластик на эпоксидной смоле, UD	1,56	1400	130	0,9	83,0
Сталь	7,8	1100	210	0,14	27,0
Алюминиевые сплавы	2,8	420	77	0,15	23,3
	3,5	350	400	0,10	114,3

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) 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, принципиальные схемы расположения волокон в УУКМ представлены на рисунке 1.5.

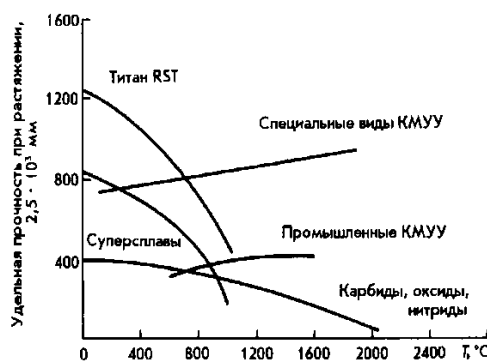


Рисунок 1.5 – Температурные зависимости удельной прочности при растяжении различных материалов

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 [5].

К числу специальных свойств КМУУ относится низкая пористость, низкий коэффициент термического расширения, сохранение стабильной структуры и свойств, а также размеров изделий при нагревах до 2000°C и охлаждении, высокие механические свойства, а также хорошая электропроводность. Основное применение КМУУ находят в изделиях, которые работают при температурах выше 1200° С.

Перечисленные преимущества КМУУ позволили успешно их применять в качестве тормозных дисков в авиационных тормозах, соплах ракетных двигателей, в защитных накладках крыльев космических челноков, пресс-формах, тиглях, роторов турбин, труб высокого давления, для подшипников скольжения, уплотнений и т.д. Особо надо отметить повышающийся интерес на использование КМУУ в электротехнике.

1.4 Типы дефектов в композитах

Дефекты и повреждения изделий из ПКМ могут находиться как в стенке детали, так и в зоне соединения деталей или в самом соединительном шве.

Таблица 1.2 – Дефекты и повреждения в изделиях из ПКМ

Дефекты и повреждения в изделиях из ПКМ

По месту расположения				
В стенке детали		В зоне соединения деталей	В соединительном шве	
Внутренние	Наружные			
По характеру				
Отклонения от заданных размеров		Нарушения целостности	Инородные включения	Отклонения в составе и структуре материала
Вмятина	Изменение формы и размеров			
По причине появления				
Производственные			Эксплуатационные	

К серьезным нарушениям целостности ПКМ можно отнести разрывы материала или его структурных элементов (волокон и матрицы) и пробоины. Менее серьезными дефектами можно считать царапины, но, учитывая большую чувствительность ПКМ к концентраторам напряжений, их устранению также нужно уделять должное внимание. Некоторые из указанных дефектов приведены на рисунке 1.6 [6].

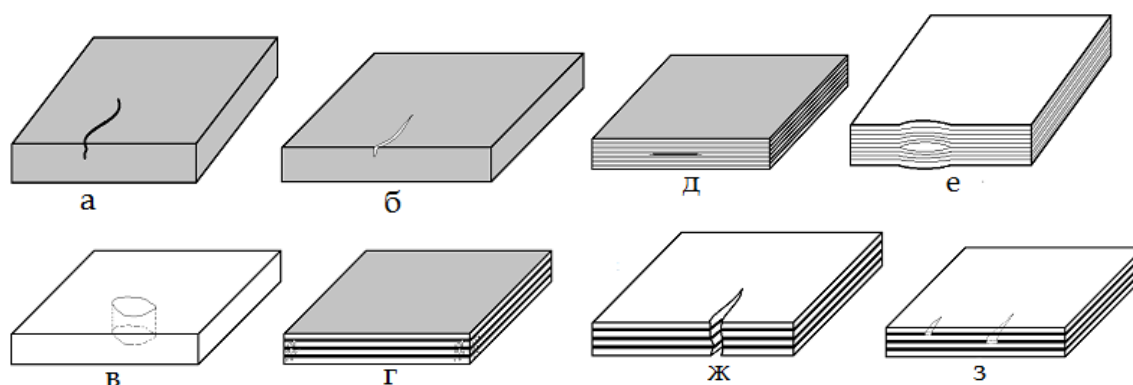


Рисунок 1.6 – Несплошности в стенке детали.(а – поверхностная трещина;б – царапина; в – пробоина; г – поры; д – расслоение без раскрытия трещины; е – расслоение с раскрытием трещины; ж – разрыв материала; з – разрыв наполнителя).

На рисунке 1.6, а, б, г, ж, з – этот тип дефектов обнаруживается АНТК с помощью нагрева ультразвуком им вибрацией. Графики д, е, в –дефекты обнаруживается обычным АНТК.

2. Аппаратура используемых в ТК

2.1 Тепловизоры

Тепловидение – это универсальный способ получения информации об окружающем мире и биологических объектах в нем. Тепловым излучением обладает любой объект, температура которого отлична от абсолютного нуля. Большинство процессов преобразования энергии (к ним относятся все известные физические и химические процессы) протекает с выделением или поглощением тепла. Так как средняя температура на Земле не высока, такие процессы проходят с малым удельным выделением тепла и при небольших температурах. Соответственно максимум энергии излучения этих процессов попадает в инфракрасный микроволновый диапазон [7].

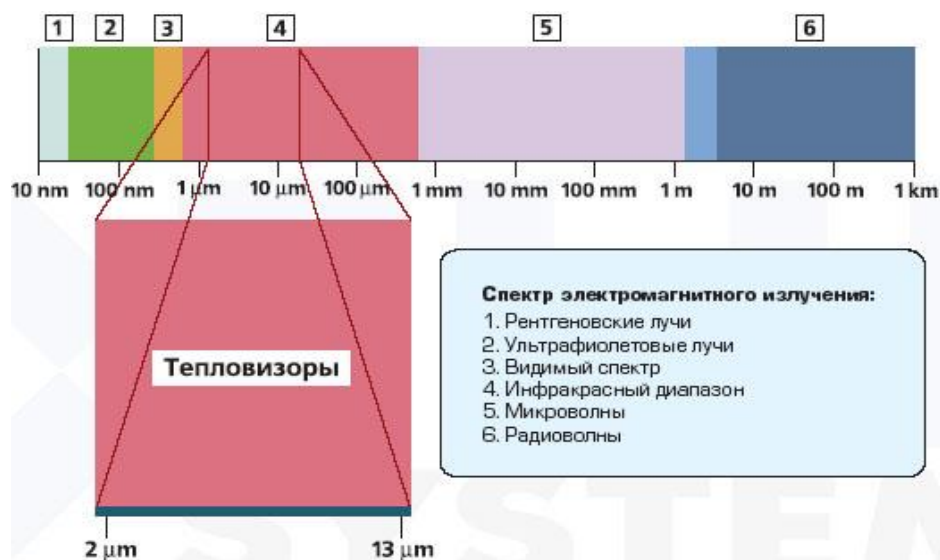


Рисунок 2.1 – Спектр электромагнитного излучения

Классификация тепловизоров.

Согласно классификации по техническим признакам тепловизионные системы подразделяются на:

- системы с линейным обзором, или впередсмотрящие (Forward-Looking Infrared Systems – FLIR), и системы с двухкоординатным обзором (staring), или собственно тепловизоры;
- оптико-механические (первое поколение) и использующие матричные

(FPA) детекторы (второе поколение);

- с охлаждаемым (с помощью жидкого азота, микрохолодильника Стирлинга или термоэлектрического микрохолодильника) или неохлаждаемым приемником ИК излучения;

- показывающие (imaging) или измерительные (radiometric);

Капланом была предложена «коммерческая» классификация тепловизоров по трем категориям, учитывающим технические параметры, области применения и стоимость [8].

К 1-й категории отнесены тепловизоры общего применения, использующие неохлаждаемые FPA приемники. Типичным представителем этой категории является прибор Thermovision 695 фирмы FLIR Systems (США) со следующими основными параметрами:

- температурное разрешение (NETD): 0.08°C при 30°C ;

- спектральный диапазон: 7.5-13 мкм;

- пространственное разрешение 1.3 мрад;

Ко 2-й категории отнесены тепловизоры с охлаждаемыми приемниками, например, из силицида платины (PtSi), работающие в средневолновом ИК диапазоне и предназначенные для измерения температуры пластмасс, в печах и т.п. Типичный представитель – прибор ThermoCam SC 1000 фирмы FLIR Systems (США) со следующими параметрами:

- температурное разрешение (NETD): 0.07°C при 30°C ;

- спектральный диапазон: 3.4-5 мкм;

- пространственное разрешение: 1.2 мрад;

Наконец, к 3-й категории отнесены длинноволновые высокоскоростные тепловизоры гибкой конфигурации, предназначенные для научных исследований, например, прибор ThermoCam SC 3000 фирмы FLIR Systems (США), обладающий следующими основными параметрами:

- температурное разрешение (NETD): 0.02°C при 30°C ;

- спектральный диапазон: 8-9 мкм;

- пространственное разрешение: 1.1 мрад;

Современные тепловизоры второго поколения реализуют модульный принцип построения и используют FPA приемники (охлаждаемые или неохлаждаемые). Оснащение модулей ИК объективами и телевизионными мониторами превращает их в показывающие тепловизоры. Введение измерительной функции уже требует значительных технических усилий, составляющих предмет ноу-хау фирм-изготовителей, в особенности это относится к системам с неохлаждаемыми фотоприемными матрицами.

2.1.1 Тепловизор Иртис 2000 С

Термограф ИРТИС-2000 С (производство Россия) представляет собой прецизионный оптико-механический сканирующий инфракрасный прибор для визуализации и измерения тепловых полей (Рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Внешний вид тепловизора Иртис 2000 С

Термограф ИРТИС 2000 С внесен в Госреестр и является средством измерения [9].

Достоинства:

- Высокая чувствительность и стабильность характеристик;
- Оптимальное соотношение функциональных возможностей и цены;
- Портативность, мобильность;
- Широкий спектр решаемых задач;

Термограф ИРТИС 2000 С разработан на основе 30-летнего опыта работы в области создания ИК-систем и с учетом требований, предъявляемых к

мобильной аппаратуре, используемой на предприятиях энергетики, топливно-энергетического, химического и нефтегазового комплексов, коммунального хозяйства, в строительстве, медицине и в других областях.

Принцип работы ИРТИС-2000 С основан на сканировании температурного излучения в поле зрения камеры оптико-механическим сканером с одноэлементным высокочувствительным ИК-приемником и трансформации этого излучения в электрический сигнал аналого-цифровым преобразователем.

