

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Чулков Арсений Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО
КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ИЗДЕЛИЙ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор В.П. Вавилов

Томск – 2015

Содержание

Термины и определения	4
Обозначения и сокращения	5
Введение	6
Глава 1. Современное состояние активного теплового контроля металлических и композиционных материалов и изделий	11
1.1. Общие аспекты применения ТК.....	11
1.2. Области применения ТК.....	13
1.3. Способы активного ТК (на примере изделий цилиндрической формы).....	18
1.4. Коммерческие системы активного ТК.....	23
1.5 Выводы по Главе 1	24
Глава 2. Алгоритмическое обеспечение активного теплового контроля	27
2.1. Результаты решения теоретических задач ТК. Базовые зависимости температурных сигналов от параметров дефектов.....	27
2.2. Обзор методов обработки динамических ИК термограмм.....	32
2.3. Статистическая оценка результатов ТК.....	38
2.4. Выводы по Главе 2.....	44
Глава 3. Метод и аппаратура ТК коррозии в металлических изделиях	46
3.1. Алгоритмы оценки коррозии.....	46
3.2. Стандартные образцы.....	60
3.3. Аппаратура ТК.....	61
3.4. Экспериментальные результаты.....	67
3.5. Маркетинговые аспекты ТК коррозии контейнеров, используемых для хранения радиоактивных отходов.....	78
3.6. Выводы по Главе 3.....	84
Глава 4. Метод и аппаратура ТК скрытых дефектов в углепластиковых композитах	86
4.1. Экспериментальные процедуры ТК (на примере цилиндрических изделий из углепластика).....	86
4.2. Оптимизация процедуры обработки динамических ИК термограмм (статистический подход).....	88
4.3 Аппаратура ТК композитов.....	94
4.4 Объекты контроля.....	101
4.5 Экспериментальные результаты по ТК дефектов в углепластике.....	101

4.6	Определение анизотропной температуропроводности композитов.....	110
4.7.	Выводы по Главе 4.....	122
Глава 5. Обнаружение скрытой воды в сотовых конструкциях методом терагерцовой ИК термографии.....		
терагерцовой ИК термографии.....		
5.1.	Дистанционное обнаружение воды.....	124
5.2.	Экспериментальная установка.....	125
5.3.	Объект контроля.....	126
5.4.	Экспериментальные результаты.....	126
5.5.	Выводы по Главе 5.....	129
Общие выводы.....		
Публикации автора.....		
Список использованных источников.....		
Акты использования результатов диссертационных исследований.....		

Термины и определения

Инфракрасная термография – совокупность методов и технических средств для дистанционной регистрации и анализа характеристик тепловых (температурных) полей объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению.

Тепловой неразрушающий контроль – метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе температурных сигналов на поверхности объектов контроля, которые, как правило, возникают в результате тепловой стимуляции материала.

Температурное поле – распределение поверхностной температуры на контролируемом участке объекта контроля.

Тепловой поток (мощность теплового потока) – тепловая энергия, передаваемая через объект контроля в единицу времени (обычно на единицу площади) Вт, Вт/м².

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) λ – справочная характеристика материала, характеризующая мощность теплового потока, распространяющегося от точки с большей температурой к точке с меньшей температурой, Вт/(мК).

Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) α - справочная характеристика материала, характеризующая скорость изменения температуры материала в условиях нестационарного теплообмена, м²/с.

Обозначения и сокращения

T – температура (в активном тепловом контроле – избыточная температура), °С;

ΔT – дифференциальный температурный сигнал, °С;

ΔT_m – максимальный дифференциальный температурный сигнал, °С;

α – температуропроводность материала, м²/с;

λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К);

ρ – плотность материала, кг/м³;

C – теплоемкость материала, Дж/(кг·К), или $C(\tau) = \Delta T(\tau)/T(\tau)$ – текущий

температурный контраст

C_m – максимальный текущий температурный контраст

x, y, z – декартовы координаты; q – одна из декартовых координат x, y или z , м;

τ – текущее время, с;

τ_h – время нагрева, с;

τ_m – оптимальное время наблюдения дефектов, с;

Q – плотность мощности внешнего потока нагрева, изменяется во времени и в пространстве, Вт/м²;

W – энергия импульса нагрева, Дж;

L – толщина изделия, м;

l – глубина залегания дефекта, м;

d – толщина дефекта, м;

ИК – инфракрасный

ТК – тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

НК – неразрушающий контроль

АГК – анализ главных компонент

Введение

Актуальность диссертационных исследований обусловлена необходимостью обеспечения (повышения) качества продукции путем внедрения имеющихся и разработки новых методов и средств неразрушающего контроля, в особенности, в высокотехнологичных отраслях промышленности (авиакосмической и военной технике, ядерной энергетике, автомобиле- и судостроении и др.). При производстве и испытаниях композиционных материалов тепловой контроль (ТК) обеспечивает обнаружение практически важных дефектов в сочетании с высокой производительностью испытаний и наглядной формой представления результатов, а при контроле металлических материалов новые методы тепловой стимуляции способны обеспечить конкуренцию ТК с более традиционными способами испытаний.

Российские традиции активного ТК композитов восходят еще к 1980-м годам (работы Н.А. Бекешко, Н.С. Данилина, Ю.А. Попова, А.Е. Карпельсона, Д.А. Рапопорта, О.Н. Будагина, В.А. Стороженко, В.П. Вавилова, Б.Н. Епифанцева) [1-22]. В годы перестройки, вследствие определенного спада в развитии военного материаловедения и отечественной гражданской авиации, объем исследований по ТК материалов, в особенности, композитов, резко сократился, и его ренессанс наблюдается лишь в последние годы в связи с возрождением военной и космической отраслей, в том числе, в работах вышеупомянутых специалистов, а также Е.В. Абрамовой, В.Г. Торгунакова, В.А. Захаренко, А.Г. Климова и др. [23-36].

Исследования по ТК металлов всегда были сопряжены с объективными трудностями, связанными с низким коэффициентом излучения металлов, то есть высоким уровнем отражательных помех, а также высокой теплопроводностью металлов, что делало процесс контроля быстротекущим. В последние годы наметился значительный прогресс в этой области в связи с появлением новых способов тепловой стимуляции: индукционного и ультразвукового.

В настоящее время практические аспекты ТК композитов связаны с появлением на рынке специализированных устройств контроля. Пионером коммерциализации явилась фирма Thermal Wave Imaging (США), которая запатентовала способ «термографической обработки сигнала» (TSR – Thermal Signal Processing) и выпускает несколько моделей тепловых дефектоскопов, реализующих принцип импульсного ТК. В последнее десятилетие аналогичные устройства начали производиться германскими фирмами Automation Technology, EDEVIS, Thermosensorik и др., причем основными потребителями аппаратуры ТК являются военный сектор и авиация.

Цель исследования – дальнейшее развитие способов, технологии и аппаратуры активного ТК металлических и композиционных материалов и изделий, используемых в авиакосмической промышленности, энергетике и других высокотехнологичных областях.

Задачи исследования

- Разработать методику активного ТК скрытой коррозии в металлических изделиях толщиной до 6 мм с количественным определением степени уноса материала в зонах с поперечным размером более 10 мм².

- Разработать методику определения «поперечных» компонент анизотропных теплофизических характеристик (ТФХ) композиционных материалов на основе анализа изменения логарифмической Фурье-температуры объектов контроля во времени с использованием пространственной щелевой маски, задающей несущую пространственную частоту.

- Разработать методику проведения ТК металлических и композиционных материалов и изделий с применением источников нагрева и инфракрасных (ИК) тепловизоров различных типов, а также с использованием моделирующих программ и современных алгоритмов обработки «временных» последовательностей ИК изображений.

- Выполнить статистический анализ эффективности различных алгоритмов обработки нестационарных ИК термограмм (с применением Фурье- и вейвлет-преобразований, анализа главных компонент, корреляционного анализа и др.).

- Разработать прототип экспериментального ИК теплового дефектоскопа с универсальным спектром применения для реализации вышеупомянутых способов ТК.

- Исследовать возможность применения метода терагерцовой ИК термографии для контроля воды в композиционных сотовых конструкциях.

Тезисы, выдвигаемые к защите

- Количественную оценку степени коррозии металлических оболочек, выраженной относительным утонением $\Delta L/L$, следует проводить с использованием безразмерного температурного контраста C при условии, что поперечные размеры зоны коррозии более чем в 3 раза превосходят толщину конструкций; при этом погрешность оценки коррозии не превышает 10%; дефектометрия меньших дефектов требует введения поправочного коэффициента, зависящего от параметров объекта контроля и «кажущихся» поперечных размеров дефектов.

- Ортотропные композиты характеризуются тремя компонентами анизотропной температуропроводности. «Сквозную» температуропроводность определяют по методу Паркера. «Поперечные» компоненты температуропроводности следует определять путем анализа логарифмических «Фурье-температур» с использованием пространственных масок, причем, в практических измерениях следует применять щелевую маску, что позволяет проводить измерения на определенной несущей пространственной частоте.