Таблица 2.1 – Технические характеристики [10]

Спектральный диапазон	3-5 (8-12) мкм
Чувствительность к перепаду температур на уровне 30°C по всему полю зрения	0,05°C (0.02°C)
Поле зрения камеры	не менее 25x20 град. (12X10 град.)
Мгновенное поле зрения	не более 1.5 мрад
Диапазон измерений ИРТИС-2000СВ	-60°C - +300°C (+500°C)
Диапазон измерений ИРТИС-2000СН	-60°C - +1700°C
Погрешность измерения абсолютных температур по АЧТ по всему полю зрения	±1% или ±1°C от измеряемого диапазона
Диапазон рабочих температур	от -20°C до +50°C (от -40°C до +60°C)
Число элементов разложения по строке	320 (640)
Число строк в кадре	240 (480)
Время формирования кадра (три скорости сканирования)	Не более 0,8 сек., 1,6 сек., 3,2 сек.
Время автономной работы	Не мене 8 часов
Вес ИК- камеры ИРТИС-2000СВ	Не более 1.4 кг
Вес ИК- камеры ИРТИС-2000СН	Не более 1.4 кг
Габариты ИК-камеры ИРТИС –2000СВ	Не более 92x120x200 мм
Габариты ИК-камеры ИРТИС –2000СН	Не более 92x120x200 мм

2.1.2 Тепловизор NEC RS300SR(-S)

NEC R300SR(-S)



Рисунок 2.3 – Тепловизор NEC R300SR(-S)

Высокоточные и многофункциональные тепловизоры NEC InfReC R300SR-S и NEC InfReCR300SR. Модель тепловизора NEC InfReC R300SR идеально подходит для проведения мониторинга зданий, научных исследований и диагностики объектов электроэнергетики.

Прибор способен вести съемку в видовом и инфракрасном диапазонах. Кроме этого, NEC InfReCR300SR может осуществлять запись панорамных термограмм [11].

Модель профессионального типа относится к классу премиум – высокий уровень точности, возможность решения исследовательских и научных задач на самом высоком метрологическом уровне. Прибор может быть использован как для мониторинга зданий, так и для диагностики объектов в сфере электроэнергетики. Высокие технические характеристики устройства позволяют использовать его в авиационной и нефтегазовой отрасли.

Тепловизор NEC R300SR оборудован опцией получения термограмм (Суперразрешение), которая позволяет получать термограммы с разрешением 640x480 на базе последовательно полученных кадров. Еще одной важной функцией этой модели является опция панорамной съемки, с помощью которой, применяя «Суперразрешение» можно создать четыре последовательных кадра в один. Для большей наглядности и информативности в тепловизоре применяется функция совмещения изображений видимого и ИК с переменной прозрачностью.

Особенности NEC R300SR:

Изображение программного типа с тепловизора дает возможность произвести увеличение термограммы в четыре раза, осуществляя сканирование по вертикали и горизонтали.

Опция «суперразрешение» с возможностью получения панорманных термограмм значительно повышают эффективность работы.

Важной конструктивной особенностью тепловизора является наличие современного лицензионного ИК датчика на базе оксидов ванадия (разработан и создан в Японии).

Модель NEC R300SR-S имеет идеальное качество изображения и высокую разрешающую способность.

Высокий уровень точности - $\pm 1^{\circ}\text{C}$;

Высокий уровень температурной чувствительности – от 0.025°C ;

Разрешение пространственное - 0.6 мрад (режим суперразрешения).

Тепловизор NEC R300SR, цена и срок поставки которого вы можете узнать в нашей компании, отличается от аналогичных моделей мощной производительностью и высокими техническими характеристиками.

Таблица 2.2 – Технические характеристики тепловизора NEC R300SR [12]

	Тепловизор NEC R300SR	Тепловизор NEC R300SR-S
Диапазон измерения температуры	-40...+500°C (опция +2000°C)	-40...+120°C
Чувствительность тепловизора	0.030°C	0.025...0.030°C
Погрешность тепловизора	$\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\pm 1\%$ от показания	$\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ от показания
Тип детектора тепловизора	лицензионная неохлаждаемая болометрическая матрица VoX (uFPAmicrobolometer), производства Японии.	
Спектральный диапазон тепловизора	8 ... 14 мкм	
Поле обзора (стандартный объектив)	22°x17°	22°x17°
Пространственное разрешение	0,6 мрад	0,6 мрад
Диапазон фокусировки тепловизора	от 10 см - ∞	от 10 см - ∞
Функции коррекция тепловизора	Коэффициент излучения, Дистанция, Температура отражения, фона.	

	Тепловизор NEC R300SR	Тепловизор NEC R300SR-S
Отображение теплового и видимого изображения тепловизором	Альфа-смешение, Картинка в картинке, Разделение изображения.	
Измерение температуры	10 перемещаемых точек (с отображением координат XY элементарного пикселя).	
Коррекция коэффициента излучения	10 перемещаемых точек.	
Разница температур двух точек	Есть.	
Температурный анализ выделенной области	Макс./Средн./Мин. температуры в выделенной области (до 6 областей).	
Функции сканирования тепловизора	Поиск максимальной/минимальной температуры, автоматическое отображение в каждом положении.	
Функции сигнализации тепловизора	Звуковая сигнализация, сообщение на дисплее, цветное отображение, выход на внешнее исполнительное устройство.	

2.2 Источники нагрева

Тепловую стимуляцию (нагружение) объекта контроля можно производить путем нагрева или охлаждения, что с теплофизической точки зрения равноценно при одинаковой мощности теплового потока. Однако, учитывая достижимые плотности тепловых потоков, фактор технологичности и возможные помехи, практически всегда применяют нагрев с помощью полей излучения или потоков газа и твердых частиц.

Наибольшую мощность в зоне стимуляции обеспечивает нагрев оптическим излучением, генерируемым лампами различного типа и лазерами.

Наиболее просто можно нагреть поверхность объекта контроля с помощью электрических ламп накаливания. Достижимая плотность нагрева может составлять до нескольких кВт/м² в зоне диаметром до 1 м при произвольной длительности нагрева [13]. Такие лампы являются гибким и практичным средством «мягкого» нагрева неметаллов.

Для стимуляции металлов применяют галогенные лампы постоянного или импульсного действия, которые создают плотность энергии до 100 кВт/м² в течение времени от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

Лазеры способны обеспечить практически любую плотность энергии,

однако низкий к.п.д., большие габариты и стоимость ограничивают их применение в ТК лабораторными исследованиями. Лазеры также используют в технике «летающего пятна» для быстрого локального нагрева изделий, однако в этом случае снижается плотность поглощенной энергии. Поэтому, при контроле металлов наиболее эффективны мощные лампы-вспышки (flash tubes), используемые в фотографической технике [14].

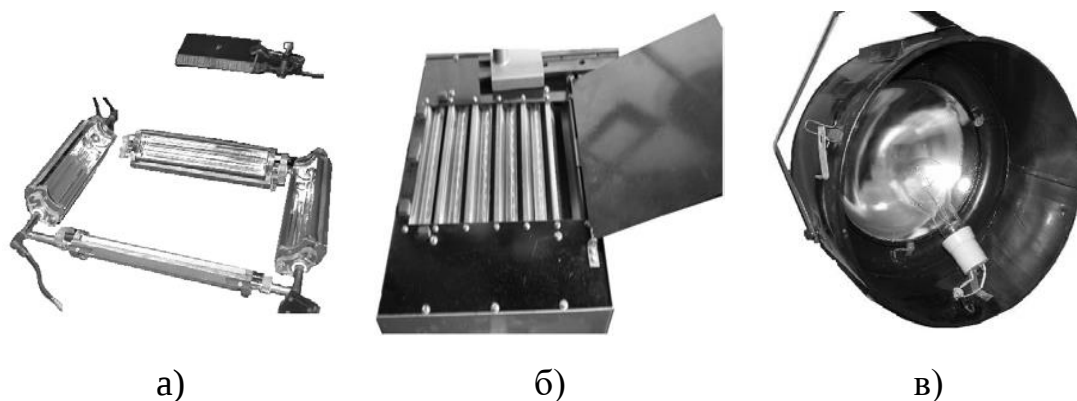


Рисунок 2.4 – Примеры оптических нагревателей, а - импульсные ксеноновые лампы (плотность энергии до 25 кДж м⁻²; длительность нагрева 1 мс; неравномерность нагрева 10% в зоне 0.2x0.2 м); б - галогенные лампы (плотность энергии до 5 кВт м⁻², длительность нагрева 5-50 с; неравномерность нагрева 25% в зоне 0.5x0.5 м); в - лампа накаливания с рефлектором (плотность энергии до 2 кВт м⁻², длительность нагрева 1-1000 с; неравномерность нагрева до 300% в зоне 0.5x0.5 м)

Конвекционный нагрев можно производить с помощью жидкости или газа. В частности, описан способ контроля внутренних полостей турбинных лопаток путем дозированного пропускания через них горячей (холодной) воды. Односторонний нагрев возможен с помощью потока горячего воздуха, направляемого на изделие с помощью фена («воздушной пушки»). Оригинальной разновидностью этого способа является быстрое охлаждение поверхности объекта контроля с помощью паров жидкого азота. Нагрев газом в односторонней процедуре ТК во многих случаях не хуже оптического нагрева благодаря более низкому уровню помехи, обусловленной отраженным излучением [15].

В ряде случаев, например, при обнаружении скрытых в грунте противопехотных мин, диагностике фасадных покрытий строительных сооружений и т.п., возможно использовать солнечное излучение, плотность мощности которого в средних широтах может достигать приблизительно 1 кВт/м² в безоблачный день.

Для нагрева также можно применять индукторы, электрический ток (для металлов), СВЧ излучение, вибрацию и ультразвук.

Один из способов нагрева для определения поверхностных трещин в образце, представлен на рисунке 2.5 способ основан на анализе прохождения теплового фронта вдоль поверхности исследуемого образца [16]. Стимуляция достигается соприкосновением образца с массивной подложкой, нагретой до определенной температуры (тепловая масса). Поверхностные трещины изменяют форму теплового фронта, что регистрируется с помощью тепловизора. Аналогичная тепловая стимуляция может быть достигнута погружением части образца в емкость с холодной или горячей водой.

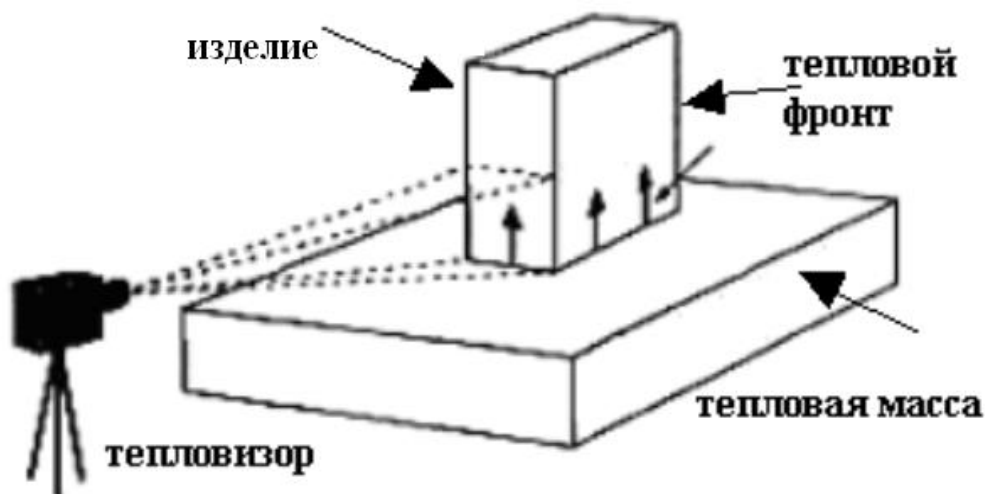


Рисунок 2.5 – Обнаружение поверхностных трещин

2.3 Тепловые дефектоскопы

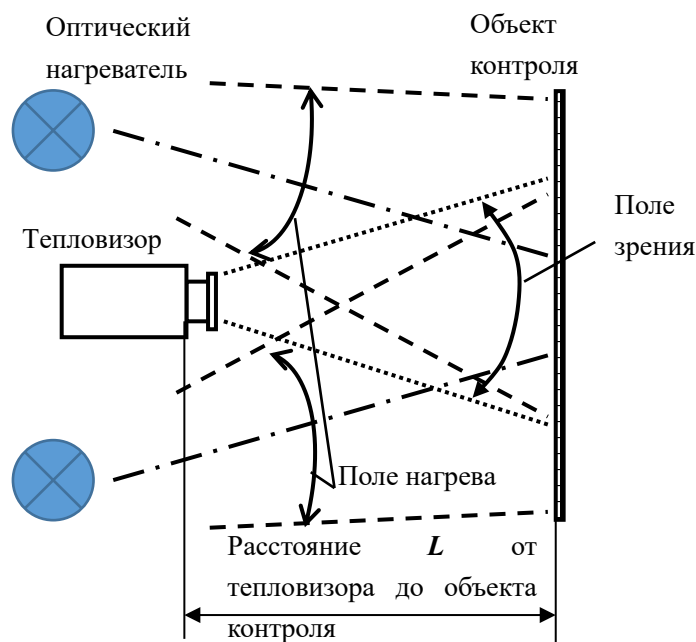


Рисунок 2.6 – Схема работы теплового дефектоскопа



Рисунок 2.7 – Тепловой дефектоскоп-томограф

Назначение.

Обнаружение ударных повреждений, расслоений, прожогов и т.п. дефектов в композиционных материалах и компонентах авиакосмической техники. Обнаружение воды в композиционных панелях самолетов. Контроль коррозии в тонкостенных оболочках из металлов и неметаллов. Бесконтактное определение анизотропных теплофизических свойств композитов [17].

Прибор реализует принцип активного одностороннего теплового контроля, предусматривающий импульсный нагрев объекта испытаний на 5-50 С выше окружающей среды с одновременной регистрацией видеопотока

инфракрасных изображений, обработка которых позволяет строить карты скрытых дефектов и определять теплофизические характеристики.

Комплектация: источник нагрева (ксеноновые и галогеновые лампы, светодиодные панели, конвективные нагреватели), тепловизионный модуль, лэп-топ компьютер.

Таблица 2.3 – Технические характеристики

Контролируемые материалы	Угле-,стекло и боропластики, включая сотовые, конструкции с обшивкой из композитов и металлов.
Толщина контролируемых материалов	0.5-10 мм
Расстояние до объекта контроля	0.2-1 м
Площадь одновременного контроля	0.05-0.25 м ²
Производительность контроля	1-3 м ² /час
Мощность нагрева	0.5-2 кВт (3 кДж в импульсе)
Спектральный диапазон	7-13 мкм
Частота цифровой записи	1-100 Гц

Преимущества.

- Бесконтактность, скрининговый характер испытаний.
- Высокая производительность контроля.
- Наглядность и документированность.
- Программное обеспечение для одно-, двух- и трехмерного моделирования задач теплового контроля.
- Цифровая обработка данных (Фурье-, вейвлет –, статистический и корреляционный анализ, тепловая томография, анализ главных компонент, тепловая дефектометрия).
- Безопасное обслуживание.

Общие принципы построения [18].

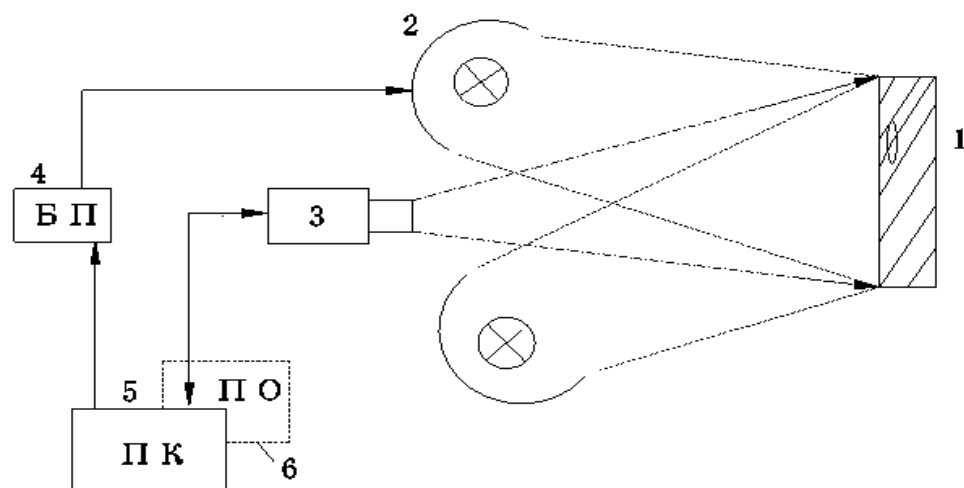


Рисунок 2.8 – Тепловой дефектоскоп для одностороннего доступа к ОК с оптическим нагревателем, 1 – объект контроля (ОК); 2 – оптический нагреватель; 3 – тепловизор; 4 – блок питания; 5 – персональный компьютер; 6 – программное обеспечение

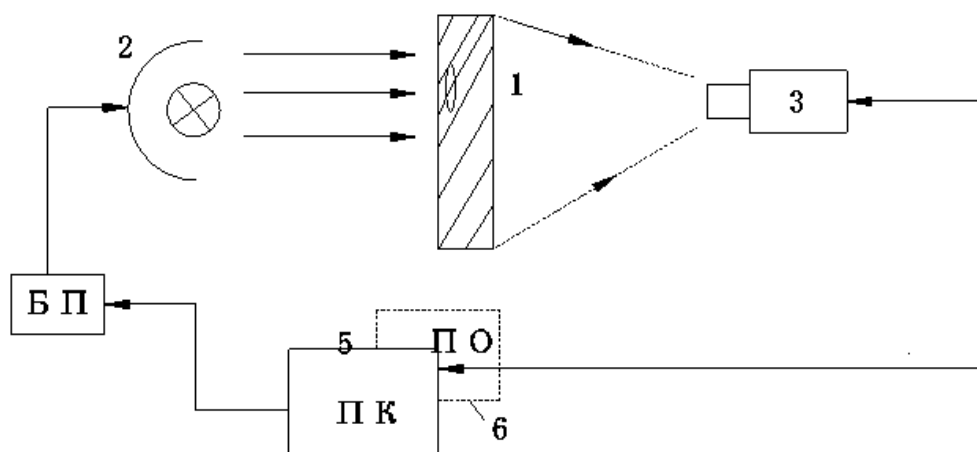


Рисунок 2.9 – Тепловой дефектоскоп для двустороннего доступа к ОК с оптическим нагревателем, 1 – объект контроля (ОК); 2 – оптический нагреватель; 3 – тепловизор; 4 – блок питания; 5 – персональный компьютер; 6 – программное обеспечение

3. Методы контроля

3.1 Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева

Один из видов классификаций моделей активного ТК связан с типами и сочетанием, нагревателя и регистратора. При поточечном сканировании изделие нагревают в малой зоне, а температуру регистрируют с некоторым запаздыванием, величина которого зависит от глубины залегания дефектов. Поточечное сканирование обеспечивает максимальные температурные контрасты над внутренними дефектами, если речь идет о внешнем нагреве, и пригодно для обнаружения трещин, расположенных перпендикулярно поверхности изделия. Основным недостатком данного способа является низкая производительность испытаний [19]. Компромиссным вариантом между поточечным сканированием и тепловизионным способом ТК является строчное сканирование: изделие нагревают в узкой длинной полосе, а температуру регистрируют с помощью строчно-сканирующего пирометра.

Проблема равномерности нагрева здесь решается проще, чем при площадочном нагреве, а производительность испытаний выше, чем при поточечном сканировании, в N раз, где N – число элементов строки. Ввиду того, что и в этом случае зона нагрева перемещается по поверхности изделия, строчное сканирование пригодно для обнаружения трещин, расположенных параллельно полосе нагрева. Тепловизионный способ ТК предусматривает распределенный нагрев изделия (от одной зоны к другой) при регистрации температуры с помощью тепловизора. В последние годы этот способ является наиболее популярным благодаря появлению на рынке нового поколения тепловизоров и мощных нагревателей, а также созданию эффективных алгоритмов обработки тепловых изображений.



Рисунок 3.1 – Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева, а – поточечное сканирование; б – строчное сканирование; в – тепловизионный способ

3.2 Методы обработки последовательностей термограмм

Алгоритмы обработки информации в активном ТК связаны с анализом изменения температуры в бездефектной и дефектной областях, для чего необходимо обрабатывать пиксельные функции $T(i, j, \tau)$ в последовательностях ИК термограмм. Стандартный подход состоит в выборе временных интервалов (time gate), в которых регистрируют дифференциальный сигнал $\Delta T(\tau)$, причем положение выбранного интервала зачастую определяет способ ТК [20].