- Основными алгоритмами обработки динамических последовательностей ИК термограмм, обеспечивающими повышение отношения сигнал/шум, являются: Фурье- и вейвлет-анализ, анализ главных компонент и оценка корреляции между температурными сигналами в бездефектной и дефектной областях. Эффективность применения данных алгоритмов зависит от характера изменения температуры во времени и природы преобладающих шумов.

- Феномен прозрачности композиционных (не углеродсодержащих) материалов и непрозрачности воды для терагерцового излучения, в сочетании с ИК термографическим принципом его визуализации, позволяет эффективно обнаруживать воду в сотовых конструкциях.

Научная новизна

- Разработана методика определения степени коррозии металлических конструкций толщиной до 6 мм (по стали), основанная на определении безразмерного температурного контраста в дефектных зонах и обеспечивающая погрешность не более 10 %, если поперечные размеры зоны коррозии более чем в 3 раза превосходят толщину конструкций. Дефектометрия меньших дефектов требует введения поправочного коэффициента, зависящего от параметров объекта контроля и «кажущихся» поперечных размеров дефектов.

- Установлено, что оптимальным алгоритмом обработки инфракрасных термограмм при активном ТК по критерию отношения сигнал/шум является определение корреляции между температурными сигналами в бездефектной и дефектной областях, а близкие результаты обеспечиваются применением Фурье- и вейвлет-преобразования, а также метода анализа главных компонент.

- Разработана методика тепловизионного определения анизотропных теплофизических характеристик композиционных материалов на основе анализа изменения логарифмической «Фурье-температуры» объектов контроля во времени,

которая предусматривает создание несущей пространственной частоты путем размещения между источником нагрева и объектом контроля пространственной целевой маски.

- Установлено, что стимуляция электромагнитным излучением в терагерцовом диапазоне в комбинации с инфракрасной термографией позволяет эффективно обнаруживать воду в сотовых композиционных (не углеродсодержащих) конструкциях.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

- Разработан прототип теплового дефектоскопа широкого применения, предназначенный для обнаружения коррозии металлических оболочек, а также для выявления дефектов композиционных материалов, в особенности, ударных повреждений в углепластиковых композитах.

- Разработана методика активного ТК, применимая как к металлическим, так и композиционным материалам и изделиям, основанная на использовании современных методов обработки инфракрасных изображений, а именно, корреляционного анализа, Фурье- и вейвлет-преобразования, метода анализа главных компонент.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается использованием компьютерной тепловизионной аппаратуры, которая позволяет измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более $\pm 1\%$ или $\pm 1^\circ\text{C}$ и дифференциальные температуры с чувствительностью до $0,02^\circ\text{C}$. Теоретические исследования выполнены с помощью численных методов решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности и подтверждены результатами экспериментальных исследований на стандартных образцах. Для обработки экспериментальных данных использованы апробированные методы компьютерного анализа изображений и статистической обработки результатов измерений. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и данным, полученным другими авторами.

Апробация работы

Результаты диссертационных исследований докладывались на конференции Asia QIRT'2015, Индия, двух конференциях Международного оптического общества SPIE "Thermosense", США, 2013 и 2015 гг., на Международной конференции по прикладной и теоретической механике MECHANICS, Италия, 2014 г., на Международной 11-й конференции неразрушающего контроля «11th European Conference on Non-Destructive

Testing», Чехия, 2014 г., на II Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томск, 2014 г.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами

Результаты диссертационных исследований связаны с выполнением хоздоговора №5-191/13У от 01.10.2013г. «Разработка метода определения теплофизических характеристик углепластика с помощью теплового неразрушающего контроля», гранта ФЦП № 11.519.11.6015 от 06. 09. 2011 г. «Разработка экспрессного тепловизионного контроля скрытой коррозии в стальных резервуарах, используемых в ядерной и теплоэнергетической промышленности, в особенности, контейнеров для хранения радиоактивных отходов», гранта ВИУ_ИНК_66_2014 от 2014г. «Технологии и комплексы томографического неразрушающего контроля нового поколения» и международного гранта №5-285/14 от 18.11.2014г. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)», а также индивидуального гранта диссертанта «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» № 5076 ГУ1/2014 от 26.12.2014г. «Разработка мощного светодиодного источника нагрева для портативного теплового дефектоскопического аппарата».

Публикации. Соискателем опубликовано 29 работы, из них по теме диссертации - 18 работ, в том числе 10 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (одна из которых с ИФ>2), и 3 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК. Получен 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели, поданы 3 заявки на изобретения.

Структура и объем диссертационных исследований. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 117 работ, и трех актов использования результатов диссертационных исследований, содержит 143 страницу текста, 73 рисунка, 33 формулы и 18 таблиц.

Глава 1. Современное состояние активного теплового контроля металлических и композиционных материалов и изделий

1.1 Общие аспекты применения ТК

1.1.1. Техническая диагностика и неразрушающий контроль

Материалы настоящего раздела являются обзорными и заимствованы из опубликованных источников, прежде всего, монографии В.П. Вавилова [34] и обзорной статьи [36] с участием диссертанта.

ТК (ИК термографический контроль) подразделяют на техническую диагностику объектов со стационарными или квазистационарными тепловыми полями и на активный неразрушающий контроль (НК) материалов и изделий. Первая область является наиболее развитой и обеспеченной нормативной документацией, в то время как ТК материалов, за редкими исключениями, остается фрагментарным методом, доверие к которому среди российских специалистов по НК относительно невелико. В ведущих западных странах ТК получил относительно широкое практическое применение в аэрокосмической технике, где разнообразие задач НК не позволяет ограничиться одним или несколькими методами. Следует заметить, что в пассивной технической диагностике можно использовать приемы активного ТК, например, при обследовании настенных фресок, анализе состояния штукатурки на фасадах зданий, обнаружении противопехотных мин и т.п. В настоящей главе рассмотрены основные области применения ТК вне зависимости от степени стационарности исследуемых тепловых полей.

Прейскурант на различные виды тепловизионных обследований был в свое время разработан Минэнерго СССР (специализированный преЙскурант принят также компанией «Лукойл»). С учетом изменения масштаба цен стоимость обследований в настоящее время составляет от 300 до 3000 долларов США на объекты типа электрической подстанции, жилого дома, дымовой трубы, участка теплотрассы и т.п. Тепловизионная техническая диагностика была признана Минэнерго РФ и РАО "ЕЭС России" в качестве штатного средства испытаний электроустановок. Расширяется применение тепловидения при обследованиях дымовых труб, котлов и печей, изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов и т.п. Тепловидение рассматривается органами энерго- и архитектурного надзора, а также администрациями городов, в качестве важного инструмента диагностики качества строительства и энергосбережения. Работы по оценке

рабочего ресурса потенциально опасных промышленных объектов, проводимые по лицензии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзора), также могут включать оперативную и бесконтактную тепловизионную съемку; в частности, это относится к дымовым трубам, строительным сооружениям, изотермическим резервуарам, химическим реакторам и т.п. объектам. Тем не менее, систематические исследования экономической эффективности применения тепловидения в России не проводились, поэтому приведем лишь отрывочные сведения, главным образом, из зарубежного опыта конца прошлого века.

В Швеции длительное время проводился 100%-й контроль подстанций (до 150 тысяч узлов в год), в результате чего был сделан вывод о том, что альтернативы тепловизионной диагностике нет ввиду того, что электрические контакты непрерывно деградируют и требуют регулярной проверки. В Бельгии в результате планомерной диагностики число отказов на подстанциях снизилось с 2,35% в 1971 г. до 0,24% в 1977г. Применение тепловизоров для контроля высоковольтных линий электропередач в СССР сэкономило до 20 тысяч долларов США в год на регион в результате уменьшения числа аварий, отключений и недоотпуска энергии. Американская фирма Н-Е-В Вгуан, производящая пищевые продукты, в результате аварии в системе коммутации и последовавшего пожара понесла ущерб около 100 тысяч долларов, после чего внедрила программу ИК термографического контроля электрооборудования. При проверке отремонтированного оборудования была вновь обнаружена предаварийная ситуация, которую своевременно ликвидировали. На одной из американских фирм-производителей бумаги в результате тепловизионного осмотра была обнаружена неисправность трансформатора, которая могла нанести ущерб от 200 до 300 тысяч долларов из-за возможных потерь продукции. В теплоэнергетике Великобритании экономический ущерб от неисправного парового крана оценивается на уровне тысячи английских фунтов в год, в то время как на его тепловизионное обследование требуется несколько минут. Неисправные тепловые коммуникации (за рубежом 0,8% всех труб считаются дефектными) наносят ущерб до 1200 долларов США на 1 километр труб. В металлургии продление срока службы футеровки ковша для разлива стали сэкономило английской компании British Steel Corporation в двух случаях соответственно 160 и 180 тысяч фунтов. Для фирмы Usinor (Франция) экономический эффект от аналогичной работы составил 1 миллион франков. По данным фирмы Pilkington (Великобритания) контроль износа печей для производства стекла экономит до 250 тысяч фунтов, причем производительность тепловидения в 25 раз выше визуального осмотра. Сведения об окупаемости тепловизора в течение одного года на среднем нефтехимическом предприятии были сообщены фирмами Shell (Германия) и

ICI (Великобритания). Специальные программы тепловизионных обследований и соответствующие службы контроля имеются на всех атомных электростанциях и многих нефтехимических предприятиях США.

1.2 Области применения ТК

1.2.1 Активный ТК полимерных композиционных материалов

Интерес к полимерным композитам в России особенно возрос в последние годы на фоне экономической стабилизации и определенного возрождения российского военного и авиакосмического комплекса, а также гражданской авиации, ядерной энергетики, судостроения и автомобилестроения. В ведущих западных странах этот интерес возрастал в такт с общим ростом объема применения композитов, который, например, в авиации составил 5 % в 1980 г. и около 50 % в 2007 г. (самолеты B787 и A350). В военной авиации объем применения композитов уже в настоящее время превышает 80 %, соответственно все больше этих материалов используют в автомобилестроении. В промышленности чаще всего применяют стеклопластиковые, углепластиковые и углерод-углеродные (УУ) композиты, боро- и органопластики, а также изготовленные из них многослойные и сотовые несущие элементы. Процесс изготовления таких материалов и эксплуатации изготовленных из них изделий сопровождается появлением макро- (расслоения, непроклеи, прожоги вследствие ремонта) и микро-дефектов (разрывы волокон, микротрещины связующего и др.). Кроме того, компактно расположенные микродефекты могут образовывать макроповреждения, например, ударные повреждения, представляющие собой агломерат микро- и макро-трещин, расположенных специфическим образом относительно точки удара. Соответственно до 50 % разрушения материалов при эксплуатации самолетов корпораций Boeing и Airbus приходится на композиты. При этом значительное число повреждений связано с низкоэнергетическими ударами, которые имеют место в зонах погрузки/разгрузки багажа, посадки пассажиров, а также вследствие воздействия града, падения инструментов и т.п. Высокоэнергетические повреждения, например, образующиеся в результате столкновения с птицами, хорошо видны невооруженным глазом и немедленно ремонтируются, тогда как низкоэнергетические дефекты обычно не обнаруживаются визуально и представляют опасность в ходе последующей эксплуатации самолетов.

Перспективность разработки ТК композитов не требует обоснования. Известно, что после катастрофы космического челнока Columbia в 2003 г., произошедшей вследствие удара двух отвалившихся частей теплозащиты внешнего ускорителя в кромку крыла, Администрация по авиации США NASA интенсифицировала работы по НК теплозащиты космических челноков. Тепловой контроль входит в нормативные документы корпораций Airbus и Boeing. В 2014 г. началось сотрудничество в данной области между корпорацией Airbus, Центральным аэрогидродинамическим институтом (ЦАГИ) и Национальным исследовательским Томским политехническим университетом (НИ ТПУ).

1.2.2 Проблемы ТК композиционных материалов

В данном параграфе сформулированы и приведены в Таблице 1.1 [36] основные проблемы теплового контроля композитов, на решение которых в определенной степени направлены настоящие диссертационные исследования.

Таблица 1.1 - Проблемы ТК композиционных материалов и пути их решения [36]

Проблема	Возможное решение	Что изменилось в последнее пятилетие?
Повышение отношения сигнал/шум, или снижение предельного размера обнаруживаемых дефектов	Оптимизация типа, мощности и геометрии нагрева; использование тепловизоров с повышенной температурной чувствительностью; соответствующая подготовка объектов контроля; использование развитых алгоритмов обработки температурной информации	В исследовательских организациях России появились тепловизионные комплексы высокого уровня (типа FLIR SC 6000, 7000), позволяющие, например, исследовать термомеханические явления в твердых телах. Новые прорывные алгоритмы обработки информации не появились, однако возрос интерес к методу термографической обработки сигнала, основанному на использовании производных от температуры по времени.
Обнаружение микродефектов	Использование методов фототермии и ИК микроскопии, зондирование материалов тепловыми волнами киллогерцовой частоты	Сочетание терминов «тепловой» и «томография» становится все более употребимым, в частности, в области фототермии. Речь идет о методе дифракционной послойной томографии на тепловых волнах (Thermal-

		Wave Slice Diffraction Tomography).
Предотвращение перегрева поверхности материала при импульсной оптической, в т.ч. лазерной, стимуляции	Увеличение длительности импульсов нагрева с учетом ТФХ материала	На практике перегрев возможен при использовании мощных импульсных лазеров, которые редко используются в ТК.
Снижение паразитной засветки при одностороннем ТК	Отсечка излучения ламп на «хвосте» нагрева; использование светодиодных прожекторов; спектральная фильтрация; быстрое диафрагмирование потока нагрева; нанесение «черных» покрытий; использование неоптических средств тепловой стимуляции	Начаты исследования по применению в ТК мощных светодиодов, излучающих основную часть энергии в видимой части спектра.
Повышение поглощенной энергии тепловой стимуляции	Замена поверхностной стимуляции объемной и избирательная стимуляция дефектов, например, ультразвуком; нанесение «черных» покрытий; спектральная фильтрация	Расширяются исследования по ультразвуковой стимуляции «слипшихся» дефектов в композитах.
Обнаружение трещин, в т.ч. ориентированных перпендикулярно к главной поверхности изделия	Использование локализованной оптической, а также вихретоковой и УЗ стимуляции; механическое нагружение	Объем исследований по вихретоковой ИК термографии возрастает.
Разработка методов тепловой дефектометрии	Трехмерное моделирование ТК в анизотропных композитах	Сведения о прорывных результатах отсутствуют. Метод нелинейной подгонки, считающийся корректным с математической точки зрения, по-прежнему неприменим на термограммах большого формата ввиду недопустимо большого времени счета.
Автоматизация обработки экспериментальных данных	Роботизация эксперимента; использование алгоритмов, не связанных с механизмом теплопередачи и не требующих выбора бездефектных точек (Фурье-анализ и метод главных компонент); использование компьютерных программ для «сшивания» отдельных ИК термограмм	Разработаны стационарные и переносные установки для ТК, прежде всего, в авиации. На рынке заметно присутствие ряда германских фирм.

1.2.3 Обнаружение коррозии в металлических объектах

Состояние исследований по обнаружению коррозии можно анализировать в двух аспектах: 1) общее состояние проблемы неразрушающего контроля коррозии ответственных стальных изделий в промышленности в целом и в ядерной и теплоэнергетике, в частности; 2) состояние теплового неразрушающего контроля, в частности, коррозии толстостенных изделий из металлов.

Огромное количество толстостенных металлических объектов - нефтяных цистерн и баков, трубопроводов, котлов и т.п. - используется человечеством во многих отраслях промышленности. По некоторым данным, потери за счет коррозии и износа составляют в развитых странах до 3 % объема национального продукта. Своевременное обнаружение коррозии в ответственных частях технических сооружений является важнейшей задачей технической диагностики.

Коррозию металлов обычно оценивают, используя ультразвуковой и вихретоковый методы неразрушающих испытаний. Недостатками указанных методов являются наличие специальных требований к контролируемым поверхностям, а также их контактность и низкая производительность испытаний. В качестве аналога можно сослаться на сходную ситуацию, сложившуюся с обнаружением коррозии в самолетах, в связи с которой Федеральное Авиационное Агентство США (FAA) провело тендер для фирм-производителей аппаратуры для неразрушающего контроля [37, 38]. По результатам тендера было определено, что метод ИК термографии заслуживает дальнейшего развития. В целом, нестационарная ИК термография является признанным методом контроля дефектов в композиционных материалах, используемых преимущественно в авиакосмической технике. Группа исследователей НИ ТПУ во главе с В.П. Вавиловым внесли существенный вклад в данную область, разработав методики неразрушающих испытаний [39] и программный продукт, поставляемый за рубеж (США, Великобритания, Канада, Германия, Италия, Финляндия, Китай, Индия).

Физические принципы применения теплового метода для обнаружения коррозии в толстостенных металлических объектах – те же, что и в случае контроля алюминиевых самолетных панелей, тем не менее, имеется ряд следующих особенностей.

- В стальных изделиях температурные сигналы в зонах уноса материала существуют в течение значительно более длительного времени, нежели в тонких алюминиевых листах (вплоть до десятков секунд), однако с ростом толщины металла усиливается диффузия

тепла, а также возникает проблема оптимального прогрева изделия по всей глубине, что требует поглощения металлом значительной энергии.