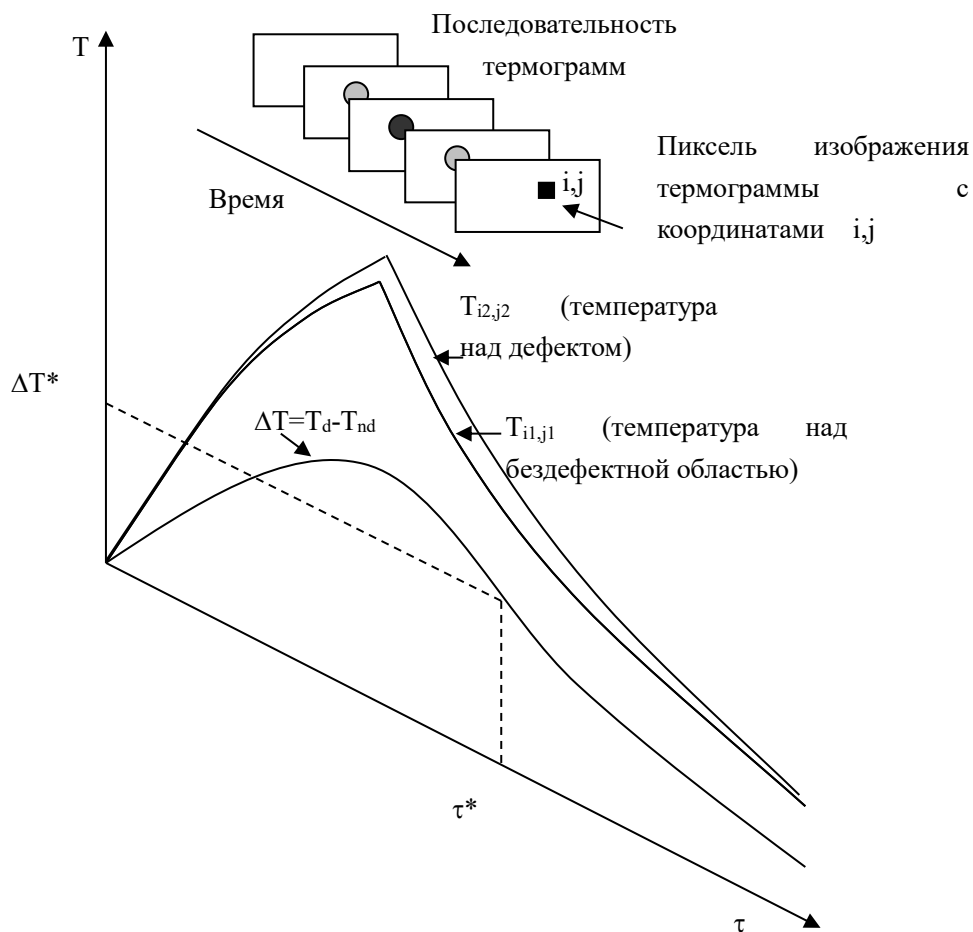


Рисунок 3.2 – Вид температурного сигнала

Ниже показана схема методов обработки термограмм в ТК, предложенная профессором Вавиловым В.П.. В данной работе рассмотрены не все методы, а только методы, связанные с функциональными преобразованиями.

Обработка данных в ТК

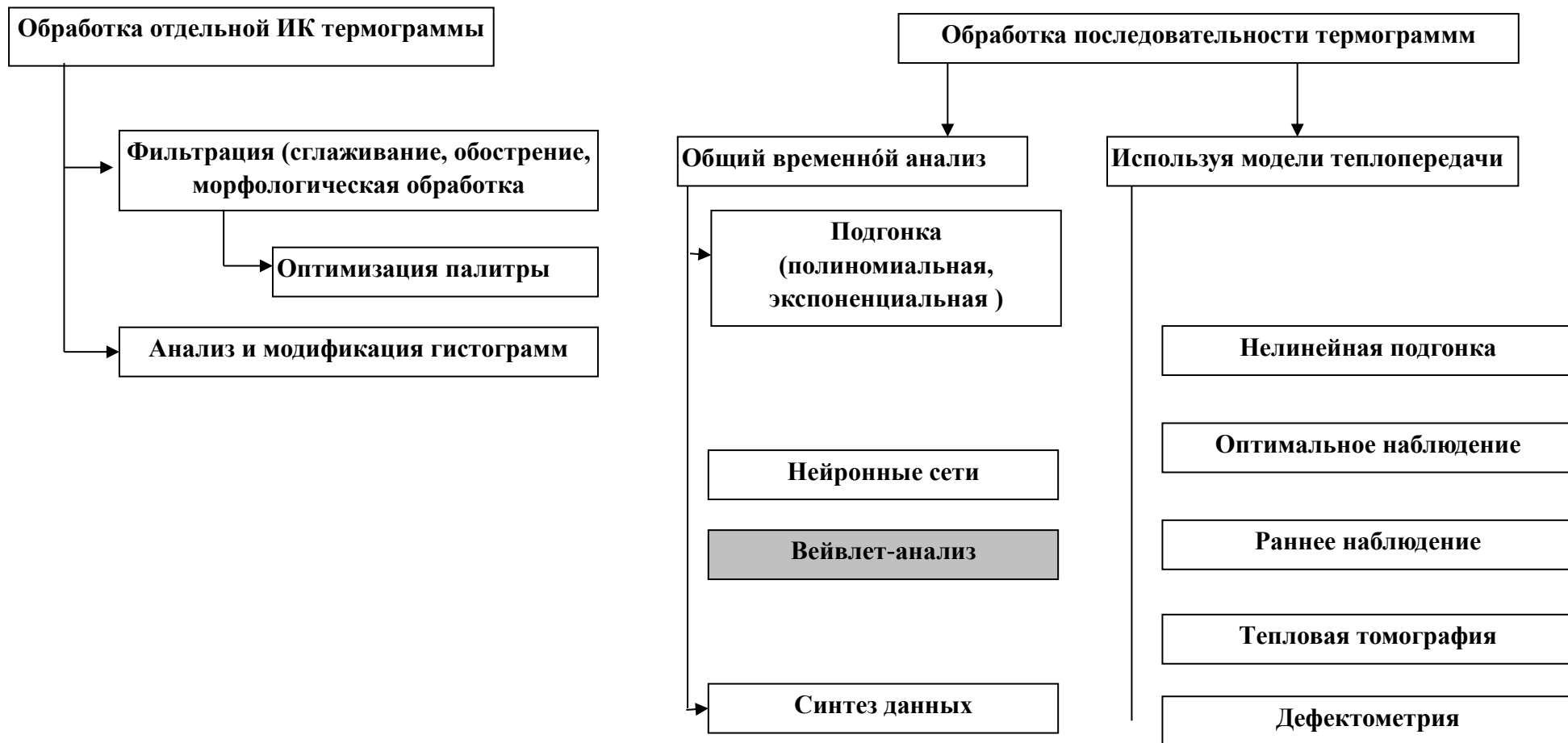


Рисунок 3.3 – Схема методов обработки термограмм

3.3 Классические методы обработки последовательностей термограмм

3.3.1 Нормализация динамических термограмм

В ТК термин «нормализация» означает деление динамических термограмм с целью подавить влияние неравномерного нагрева. Этот термин появился в работах А.Деджиованни и позднее был использован в программе ThermoFit Pro.

Нормализация на одно изображение [21].

Рассмотрим последовательность ИК изображений $T(i, j, \tau)$, полученных в импульсной процедуре ТК (длительность нагрева). Во многих случаях оптимальной будет процедура ТК, при которой дефекты проявляются только на стадии охлаждения, т.е. когда. Формула нормализации на одно изображение имеет следующий вид:

$$C_{norm}(i, j, \tau) = \frac{T(i, j, \tau) - T_{init}(i, j)}{T_{norm}(i, j, \tau_{norm}) - T_{init}(i, j)}, \quad (3.1)$$

где $C_{norm}(i, j, \tau)$ - нормализованный контраст; $T_{init}(i, j)$ - начальная температура изделия, которая в общем случае может изменяться от точки к точке (при нагреве равна температуре окружающей среды); $T_{norm}(i, j, \tau_{norm})$ - нормализующее изображение. Видно, что нормализованный контраст фактически представляет собой отношение между двумя избыточными температурами. Если нормализующее изображение выбрано таким образом, что поверхностные сигналы от внутренних дефектов еще не успели развиваться, то в идеальном случае все нормализованные изображения должны представлять собой равномерный фон с температурными отпечатками от дефектов в моменты времени, близкие к τ_m . Например, при кратковременном (импульсном) нагреве в качестве нормализующей часто выбирают термограмму в конце нагрева. Схема нормализации на одно изображение показана на рис 3.4.

Пример нормализации последовательности термограмм, полученной при импульсном ТК углепластикового композита, представлен на рис 3.5. В конце нагрева исходная термограмма отчетливо показывает неравномерный нагрев двумя лампами, из которых более мощный поток создавался левой лампой (см. верхнюю левую термограмму на рис 3.5). Температурный отпечаток неравномерного нагрева сохраняется до момента оптимального контроля $\tau = \tau_m$. Нормализация проведена на термограмму конца нагрева ($\tau = \tau_h$). При этом нормализованный контраст при $\tau = \tau_h$ становится равным единице (см. нижнее левое изображение), в то время как нормализованная термограмма при $\tau = \tau_m$ показывает дефекты более отчетливо по сравнению с исходной [22].