- Испытания изделий большей толщины возможны, если металлический объект имеет равномерный высокий коэффициент излучения, малую кривизну поверхности и разрешает свободный доступ к зоне контроля. При этом чаще всего оптимальными для нагрева являются галогеновые лампы.

Одним из перспективных направлений решения проблемы повышения теплового контраста в процедуре обнаружения скрытой коррозии является разработка двухволновой ИК термографии. Сущность этого метода позаимствована из цветовой пирометрии, где осуществляется эффективное подавление влияния коэффициента излучения на результаты измерений температуры, однако возможности метода в ИК термографии практически не исследованы. Ряд исследований в данном направлении выполнен в Ливерморской национальной лаборатории США [40]. Предварительный анализ возможностей двухволнового метода при тепловом контроле коррозии проводился во Фраунгоферовском Институте неразрушающего контроля г. Саарбрюкена, Германия [41].

В США поставщиком аппаратуры теплового контроля коррозии в алюминиевых панелях самолетов является фирма Thermal Wave Imaging. Однако следует заметить, что данная аппаратура в принципе не может быть применена для обнаружения коррозии в толстостенных металлических изделиях, поскольку используемый в ней принцип импульсного нагрева ксеноновыми импульсными лампами не может обеспечить регистрируемый рост температуры металлов толщиной более 2 – 3 мм. Единственной из известных систем по контролю коррозии в толстостенных металлических изделиях является система, разработанная в Управлении по авиации США (NASA) по контролю коррозии в трубных досках бойлеров тепловых электростанций [42], реализующая принцип линейного сканирования [43-45]. Площадь поверхности котлов, подлежащей контролю, может достигать 9000 м², поэтому стандартные методы НК, такие как УЗ и вихретоковый, малопригодны. Система ТК включает полосовой нагреватель (3 кВт лампа длиной 40 см с рефлектором) и тепловизор (температурное разрешение 0,025 °С), перемещающиеся вертикально вдоль котла со скоростью до 50 мм/с. При ширине полосы нагрева 1,3 см избыточная температура нагрева не превышает 10 °С. Тепловизор непрерывно записывает в память текущие термограммы, но окончательное изображение формируется с помощью компьютера путем отбора тех строк сканирования, которые соответствуют определенному времени задержки (~ 0,5 - 1 с). В качестве прототипа авторы системы ссылаются на метод контроля коррозии в коленах стальных труб, нагрева которых осуществляется путем пропускания горячей воды, описанный К.Малдагом в

1993 г. [43], однако справедливости ради следует заметить, что в СССР устройства ТК с полосовым нагревом были разработаны В.А. Стороженко, Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадиным и Е.В. Абрамовой еще в 70-х годах прошлого века [44, 45]. При НК стеклопластиковых композитов эффективность этих устройств была весьма высокой.

1.3 Способы активного ТК (на примере изделий цилиндрической формы)

Наименования и краткие описания процедур активного ТК цилиндрических изделий приведены в Таблице 1.2 на примере изделий цилиндрической формы, однако в равной мере эти процедуры применимы для испытаний объектов любой формы. Рассмотрены оптический и ультразвуковой способы тепловой стимуляции как наиболее употребляемые, хотя могут быть использованы и другие способы, например, индукционный нагрев.

Таблица 1.2 – Описание процедур активного ТК в приложении к изделиям цилиндрической формы

Процедура ТК	Описание
Односторонний контроль	
<p>Односторонний контроль, равномерный нагрев, распределенный нагреватель (Рисунок 1.1)</p>	<p>Наиболее распространенная в настоящее время процедура ТК. Как правило, максимальная производительность испытаний. Нагрев осуществляют лампами различного типа или феном. Температуру регистрируют в отдельных зонах с помощью тепловизора, после чего термограммы отдельных зон «сшивают». В каждой зоне производится нагрев с записью последовательности ИК термограмм. Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) сильно зависит от глубины залегания дефектов. Данная процедура наиболее пригодна для дефектов, расположенных вблизи поверхности контроля. Параметры контроля: F - зона однократного контроля; τ_h - время нагрева; τ_m - время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T / T$; τ_{end} - полное время процесса (записи последовательности); $F / (\tau_{end} + \tau_{adj})$ - производительность контроля (τ_{adj} - время настройки при переходе от одной зоны к другой). Для обработки последовательностей ИК термограмм используют различные процедуры повышения отношения сигнал/шум, основанные на особенностях поведения температурного сигнала во времени.</p>
<p>Односторонний контроль, сканирующий нагрев, полосовой нагреватель</p>	<p>Изделие нагревают полосовым нагревателем; температуру регистрируют в полосе, параллельной полосе нагрева. Изделие просматривается либо за один оборот (если длина полосы нагрева равна длине изделия), либо путем ленточного сканирования. Данная процедура использовалась в СССР в 1980-е годы для контроля стеклопластиковых цилиндров. В настоящее время испытывает</p>

(Рисунок 1.2)	<p>возрождение в США. При правильном выборе полосового нагревателя обеспечивает хорошую равномерность нагрева и достаточно высокую производительность испытаний.</p> <p>Ранее, для регистрации температуры использовали строчно-сканирующий ИК термометр, причем строка сканирования размещалась на расстоянии $S = V_{rev} \tau_m$ ($V_{rev} = \omega R$ -линейная скорость вращения изделия; ω -угловая скорость вращения изделия; R -радиус изделия).</p> <p>В настоящее время предложена процедура с использованием тепловизора; при этом температурное поле записывают непрерывно с определенной скоростью таким образом, что за время записи строки изделие поворачивается на ширину строки; с помощью компьютера выбирают строки соответствующие определенным временам задержки $\tau_{m1}, \tau_{m2}, \tau_{m3} \dots$</p> <p>Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) сильно зависит от глубины залегания дефектов, поэтому результат при одном времени задержки оптимально выявляет дефекты на определенной глубине; считается, что нужно выбирать время задержки для наиболее глубокого дефекта, тогда будут видны дефекты по всей глубине.</p> <p>Данная процедура наиболее пригодна для дефектов, расположенных вблизи поверхности контроля.</p> <p>Параметры контроля: L -длина строки сканирования; d -ширина строки сканирования; V_{rev} -линейная скорость вращения; τ_h -время нагрева; $\tau_m = H / V_{rev}$ -время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T / T$ (H -расстояние между полосой нагрева и полосой сканирования); $L V_{rev}$ - производительность контроля при плотной укладке строк сканирования.</p> <p>Алгоритмы обработки ИК термограмм разработаны слабо.</p>
Односторонний контроль, сканирующий нагрев, точечный нагреватель (Рисунок 1.3)	<p>Изделие движется по винтовой траектории, нагрев и регистрацию температуры осуществляют в малых зонах.</p> <p>С теоретической точки зрения наиболее чувствительная к внутренним дефектам процедура при одностороннем доступе к изделию, но обладающая наименьшей производительностью. Обеспечивает высокую равномерность нагрева, поскольку каждая точка поверхности нагревается в одних и тех же условиях.</p> <p>Для нагрева используют точечные нагреватели различного типа; для регистрации температуры используют ИК термометр, причем зону сканирования размещают на расстоянии $S = V_{rev} \tau_m$ ($V_{rev} = \omega R$ -линейная скорость вращения изделия; ω -угловая скорость вращения изделия; R -радиус изделия) от ИК термометра.</p> <p>Каждая однократная развертка поверхности соответствует определенному времени задержки τ_{m1}.</p> <p>Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) сильно зависит от глубины залегания дефектов, поэтому результат при одном времени задержки оптимально выявляет дефекты на определенной глубине; считается, что нужно выбирать время задержки для наиболее глубокого дефекта, тогда будут видны дефекты по всей глубине.</p> <p>Данная процедура наиболее пригодна для дефектов, расположенных вблизи поверхности контроля.</p> <p>Параметры контроля: d -диаметр зоны сканирования; V_{rev} -линейная</p>