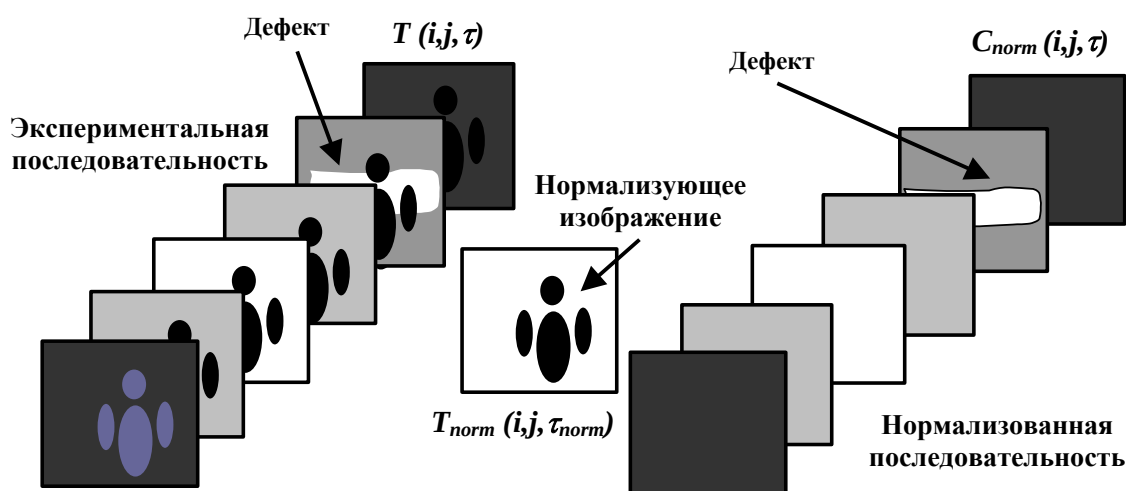


Рисунок 3.4 – Нормализация динамической последовательности на одно изображение

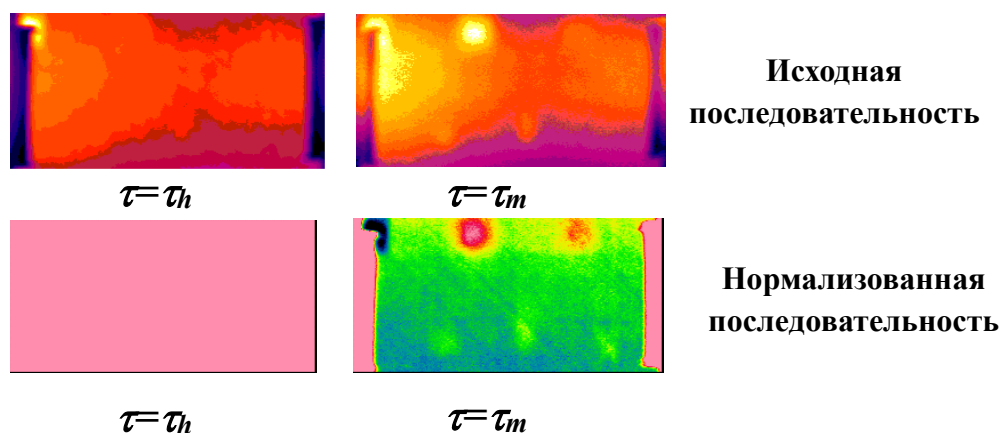


Рисунок 3.5 – Нормализация результатов ТК углепластикового композита

3.3.2 Метод главных компонент

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) является полезной статистической процедурой, которая в последнее время приобретает все большее распространение в задачах распознавания образов и сжатия данных, в частности, при очень больших объемах анализируемых данных [23].

Метод применим к статистически рапределенным данным с нулевым средним значением. Его сущность состоит в вычислении ковариационной матрицы исходных данных, а также собственных единичных векторов (eigenvectors) и собственных значений (eigenvalues) этой матрицы. Собственные вектора располагают в порядке их значений по порядку от высшего к низшему, что дает компоненты статистического набора в порядке убывания их значимости. Пренебрегая низшими компонентами, можно понизить метрику задачи, например, исключить влияние конвективной теплоотдачи при анализе металлических изделий, если используется многомерная тепловая модель, в которой присутствует конвекция. Выбирая из полученного списка собственных векторов наиболее значимые, составляют вектор характеристик (feature vector), который представляет собой матрицу, состоящую из столбца собственных векторов.

Наконец, умножая транспонированный вектор характеристик на вектор исходных данных, можно получить новый набор, выраженный в терминах тех собственных векторов, которые признаны значимыми [24].

Данный метод был использован специалистами Управления по авионавигации Франции для расшифровки результатов промышленных испытаний металлических изделий с помощью ИК камеры, реализующей принцип «летающего пятна»; в частности, удалось повысить выявляемость открытых трещин в режиме автоматического контроля, причем на стадии обнаружения дефектов (после анализа ГК) использовали вейвлет-анализ.

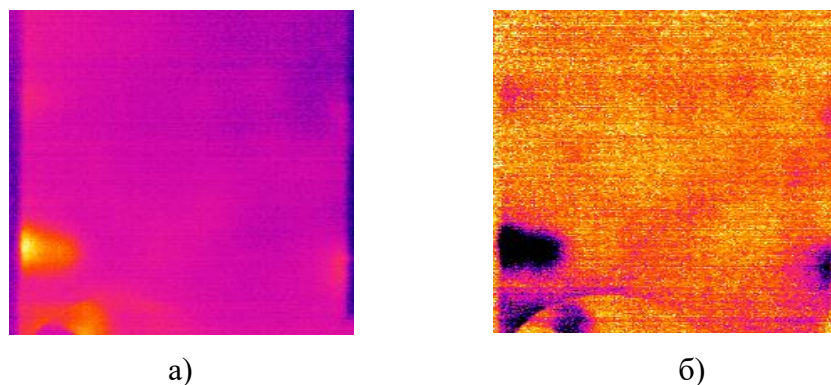


Рисунок 3.6 – УЗ ИК термографический контроль сотовой конструкции (бумажные соты и стеклопластиковая обшивка): исходная ИК термограмма (а) и изображение 3-й главной компоненты (б)

В качестве иллюстрации на рисунке 3.6 приведены результаты УЗ ИК термографического контроля стеклопластиковых сот с бумажными ячейками. Искусственное расслоение было хорошо видно на исходных термограммах в виде локального перегрева амплитудой до 60 °С (рисунке 3.6, а), однако на изображении 3-й компоненты отчетливо проявились и другие области структурной неоднородности образца (рисунке 3.6, б).

3.3.3 Фурье-анализ

Метод импульсной фазовой термографии (pulse phase thermography), предложенный К.Малдагом, С.Маринетти и Ж.Кутюрье, основан на применении преобразования Фурье к функции изменения температуры во времени $T_{ij}(\tau)$. Фазовая термография является обобщением метода модулированных (импульсных или периодических) тепловых волн, которые распространяются в глубь изделия от точки теплового возбуждения и претерпевают пространственные и временные искажения в месте наличия внутренних дефектов. В п. 4.2.3 было показано, что при периодическом нагреве температурный сигнал над дефектом является периодической функцией той же частоты, что и возбуждающая тепловая волна, и характеризуется определенной фазой и амплитудой. Простой оценкой максимальной глубины

обнаруживаемого дефекта служит длина тепловой диффузии $\mu = \sqrt{\alpha / \pi f}$ [25].

Очевидно, что более глубокие дефекты следует обнаруживать с помощью более медленных волн. В ТК значения μ находятся в диапазоне от микрометров до миллиметров. Применение волн более низких частот возможно, но это удлиняет эксперимент, поскольку обычно регистрируют несколько периодов тепловой волны. Описаны применения медленных тепловых волн, которые возникают в результате суточных колебаний температуры земной поверхности. Суточные температурные волны проникают в низкотеплопроводные материалы на глубину до 5-15 см, что позволяет обнаруживать скрытые объекты в почве и строительных сооружениях. Для полноты картины следует упомянуть сверхдлинные годовые волны температуры, проникающие в почву на глубины более метра. В ТК эти волны не применялись из-за очевидной трудности выделения столь низкой частоты.

Рассмотрим, как практически осуществляется Фурье-преобразование временной последовательности термограмм. Используем преобразование Фурье F_s , принятое в физике:

$$F_s = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N f_n e^{2\pi j (n-1)(s-1) / N}, \quad (3.2)$$

где f_n - дискретная исходная функция, содержащая N отсчетов (N термограмм в последовательности), s - частота, j - мнимая единица, n - номер отсчета [26].

Пусть анализируемая последовательность содержит 20 временных отсчетов температуры, начиная с нулевого момента времени $\tau = 0$, т.е.:

нулевой момент времени $\tau = 0$ соответствует ($\leftrightarrow$) Точке 1;

момент времени $\tau = 0 + \Delta\tau$ Точке 2;

момент времени $\tau = 0 + 2\Delta\tau$ Точке 3;

.....

момент времени $\tau = 0 + 19\Delta\tau$ Точке 20,

где $\Delta\tau$ -интервал между соседними изображениями (одинаковый для всей последовательности).

Последовательность T изображена на рисунке 3.7, а. Модуль M и аргумент (фаза) Φ преобразования Фурье для данной последовательности приведены на рис 3.7 б, в.

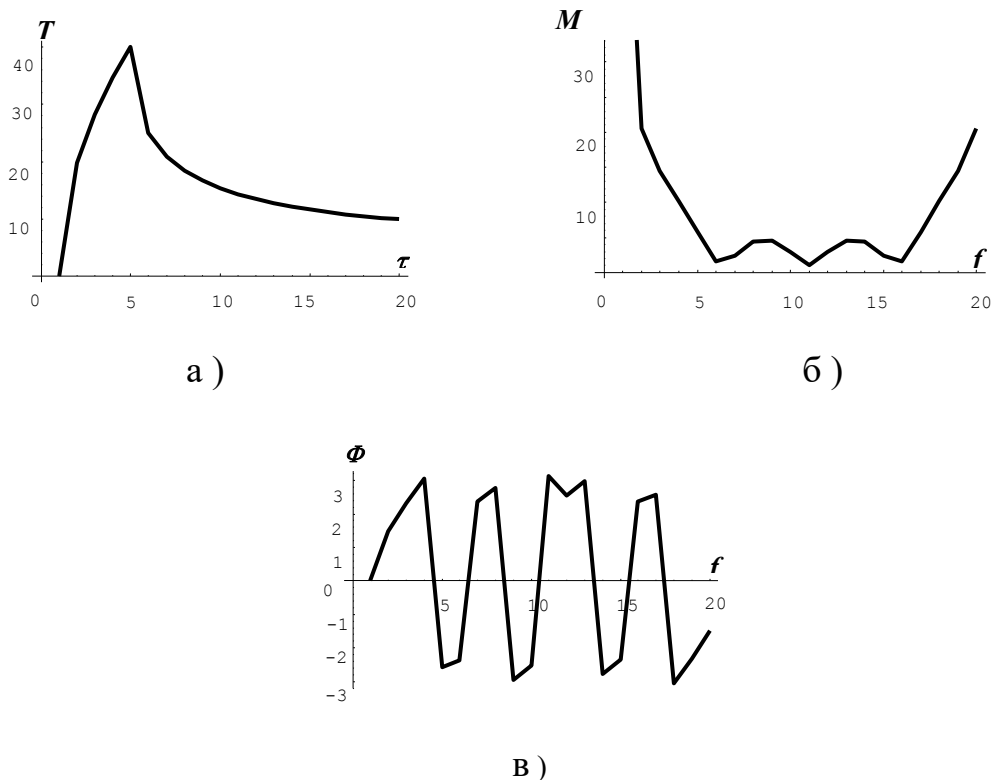


Рисунок 3.7 – Типичная функция изменения поверхностной температуры во времени (а) и параметры ее Фурье-образа: модуль (б) и фаза (в)

3.3.4 Вейвлет-преобразование

Вейвлет-анализ, или метод вейвлет-преобразование (wavelet transforms), был первоначально разработан в 1980-х годах для обнаружения кратковременных сигналов на шумовом фоне, например, сигналов сейсмодатчиков в нефтеразведке, отраженных от цели сигналов радиолокационных станций и т.п. в ТК контроле был впервые использован К. Малдагом с сотрудниками в качестве альтернативы преобразованию Фурье, при котором происходит потеря информации о характерных временах процесса [27].