	<p>скорость вращения; τ_h - время нагрева; $\tau_m = H/V_{rev}$ - время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T/T$ (H - расстояние между полосой нагрева и полосой сканирования); dV_{rev} - производительность контроля при плотной укладке строк сканирования.</p> <p>Алгоритмы обработки ИК термограмм разработаны слабо.</p>
<i>Двухсторонний контроль</i>	
<p>Двухсторонний контроль, равномерный нагрев, полосовой нагреватель (Рисунок 1.4)</p>	<p>Наиболее распространенная в настоящее время процедура ТК. Как правило, максимальная производительность испытаний. Изделие нагревают внутри полосовым нагревателем, расположенным по оси цилиндра; температуру регистрируют в отдельных зонах с помощью тепловизора, после чего термограммы отдельных зон «сшивают».</p> <p>В каждой зоне производится нагрев с записью последовательности ИК термограмм.</p> <p>Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) слабо зависят от глубины залегания дефектов (согласно теории, лучше всего обнаруживаются дефекты в середине изделия). В целом, двухсторонняя процедура наиболее пригодна для обнаружения дефектов по всей толщине изделия.</p> <p>Параметры контроля: F - зона однократного контроля; τ_h - время нагрева; τ_m - время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T/T$; τ_{end} - полное время процесса (записи последовательности); $F/(\tau_{end} + \tau_{adj})$ - производительность контроля (τ_{adj} - время настройки при переходе от одной зоны к другой).</p> <p>Для обработки последовательностей ИК термограмм используют различные процедуры повышения отношения сигнал/шум, основанные на особенностях поведения температурного сигнала во времени.</p>
<p>Двухсторонний контроль, сканирующий нагрев, полосовой нагреватель (Рисунок 1.5)</p>	<p>Изделие нагревают полосовым нагревателем; температуру регистрируют в полосе, параллельной полосе нагрева.</p> <p>Изделие просматривается либо за один оборот (если длина полосы нагрева равна длине изделия), либо путем ленточного сканирования. Данная процедура использовалась в СССР в 1980-е годы для контроля стеклопластиковых цилиндров. В настоящее время испытывает возрождение в США. При правильном выборе полосового нагревателя обеспечивает хорошую равномерность нагрева и достаточно высокую производительность испытаний.</p> <p>Ранее, для регистрации температуры использовали строчно-сканирующий ИК термометр, причем строка сканирования размещалась на расстоянии $S = V_{rev} \tau_m$ ($V_{rev} = \omega R$ - линейная скорость вращения изделия; ω - угловая скорость вращения изделия; R - радиус изделия).</p> <p>В настоящее время предложена процедура с использованием тепловизора; при этом температурное поле записывают непрерывно с определенной скоростью таким образом, что за время записи строки изделие поворачивается на ширину строки; с помощью компьютера выбирают строки соответствующие определенным временам задержки $\tau_{m2}, \tau_{m2}, \tau_{m3} \dots$</p> <p>Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) слабо зависят от глубины залегания дефектов (согласно теории, лучше всего</p>

	<p>обнаруживаются дефекты в середине изделия). В целом, двухсторонняя процедура наиболее пригодна для обнаружения дефектов по всей толщине изделия.</p> <p>Параметры контроля: L-длина строки сканирования; d-ширина строки сканирования; V_{rev}-линейная скорость вращения; τ_h-время нагрева; $\tau_m = H/V_{rev}$-время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T/T$ (H-расстояние между полосой нагрева и полосой сканирования); LV_{rev}-производительность контроля при плотной укладке строк сканирования.</p> <p>Алгоритмы обработки ИК термограмм разработаны слабо.</p>
<p>Двухсторонний контроль, сканирующий нагрев, точечный нагреватель (Рисунок 1.6)</p>	<p>Изделие движется по винтовой траектории, нагрев и регистрацию температуры осуществляют в малых зонах.</p> <p>С теоретической точки зрения наиболее чувствительная к внутренним дефектам процедура из всех известных «классических» процедур активного ТК, но обладающая наименьшей производительностью. Обеспечивает идеальную равномерность нагрева, поскольку каждая точка поверхности нагревается в одних и тех же условиях.</p> <p>Для нагрева используют точечные нагреватели различного типа; для регистрации температуры используют ИК термометр, причем зона сканирования размещается на расстоянии $S = V_{rev} \tau_m$ ($V_{rev} = \omega R$-линейная скорость вращения изделия; ω-угловая скорость вращения изделия; R-радиус изделия).</p> <p>Каждая однократная развертка поверхности соответствует определенному времени задержки τ_{m1}.</p> <p>Амплитуда сигнала и время наблюдения (время задержки) слабо зависят от глубины залегания дефектов (согласно теории, лучше всего обнаруживаются дефекты в середине изделия). В целом, двухсторонняя процедура наиболее пригодна для обнаружения дефектов по всей толщине изделия.</p> <p>Параметры контроля: d-диаметр зоны сканирования; V_{rev}-линейная скорость вращения; τ_h-время нагрева; $\tau_m = H/V_{rev}$-время регистрации дифференциального сигнала ΔT или текущего контраста $C = \Delta T/T$ (H-расстояние между полосой нагрева и полосой сканирования); dV_{rev}-производительность контроля при плотной укладке строк сканирования.</p> <p>Алгоритмы обработки ИК термограмм разработаны слабо.</p>
<p>Ультразвуковая стимуляция (Рисунок 1.7)</p>	<p>Ультразвуковая стимуляция объекта контроля с помощью ультразвука (частота около 22 кГц, электрическая мощность 50-1000 Вт). Структурные дефекты материала генерируют тепло вследствие трения стенок дефектов. Данный метод начал разрабатываться в последнее десятилетие и остается малоизученным.</p>
<p>Индукционная стимуляция (рисунок отсутствует, поскольку данный способ не рассматривается в диссертации)</p>	<p>Индукционная стимуляция объекта контроля в поле частотой 10-100 кГц (мощность до десятков кВт). Метод применим к электропроводящим материалам с дефектами в виде трещин. Начал разрабатываться в последнее десятилетие и остается малоизученным.</p>

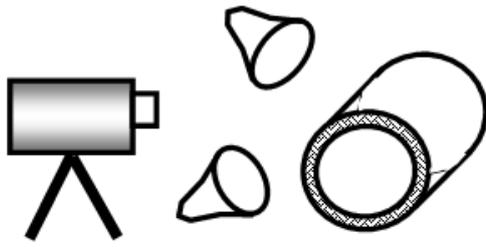


Рисунок 1.1 – Односторонний контроль, равномерный нагрев, распределенный нагреватель

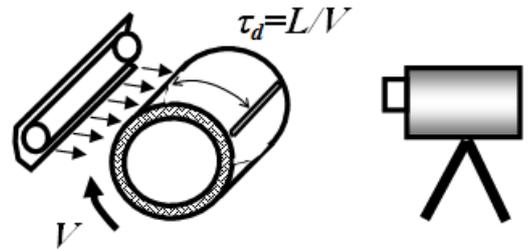


Рисунок 1.2 – Односторонний контроль, сканирующий нагрев, полосовой нагреватель

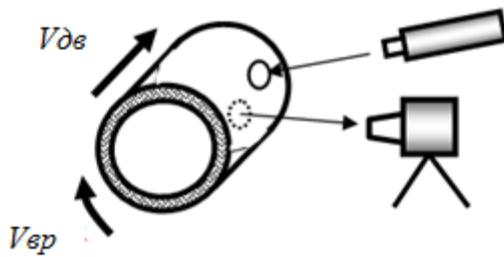


Рисунок 1.3 – Односторонний контроль, сканирующий нагрев, точечный нагреватель

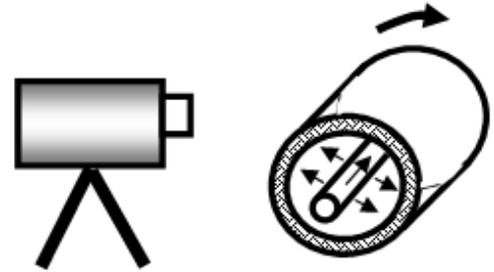


Рисунок 1.4 – Двухсторонний контроль, равномерный нагрев, полосовой нагреватель

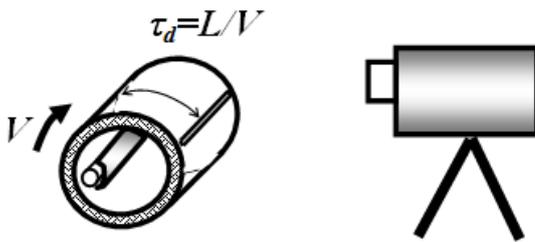


Рисунок 1.5 – Двухсторонний контроль, сканирующий нагрев, полосовой нагреватель

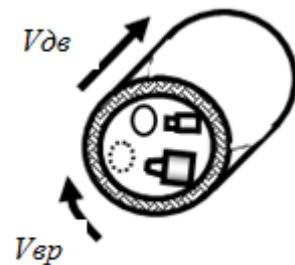


Рисунок 1.6 – Двухсторонний контроль, сканирующий нагрев, точечный нагреватель

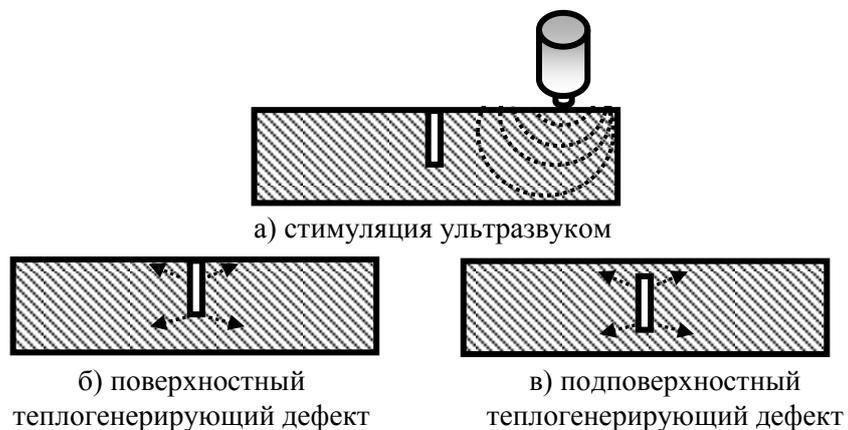


Рисунок 1.7 – Ультразвуковой инфракрасный термографический контроль

1.4 Коммерческие системы активного ТК

Практические аспекты ТК связаны с появлением на рынке специализированных устройств контроля. Как отмечалось выше, пионером коммерциализации явилась фирма Thermal Wave Imaging (США), которая запатентовала способ «термографической обработки сигнала» (TSR – Thermal Signal Processing) и выпускает несколько моделей тепловых дефектоскопов, реализующих принцип импульсного ТК. В последнее десятилетие аналогичные устройства начали производиться германскими фирмами Automation Technology, EDEVIS, Thermosensorik и др. (см. Рисунок 1.8), причем основными потребителями аппаратуры ТК являются военный сектор и авиация.