Вейвлет-преобразование действительной непрерывной функции $f(\tau)$ по отношению к действительной вейвлет-функции g , называемой *базисной*, определяют как:

$$U(a, b) = \frac{1}{w(a)} \int_{-\infty}^{+\infty} g\left(\frac{\tau - b}{a}\right) f(\tau) d\tau, \quad (3.3)$$

где a - *параметр сжатия* (dilation), b - *параметр положения* (location), $w(a)$ - *весовая функция*, которая позволяет визуализировать результат преобразования. Вейвлет-преобразование можно рассматривать как кросс-корреляцию сигнала с набором *волновых функций* (wavelets) различной "ширины". Обычно полагают $w(a) = a$ или $w(a) = \sqrt{a}$. Иногда вейвлет-преобразование называют *математическим микроскопом*, в котором a^{-1} и b соответствуют усилению (magnification) и положению (location) сигнала. Иными словами, вейвлет-преобразование позволяет выявлять периодические структуры, связанные с конечным диапазоном a .

3.4 Вейвлет-анализ применительно к методам АТНК

3.4.1 Общие положения применения вейвлет-преобразования в тепловом контроле

Как известно, для вейвлет-преобразования в качестве базиса преобразования $g\left(\frac{\tau - b}{a}\right)$ желательно использовать функцию, наиболее близко описывающую сигналы, которые подлежат анализу. Для анализа температурных сигналов в АТНК наиболее приемлимыми в качестве базиса являются функции Гаусса $\frac{\partial^n}{\partial \tau^n} e^{-\frac{\tau^2}{2}}$.

Вейвлет-преобразование декоррелирует одномерный сигнал (функцию времени) в двумерный сигнал (функцию времени и масштабирующего фактора), что приводит к росту объема сопутствующих вычислений [28]. Для их сокращения предложено использовать два известных в ТК выражения, которые

СВЯЗЫВАЮТ:

время наблюдения с глубиной залегания дефекта $\tau = \frac{l^2}{\alpha}$ и длину тепловой диффузии с частотой $\mu = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}$.

Вейвлет-преобразование в данном случае применяется в качестве фильтра, настроенного на параметры дефекта и позволяет отсеять различные мешающие факторы.

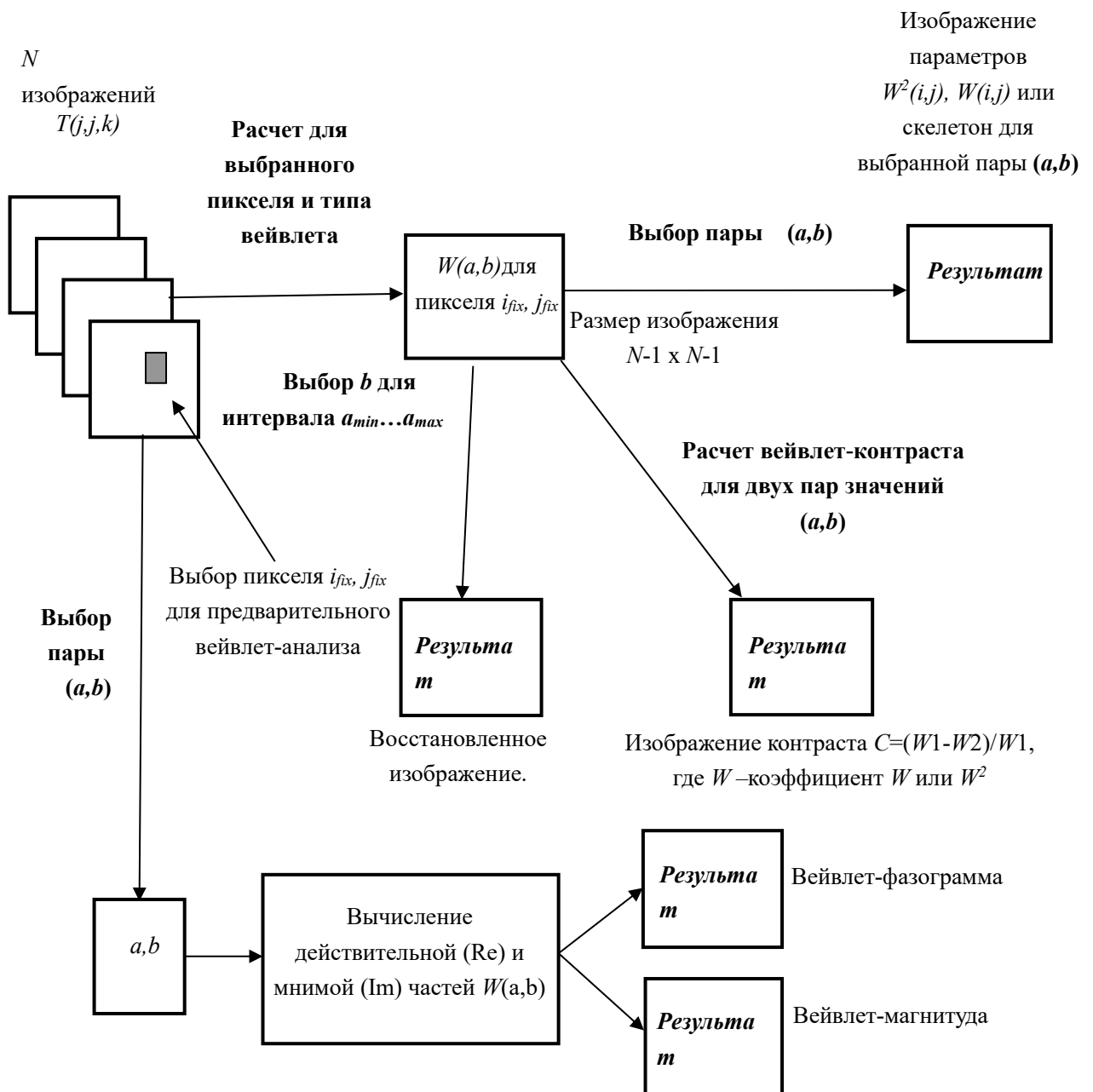


Рисунок 3.8 – Схема вейвлет-анализа (программа ThermoFit Pro)

Для практического применения в лаборатории №34 была разработана программа ThermoFit Pro с блоками вейвлет-анализа.

Результатами обработки (см. пример на рис. 3.9) являются:

- изображения коэффициентов (вейвлет-образы) $W(a,b)$ или $W^2(a,b)$, а также так называемые скелетоны, полученные с помощью выбранных пар значений (a, b) (a и b выбираются для некоторого пикселя);
- изображения вейвлет-контраста $C=(W_1-W_2)/W_1$, где $W_{1,2}$ есть либо $W(a,b)$, либо $W^2(a,b)$;
- восстановленные изображения для некоторого значения b и выбранного интервала значений a ;

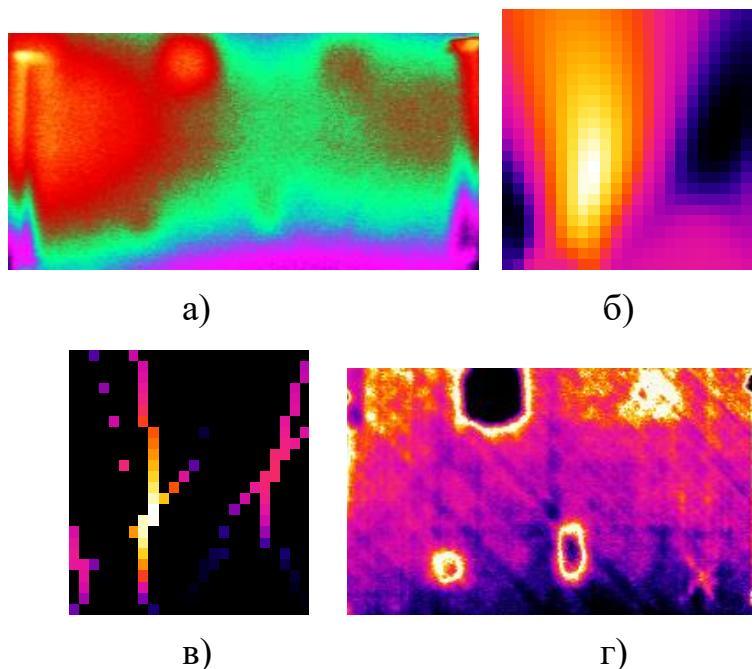


Рисунок 3.9 – Примеры изображений, связанных с вейвлет-анализом:

а – исходная термограмма (последовательность из 25 термограмм, полученная при ТК образца из углепластика с 5-ю дефектами);

б - вейвлет-коэффициенты $W(a,b)$;

в – скелетон

г – вейвлет-контраст

В ТК метод вейвлет-функций является относительно малоизученным, а его преимущества – дискуссионными, поскольку изменение дифференциальных сигналов $\Delta T(\tau)$ во времени носит не импульсный, а сглаженный характер.

Наиболее просто данный метод реализуется, получая изображения вейвлет-фазы с помощью комплексных вейвлет-функций [28].

3.4.2 Скалярные вейвлет-преобразования

Вейвлеты непосредственно связаны с кратномасштабным анализом сигналов. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными, биортогональными. Эти функции могут быть симметричными, асимметричными и несимметричными. Различают вейвлеты с компактной областью определения и не имеющие таковой. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие – быстрый алгоритм вычисления связанного с ними вейвлет. Вейвлеты различаются также степенью гладкости. Для практики желательно было бы иметь ортогональные симметричные (асимметричные) вейвлеты. Для анализа последовательностей термограмм с помощью вейвлет-преобразований можно конструировать специальное базис преобразований либо применять известные вейвлеты. В тепловом контроле наиболее применимы Гаусс-подобные вейвлеты.

При применении скалярных вейвлет-преобразований после вычисления вейвлет-коэффициентов $W(a,b)$ восстанавливают термограмму (одну или некоторую новую последовательность) выбирая параметры сдвига b и масштаба a исходя из параметров эксперимента и ожидаемых времен появления максимума сигнала от дефекта.

3.4.3 Комплексные (векторные) вейвлет-преобразования

Данный метод можно рассматривать в качестве альтернативы преобразованию Фурье при исследованиях временных (пространственных) рядов с выраженными неоднородностями. В отличие от преобразования Фурье, локализирующего частоты, но не обеспечивающего временного разрешения процесса, и от аппарата δ -функций, локализирующего моменты времени, но не имеющего частотного разрешения, вейвлет-преобразование, обладающее

самонастраивающимся подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигналов на разных временных масштабах.

В ТК преимущественно используют базисные функции Морле и Гаусса, а вышеуказанные параметры разложения называют фактором трансляции Tr (translation) и масштабирующим фактором S (scale):

$$W(S, Tr) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\tau) h_{S, Tr}(\tau) d\tau, \quad (3.4)$$

где W обозначает вейвлет-преобразование, и $h_{S, Tr}$ является дочерней функцией, которая связана с материнской функцией выражением:

$$h_{S, Tr}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{S}} h\left(\frac{\tau - Tr}{S}\right), \quad (3.5)$$

Поскольку масштабирующий фактор связан с частотой, а фактор трансляции – со временем, в методе вейвлет-функций не теряется информация о времени, необходимая в ТК для оценки глубины залегания дефектов [28].

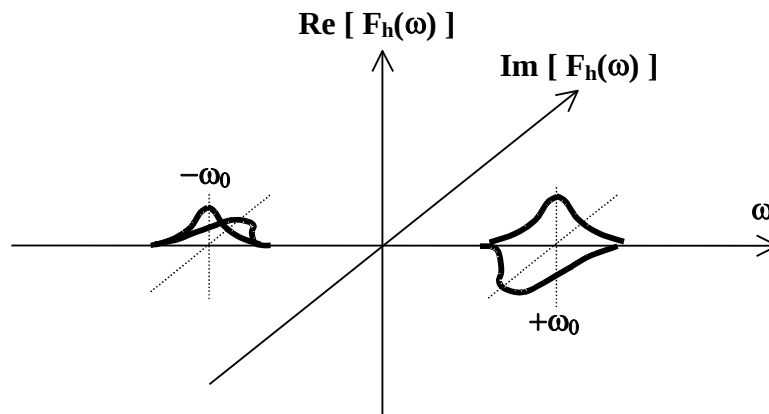


Рисунок 3.10 – Преобразование Фурье от функции Морле

4. Экспериментальные исследования

4.1 Математический модель

Прежде чем производить экспериментальные исследования на реальных объектах необходимо проанализировать процесс контроля на математической модели.

Для получения искусственной последовательности сделали вычисления модели контроля с помощью программы «ThermoCalc_3D». В программе применили параметры показанные на рисунке 4.1.

Defect number		1
Conductivity in direction x [W/(m*K)]		0.07
Conductivity in direction y [W/(m*K)]		0.07
Conductivity in direction z [W/(m*K)]		0.07
Heat capacity [(W*s)/(kg*K)]		928.4
Density [kg/(m*m*m)]		1.3
Defect length by the X-axis [m]		0.005
Coordinate of the defect initial point by the X-axis [m]		0.005
Defect width by the Y-axis [m]		0.005
Coordinate of the defect initial point by the Y-axis [m]		0.005
Defect thickness by the Z-axis [m]		5e-05
Coordinate of the defect initial point by the Z-axis [m]		0.00025
Color		☒
Visibility priority		☐

Layer number		1
Conductivity in direction x [W/(m*K)]		6.4
Conductivity in direction y [W/(m*K)]		0.64
Conductivity in direction z [W/(m*K)]		0.64
Heat capacity [(W*s)/(kg*K)]		2462
Density [kg/(m*m*m)]		500
Layer thickness [m]		0.001
Number of spatial steps by Z-axis		100
Color		☒

Рисунок 4.1 – Параметры в программе «ThermoCalc_3D»

В результате получились искусственные модельные термограммы.

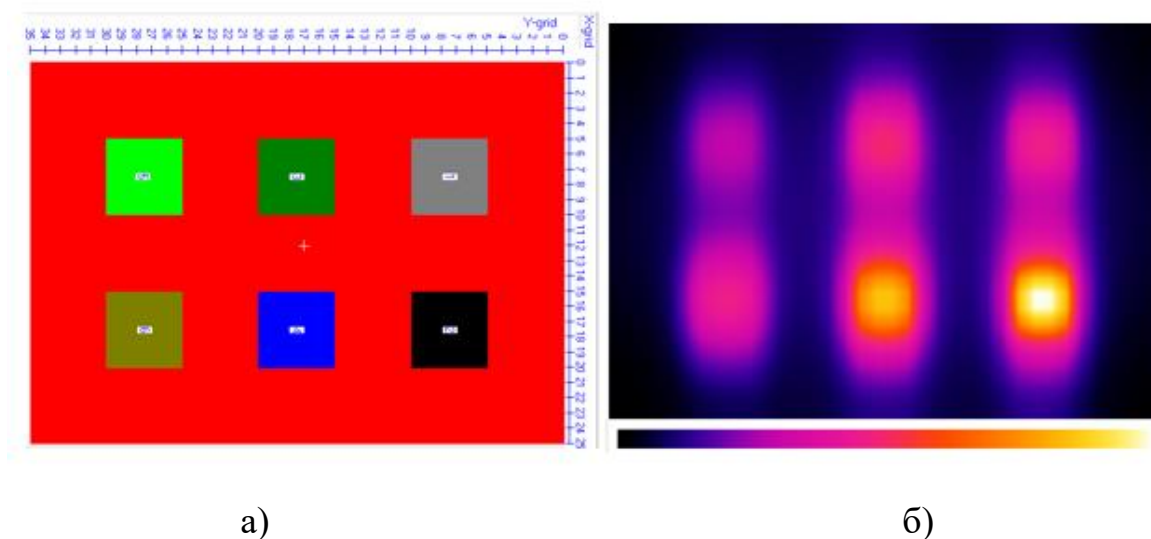


Рисунок 4.2 – Вид расчётной модели а) объекта контроля и отдельная термограмма б) из рассчитанной последовательности

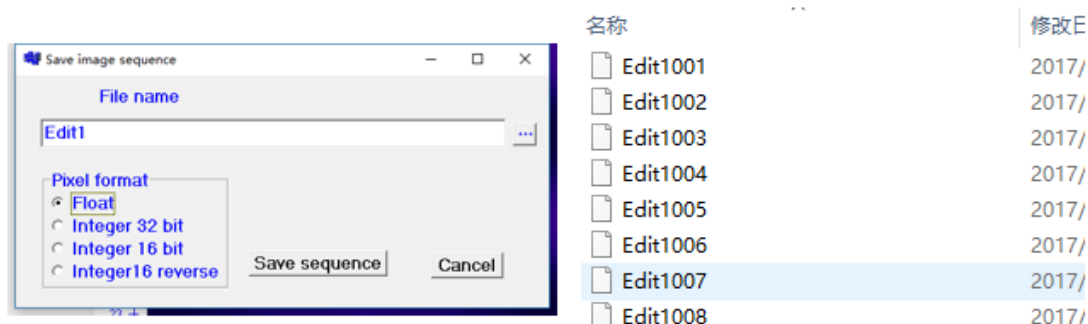


Рисунок 4.3 – Получение последовательности, слева – окно сохранения последовательности, справа – вид файлов термограмм последовательности

4.2 Описание объекта контроля

В качестве объекта контроля (ОК) была выбрана пластина из стеклопластика, длина пластины – 170мм, высота – 120 мм, толщина – 8,2 мм. В объекте контроля присутствуют 6 дефектных областей размерами 10х10х1 мм, расположенных на различном расстоянии от поверхности.

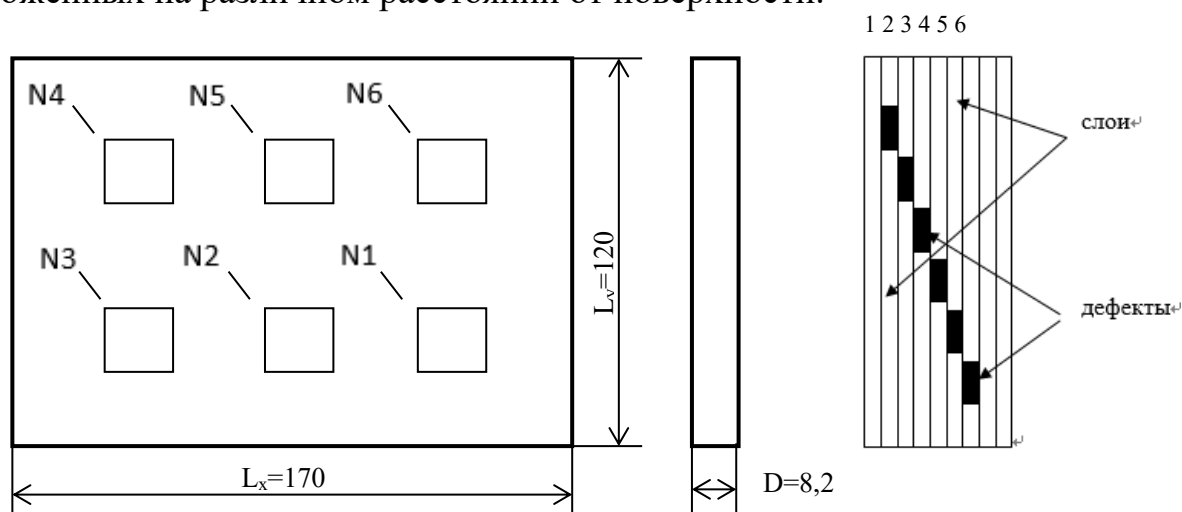


Рисунок 4.4 – Схема объект контроля

Таблица 4.1 – Рассотояние от поверхности ОК к поверхности каждого из дефектов

1	2	3	4	5	6
0.8мм	1.6мм	2.4мм	3.2мм	4.0мм	4.8мм

4.3 Экспериментальные установки

Экспериментальные установки включали в себя образец, источник оптического нагрева с галогеновыми лампами мощностью 30 кВт, тепловизор

NEC, персональный компьютер с программой управления экспериментом и программой обработки термограмм и т.д.

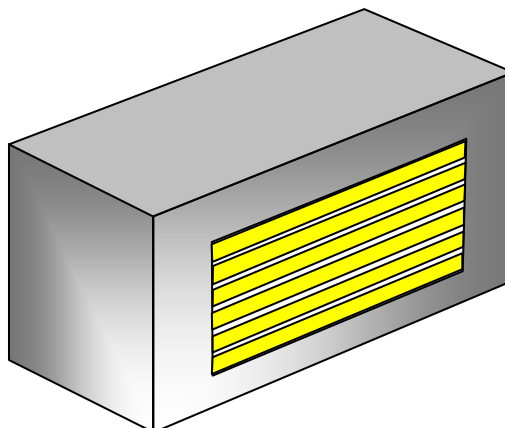


Рисунок 4.5 – Вид 30-ти киловаттного оптического нагревателя (имеющий в составе шесть 5-ти киловаттных галогеновых ламп)

Параметры эксперимента:

- однократный нагрев объекта контроля,
- время нагрева 5 с, время остывания 5 с,
- расстояние между источником нагрева и объектом контроля – 0.5 м.