а



б



в



г

*д**е*

Рисунок 1.8 - Коммерческие устройства для активного теплового контроля:

- а* – ThermoScope (Thermal Wave Imaging, США) [46];
- б* – устройство для обнаружения скрытой коррозии (НИ ТПУ, Россия);
- в* – ThermoSpectorWELD (Thermosensorik, Германия) [47];
- г* – устройство для контроля самолетов (Automation Technology, Германия) [48];
- д* – многопрофильное устройство для активного ТК (EDEVIS, Германия) [49];
- е* – лабораторное устройство для активного ТК (InfraТес, Германия) [50]

1.5 Выводы по Главе 1

- Несмотря на то, что анализ поверхностных температурных полей объектов неразрушающего контроля (НК) можно осуществлять различными инструментами (термопарами, жидкими кристаллами и т.п.), история теплового контроля (ТК) неразрывно связана с развитием метода инфракрасной (ИК) термографии, поскольку именно этот метод обусловил одно из важных преимуществ ТК, а именно, высокую производительность испытаний. Таким образом, в начальный период развития ТК заявил о себе как о скрининговом методе НК.
- Развитие отечественного ТК было начато еще во времена бывшего СССР, причем уже в 1970-1980 гг. были заложены основы активного метода испытаний и создана теория ТК. Теоретические исследования тех лет, по крайней мере, находились на мировом уровне. Основными сферами практического применения ТК были энергетика, строительство, а также военная и космическая отрасли. Тем не менее, доверие специалистов в промышленности к тепловому методу было невелико, в основном, из-за низкого технического уровня и низкой надежности отечественных тепловизоров и высокой стоимости зарубежных приборов.
- После периода застоя в области тепловидения, пришедшегося на период перестройки, в последнюю декаду наблюдается взрывообразный рост интереса как зарубежных, так и отечественных специалистов к ТК. Этому способствовали следующие факторы: 1) появление на рынке бюджетных тепловизоров, что обусловило их широкое

применение в энергоаудите и электротехнике, а также малогабаритных тепловизионных модулей, что позволило разрабатывать переносные тепловые дефектоскопы для активного ТК; 2) определенное завершение теории классического ТК и переход в академическом плане к решению обратных задач нестационарной теплопроводности, то есть к тепловой дефектометрии; 3) появление новых способов тепловой стимуляции твердых тел, таких как ультразвуковая, вихретоковая и т.п. (здесь термин «новый» используется в том смысле, что малогабаритные быстродействующие тепловизоры с цифровой записью частотой до 1000 Гц (20 кГц в особых случаях) позволили более эффективно стыковать устройства нагрева и измерения температуры. Последний фактор, например, позволил контролировать тепловым методом металлы, что было затруднительно в предыдущие годы.

- За последние 10 лет объем использования композиционных материалов в гражданских самолетах возрос не менее чем на порядок, а в военной авиации достиг чуть ли не физического предела.
- По данным Airbus и Boeing около 50% разрушения несущих конструкций самолетов приходится на композиты.
- Контроль качества композиционных материалов (стекло-, боро-, органо- и углепластиков) остается одной из основных областей применения активного ТК. Основные проблемы ТК композитов и способы их решения приведены в Таблице 1.1, дополненной информацией о сдвигах, произошедших в указанных областях с 2010 г.
- В последнюю декаду на рынке появились коммерческие тепловые дефектоскопы фирм Thermal Wave Imaging, Automation Technology, Edevis и др.
- Комбинирование серийных устройств ТК с достижениями в области теории теплопроводности и обработки ИК изображений позволяет надеяться на разработку практических способов ТК, где слово «количественный» относится не к измерению температуры, а к экспрессному определению теплофизических свойств материалов, включая анализ их анизотропии, а также оценку параметров скрытых дефектов.
- Важным направлением дальнейших исследований является установление связи между степенью «серьезности» дефектов и выбранными параметрами их идентификации.
- Настоящие диссертационные исследования базируются на тезисе о том, что ранее полученные теоретические и фрагментарные результаты по ТК металлов и композиционных материалов и изделий необходимо подвергнуть более тщательной проверке и систематизации и на этой основе создать отечественный прототип теплового дефектоскопа достаточно универсального применения. Следует признать, что в

экспериментальном плане речь идет о выходе на мировой уровень, в то время как работы по созданию теории и технологии контроля находятся на уровне передовых зарубежных исследований и по ряду аспектов превосходят их.

- «Классический» ТК с использованием оптического нагрева может быть дополнен ультразвуковой стимуляцией трещин в композитах, в результате чего реализуют принцип так называемого «темного поля», когда дефекты генерируют тепловую энергию вследствие внутреннего трения (и пластической деформации), а начальная температура основного материала не изменяется.

Глава 2. Алгоритмическое обеспечение активного теплового контроля

2.1 Результаты решения теоретических задач ТК. Базовые зависимости температурных сигналов от параметров дефектов

В данном разделе изложены базовые зависимости динамических температурных сигналов от параметров скрытых дефектов на примере композиционных материалов типа углепластика, который является одним из основных объектов ТК в авиакосмической промышленности. Численное трехмерное моделирование выполнено с использованием компьютерной программы ThermoCalc-6L, разработанной в Томском политехническом университете (авторы М.С. Суханов и В.П. Вавилов). Более детально данные базовые зависимости неоднократно обсуждались в многочисленных публикациях зарубежных исследователей и сотрудников Томского политехнического института, включая диссертанта [51-55].

2.1.1 Моделируемые параметры ТК

В данном разделе диссертации приведены результаты численного моделирования большого числа дефектных ситуаций при одно- и двухстороннем ТК углепластика.

Рассмотрены следующие тестовые модели:

- материалы: стеклопластик, углепластик (с покрытиями и без);
- процедуры ТК: одно- и двухсторонняя;
- тип нагрева: импульс длительностью τ_h , равномерно-распределенная плотность мощности Q ;
 - толщина материала: 1-5 мм;
 - поперечные размеры дефектов: 5-50 мм;
 - глубина дефектов: по глубине объекта контроля;
 - толщина газонаполненных дефектов: 0.05-0.2 мм.

Рассчитываемые параметры:

- максимальный температурный сигнал ΔT_m ;
- оптимальное время контроля $\tau_m(\Delta T_m)$;
- максимальный текущий контраст температуры $Con_m = (\Delta T / T)_m$;

- оптимальное время контроля $\tau_m(C_m)$.

Индексы «F» или «R», присоединенные к вышеупомянутым параметрам, обозначают нагреваемую (Front) и противоположную нагреву (Rear) поверхности.

2.1.2 Изменение температурных сигналов во времени

Анализ изменения температурных параметров ΔT и Con^{rim} во времени представляет особый интерес, поскольку они используются как для повышения отношения сигнал/шум, так и для тепловой дефектометрии.

Развитие температуры на обеих поверхностях углепластикового изделия толщиной 2 мм показаны на Рисунке 2.1 и Рисунке 2.2. Два воздушных дефекта размером 10x10x0.1 мм расположены на глубине 0.5 мм, причем отсчет произведен как от передней, так и от задней поверхностей. Поскольку применен импульсный нагрев ($\tau_h=10$ мс), максимальные разности между дефектной T_d и бездефектной T_{nd} температурами наступают на стадии охлаждения ($\tau > \tau_h$). Расчетные температурные сигналы $\Delta T = T_d - T_{nd}$ сравнены с соответствующими температурными контрастами $Con = \Delta T / T_{nd}$. На обеих поверхностях максимальные значения вышеуказанных параметров имеют место в различные моменты времени. На передней поверхности (Рисунок 2.1а) максимальный сигнал ΔT_m наступает раньше, чем максимум контраста (Рисунок 2.1б), если это происходит на стадии охлаждения. Напомним, что из теории ТК следует, что, если соответствующие максимумы наступают внутри импульса нагрева (при длительном нагреве), то максимум контраста Con_m опережает максимум дифференциального температурного сигнала ΔT_m . Заметим также, что во многих случаях, максимальное отношение сигнал/шум соответствует максимуму текущего контраста, поэтому момент времени $\tau_m(Con_m)$ рассматривают как оптимальное время ТК. На задней поверхности максимум контраста возникает при очень коротких временах наблюдения, когда сама избыточная температура поверхности, а также дифференциальный сигнал, весьма малы (Рисунок 2.2б, в). Поэтому при двухстороннем ТК оптимальным моментом является такой, при котором сигнал ΔT начинает превышать уровень шума. Следует отметить, что, если теплопроводность дефекта ниже, чем теплопроводность основного материала, то при принятых обозначениях дифференциальные температурные сигналы являются положительными на нагреваемой поверхности ($\Delta T > 0$) и отрицательными на задней поверхности объекта контроля

($\Delta T < 0$). Знаки сигнала меняются на обратные, если теплопроводность дефекта выше, чем теплопроводность основного материала.

Функцию $T(\tau)$ можно анализировать в различных координатах, что позволяет:
 1) снизить динамический диапазон сигнала; 2) обнаружить характерные точки, например, точки изгиба, экстремумов и т.п.; 3) оптимально применять ряд алгоритмов обработки данных, например, полиномиальную аппроксимацию.

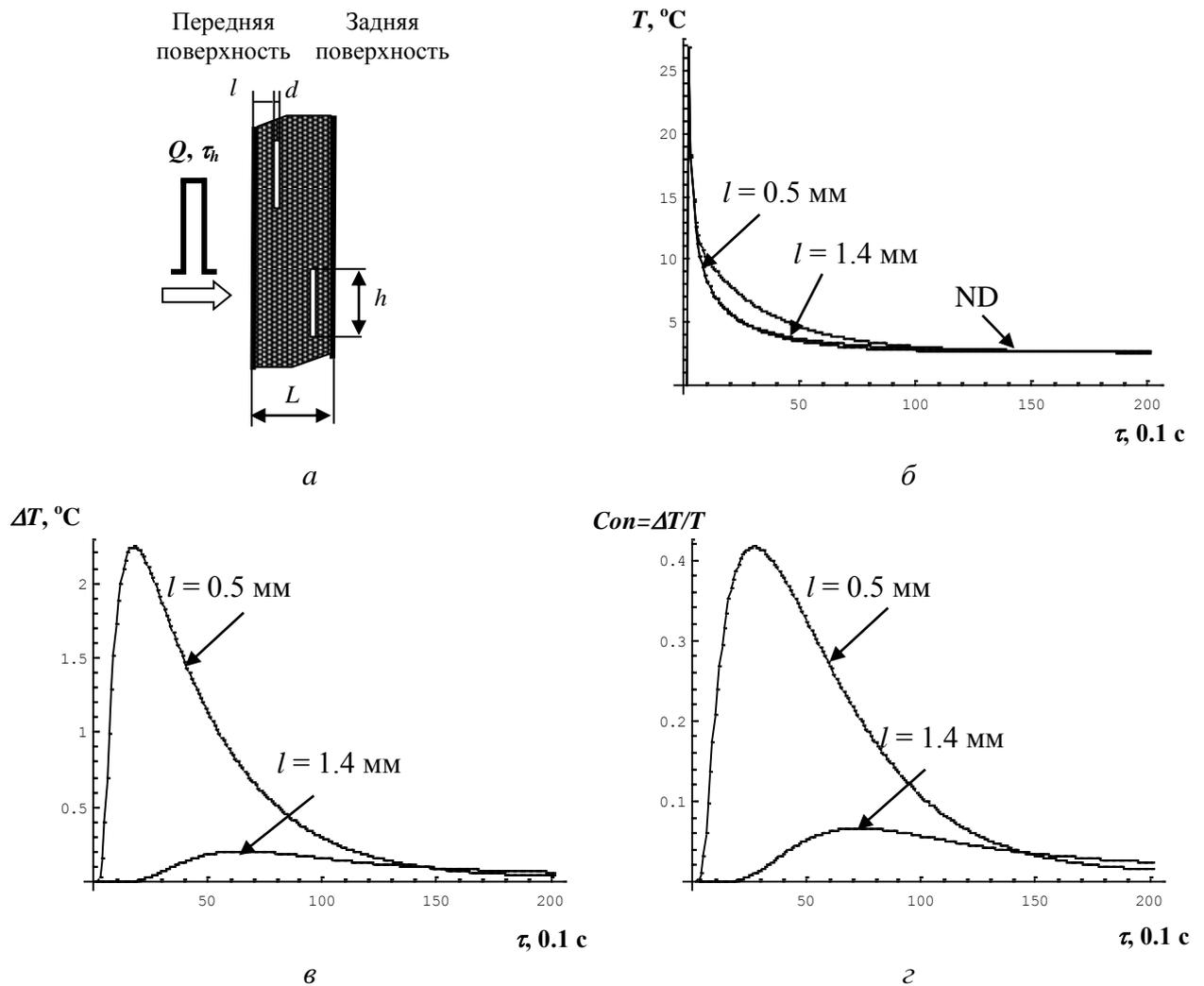


Рисунок 2.1 – Изменение температурных сигналов во времени на передней поверхности изделия из углепластика толщиной 2 мм, содержащего воздушный дефект размером $10 \times 10 \times 0.1$ мм (трехмерная декартова система координат, $L=2$ мм, $\lambda_x=8.04$ Вт/(м $^\circ$ С), $\lambda_y=0.56$ Вт/(м $^\circ$ С), $\lambda_z=0.57$ Вт/(м $^\circ$ С), $\alpha_x=44.5 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с, $\alpha_y=3.10 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с, $\alpha_z=3.15 \cdot 10^{-7}$ м 2 /с, $Q=10^6$ Вт/м 2 , $\tau_h=10$ мс):

a – схема дефекта;

б - T как функция времени τ ;

в - ΔT как функция времени τ ;

г - $C = \Delta T / T$ как функция времени τ

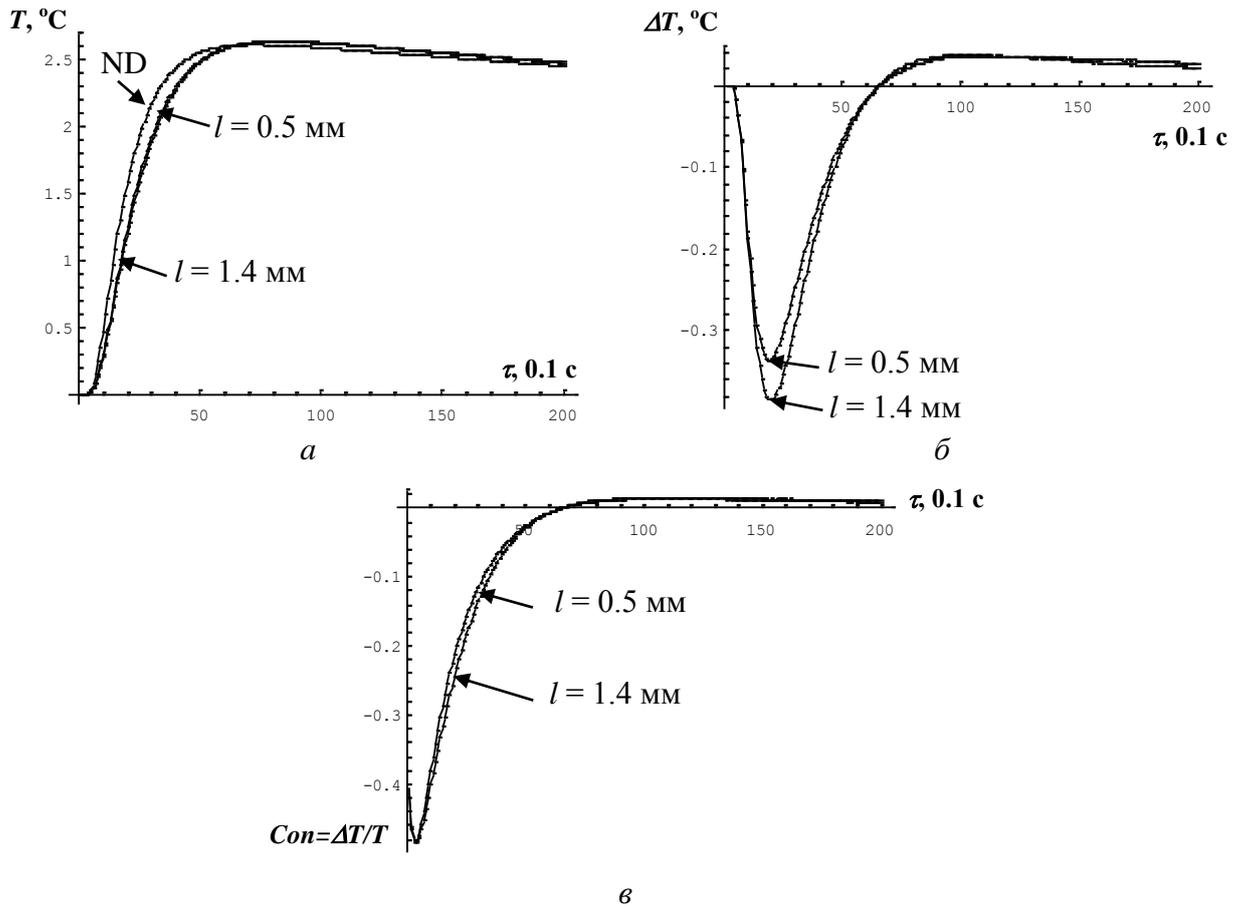


Рисунок 2.2 – Изменение температурных сигналов во времени на задней поверхности изделия из углепластика толщиной 2 мм, содержащего воздушный дефект размером $10 \times 10 \times 0.1$ мм (схема контроля Рисунке 2.1):