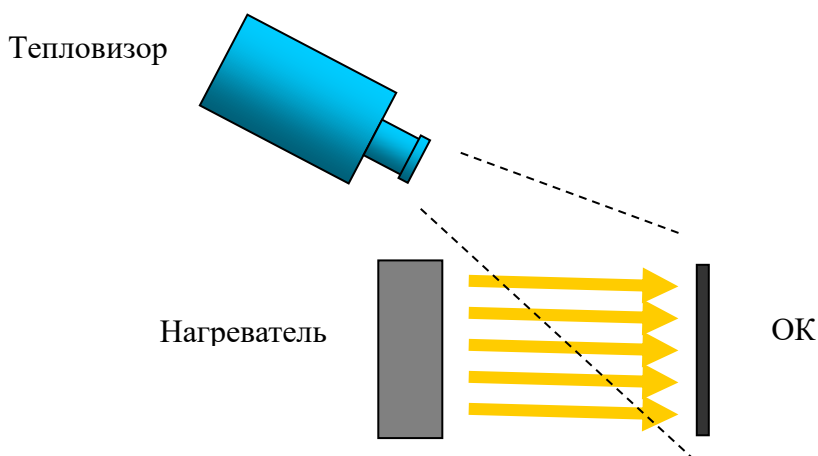


Рисунок 4.6 – Схема эксперимента

Так как оптический источник перекрывает доступ к обзору объекта контроля по нормали, тепловизор был размещён под углом к нормали поверхности объекта контроля, что немного исказило геометрию кадра.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение Производительности труда пользователя	0.09	5	3	4	0.5	0.3	0.4
2.Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.07	4	4	4	0.4	0.4	0.4
3. Помехоустойчивость	0.09	5	3	4	0.5	0.3	0.4
4. Энергоэкономичность	0.01	5	5	5	0.25	0.25	0.25
5. Надежность	0.03	3	5	5	0.3	0.5	0.5
6. Уровень шума	0.07	5	3	3	0.5	0.3	0.3
7. Безопасность	0.079	3	4	4	0.15	0.2	0.2
8.Потребность в ресурсах памяти	0.001	3	3	3	0.09	0.09	0.09
9.Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.023	5	5	5	0.25	0.25	0.25
10.Простота эксплуатации	0.066	3	5	5	0.3	0.5	0.5
Итого	1						

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и

ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i = 20,3$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

После расчёта средневзвешенного показателя, который составил 20,3, можно судить о том, что перспективность данного продукта крайне низкая. Необходимо повышать некоторые характеристики устройства.

5.2 SWOT-анализ

Для объективного оценивания конкурентоспособности и перспектив развития разработки необходимо проанализировать сильные и слабые стороны, а также угрозы и возможности, которые могут повлиять на разработку. SWOT-анализ позволит сформировать направление, в котором необходимо работать, чтобы повысить конкурентоспособность научной разработки.

Для составления итоговой матрицы SWOT-анализа необходимо определить сильные и слабые стороны проекта, угрозы и возможности проекта, а также взаимную корреляцию между ними.

Сильными сторонами разрабатываемого проекта являются стоимость производства, отсутствие конкурентов на территории РФ, время автономной работы, масса и размер устройства, поддержка всех мобильных платформ, использование Wi-Fi для передачи данных.

Основной слабостью проекта является то, что проект имеет узкую

направленность. Возможностью проекта является применение данной технологии в других сферах деятельности. Основываясь на разработанной технологии и полученном опыте возможно производство профилометров для других задач. Примером такого устройства является профилометр для контроля состояния колесных пар.

Угрозой данному проекту является снижение цены конкурентами.

Корреляция между сильными и слабыми сторонами проекта с возможностями и угрозами отображена в итоговой матрице SWOT-анализа (таблица 5.2). Как видно, угрозы и возможности данного проекта тесно коррелируют со всеми сильными и слабыми сторонами проекта.

Таблица 5.2 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Низкая стоимость производства С2. Отсутствие конкурентов в РФ. С3. Высокое время автономной работы. С4. Поддержка мобильных платформ. С5. Передача данных по Wi-Fi	Сл1 Узкая специализация
Возможности проекта: В1. Применение разработанной технологии в других сферах.	Производство новых устройств, основываясь на технологической и научной базе, полученных при разработке профилометра	Производство новых устройств, основываясь на технологической и научной базе, полученных при разработке профилометра
Угрозы проекта: У1. Снижение цены конкурентами	Повышения качества продукции, и разработка устройств с более высоким временем автономной работы позволит оставаться конкурентоспособным	Снижение цены на продаваемое устройство.

5.3 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта.
2. Организационная структура проекта.
3. Ограничения и допущения проекта.

Цели и результат проекта: разработка измерителя электрической ёмкости

коаксиального кабеля в процессе производства. Заинтересованные стороны проекта представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Качественное выполнение работ в оговоренные сроки
Исполнитель проекта	Разработка измерителя уровня

В таблице 5.4 представлена информация об иерархии целей проекта и требованиях к результату. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 5.4 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка измерителя уровня и границ раздел многофазных жидких сред. Разработка ресурсоэффективного и экономически выгодного способа измерения уровня.
Ожидаемые результаты проекта:	Разработка прибора
Требования к результату проекта:	Выполнение в срок

Участники рабочей группы представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Ширяев Владимир Васильевич, каф. ФМПК доцент	Руководитель проекта	Координирует деятельность исполнителя проекта	300
2	Льой Цзинь Е, каф. ФМПК, магистрант	Исполнитель проекта	Выполнение проектных работ	2200
ИТОГО:				2500

В таблице 5.6 отображены основные ограничения проекта.

Таблица 5.6 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	–
Источник финансирования	–
Сроки проекта:	01.09.2015-01.06.2017
Дата утверждения плана управления проектом	15.10.2015
Дата завершения проекта	09.06.201

5.4 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представляется в виде таблицы 5.7.

Таблица 5.7 – Календарный план проекта

Название	Длительность, рабочие дни	Длительность, календарные дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Получение технического	2	2	14.09.15	30.10.15	Исполнитель, руководитель
Анализ задачи	38	45	30.10.15	20.12.15	Исполнитель, руководитель
Сбор информации, анализ технически	43	50	20.12.15	10.03.16	Исполнитель
Изучение основ и	58	80	10.03.16	30.04.16	Исполнитель
Ознакомление с принципами работы	43	50	30.04.16	14.06.16	Исполнитель
Разработка принципиальной схемы	37	45	10.09.16	20.10.16	Исполнитель
Устройства Проведение экспериментов	34	40	20.10.15	4.11.16	Исполнитель
Анализ полученных	13	15	4.11.16	25.11.16	Исполнитель, руководитель

Подготовка графического материала	17	20	25.11.16	16.05.17	Исполнитель
Оформление	146	180	14.09.15	30.10.15	Исполнитель
Итого:	431	527			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

5.5 Бюджет научного исследованиями

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

5.5.1 Специальное оборудование для научно-исследовательских работ.

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении специального оборудования учтены затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Все расчеты по приобретению спецоборудования, сводятся в таблицу 5.8.

Таблица 5.8 – «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования,
1	Компьютер высокой мощности	1	25000	25000
2	Тепловизор	1		30000
3	Галогеновые лампы;	2	5000	10000

4	Источник питания постоянного напряжения и тока	1	АТН-4235	46000
Итоговая сумма				111000

5.5.2 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = З_{осн} + З_{доп} \quad (5.1)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата работника рассчитывается по следующей формуле: $З_{осн} = З_{дн} \cdot T_{раб}$ (5.2)

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника;

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых работником.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_{м} \cdot М}{F_{д}} \quad (5.3)$$

где $З_{м}$ – оклад работника;

$М$ – количество месяцев работы без отпуска в год;

$F_{д}$ – годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} \quad (5.4)$$

где $З_{\text{б}}$ – базовый оклад, р.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы сведён в таблицу 5.9.

Таблица 5.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_{\text{б}}$,руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$,руб	$З_{\text{д}}$,руб	$T_{\text{р. мес.}}$	$З_{\text{осн}}$,руб.
Руководитель	23264,86	1,30	1,05	1,30	71074,15	2992,60	95	284296,59
Дипломник	11300,00	1,00	0,00	1,00	11300,00	393,04	115	45200,00

5.5.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала и отчисление на социальные нужды

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала составляет в среднем 12% от суммы основной заработной платы. Таким образом, дополнительная заработная плата: для руководителя:

$$З_{\text{дн.р}} = 52128.68 \cdot 0.12 = 6255.4416$$

$$\text{для исполнителя: } 112512.55 \cdot 0.12 = 13501.506$$

В таблице 5.10 представлена заработная плата рабочей группы проекта.

Таблица 5.10 – заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата	52128.68	112512.55
Дополнительная зарплата	6255.4416	13501.506
Итого	58384.4416	126014.056
Итого по статье С _{зп}	184398.5	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (5.5)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, составляет 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя:

$$C_{\text{внеб}} = 0.3 * 184398.5 = 55319.55 \text{ руб}$$

5.5.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Накладные расходы составляют 80 100% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Примем коэффициент накладных расходов равным 90%,

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} * (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (5.6)$$

$$C_{\text{накл}} = 0.9 * 184398.5 = 165958.66 \text{ руб}$$

5.6 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности $I_{\text{ф}}^p$ и ресурсоэффективности I_m^p .

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают I_{ϕ}^p в ходе оценки бюджета затрат для вариантов исполнения научного исследования. Для разрабатываемого профилометра аналогом является профилометр компании «RIFTEK» рыночная цена которого составляет 513000 рублей. Из этого следует, что затраты на разработку будут являться наибольшим интегральным показателем реализации технической задачи Φ_{max} .

Интегральный финансовый показатель разработки I_{ϕ}^p определяется :

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{620797,08}{620797,08} = 1; \quad (5.7)$$

Интегральный финансовый показатель аналога I_{ϕ}^a :

$$I_{\phi}^a = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{513000}{620797,08} = 0,82; \quad (5.8)$$

Показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения определяется как сумма произведений балла критерия на его оценку. Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитан в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности	0,1	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3
4. Энергосбережение	0,2	5	2
5. Надежность	0,25	4	5
6. Материалоемкость	0,15	5	3
Итого	1	28	21

Интегральный показатель эффективности разработки $I_{финр}^p$ определяется так:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p} = \frac{4,6}{1} = 4,6; \quad (5.9)$$

Интегральный показатель эффективности аналога $I_{\text{финр}}^a$ определяется по формуле:

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a} = \frac{3,5}{0,82} = 4,27; \quad (5.10)$$

Сравнение интегральных показателей эффективности текущего проекта и аналога позволяет определить сравнительную эффективность проекта $\mathcal{E}_{\text{ср}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{4,6}{4,27} = 1,08. \quad (5.11)$$

Результаты расчетов сравнительной эффективности проекта приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный финансовый показатель разработки	0,82	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,5	4,6
Интегральный показатель эффективности	4,27	4,6
Сравнительная эффективность проекта	1,08	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Как видно из таблицы, разработка рельсового профилометра выгоднее с точки зрения ресурсоэффективности.