- a* - T как функция времени τ ;
- б* - ΔT как функция времени τ ;
- в* - $Con = \Delta T/T$ как функция времени τ

2.1.3 Пространственные температурные профили

Рассмотрим три воздушных дефекта толщиной 0,1 мм и диаметром 2, 10 и 50 мм, расположенные в образце из углепластика толщиной 5 мм на глубине 1 мм. Образец нагревается импульсом, имеющим энергию 10^4 Дж/м² при длительности 10 мс. Оптимальные времена контроля данных дефектов: 0,94; 1,47 и 1,76 с соответственно. Температурные профили, рассчитанные в двухмерной цилиндрической системе координат, показаны на Рисунке 2.3а; температурные сигналы ΔT_m приведены на Рисунке 2.3б. Поскольку дефекты диаметром 10 и 50 мм характеризуются близкими значениями максимального сигнала ΔT_m (~ 1 °C), их можно рассматривать как бесконечные в поперечных направлениях. В тоже время дефект диаметром 2 мм создает сигнал в 9 раз

ниже ($\Delta T_m \sim 0.11$ °C) при вдвое более коротком оптимальном времени наблюдения. Очевидно, что феномен поперечной диффузии тепла сильнее в высокотеплопроводных материалах, что иллюстрируется данными для алюминия на Рисунке 2.3в. Видно, что дефекты диаметром 2 и 50 мм создают существенно различные значения ΔT_m и τ_m .

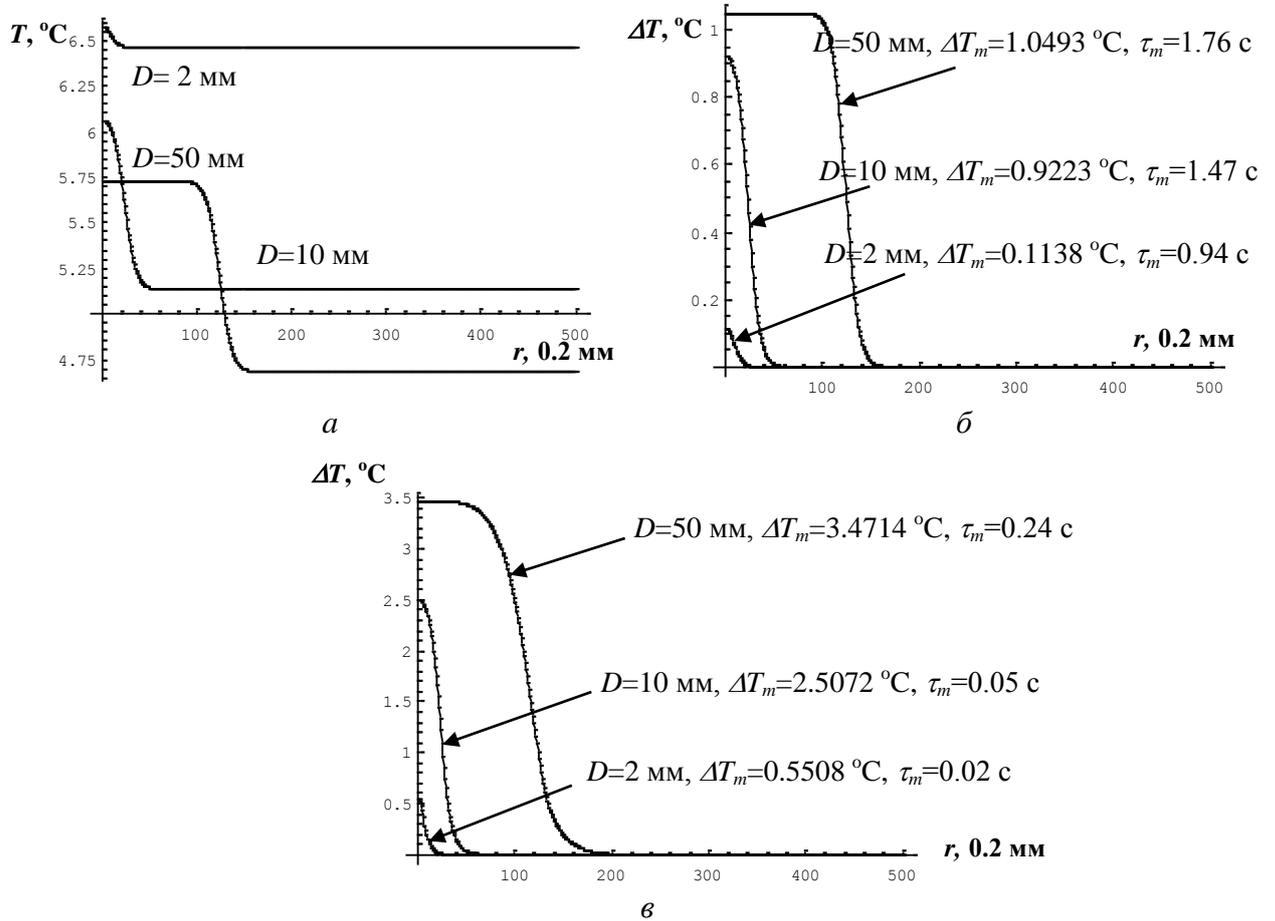


Рисунок 2.3 – Пространственные профили температуры над дисковидными дефектами в углепластике (двухмерная цилиндрическая геометрия, $L=5$ мм, $l=1$ мм, $d=0.1$ мм, $D=2, 10, 50$ мм, $Q=10^6$ Вт/м², $\tau_h=10$ мс):

- а* - T как функция радиальной координаты ($\lambda_r=3.2$ Вт/(м·°C), $\alpha_z=5.2 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha_r=26 \cdot 10^{-7}$ м²/с), углепластик;
- б* - ΔT как функция радиальной координаты, углепластик;
- в* - ΔT как функция радиальной координаты, алюминий ($\lambda_{r,z}=177$ Вт/(м·°C), $\alpha_{r,z}=7.8 \cdot 10^{-5}$ м²/с)

Примеры выше показывают, что известное правило перехода от бесконечных дефектов к конечным, формулируемое как $H/l > 2-3$ (H – поперечный размер дефекта, l – глубина залегания дефекта), не является верным. Более реалистичным является соотношение $H/l > 8-12$ для неметаллов и $H/l > 20-30$ для металлов, хотя и это отношение зависит от материала, момента контроля и глубины залегания дефектов.

2.1.4 Глубина залегания дефектов

Сравнительные результаты для одно- и двухстороннего ТК приведены на Рисунке 2.4. Дифференциальные температурные сигналы ΔT_m спадают экспоненциально с ростом глубины дефектов l в односторонней процедуре, в то время как оптимальное время контроля возрастает в зависимости от комбинации L , l и h . Очевидно, что наиболее трудно обнаружить дефекты, расположенные вблизи задней поверхности. В двухсторонней процедуре ТК оба параметра ΔT_m и τ_m слабо зависят от l , причем их максимальные значения имеют место для дефектов, расположенных ближе к середине изделия. Этот феномен хорошо виден и для наиболее стабильного параметра контроля τ_m . Максимум ΔT_m слегка сдвинут к задней поверхности из-за конечного размера дефектов. Напомним, что сигналы на R -поверхности отрицательны для слаботеплопроводных дефектов.

На Рисунке 2.4 штриховой линией показана функция $\tau_m = l^2 / a$ ($a = 3.15 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ в данном случае), которая следует из теории тепловых волн и рекомендуется рядом авторов для оценки τ_m . Видно, что квадратичная функция дает разумные результаты только для неглубоких дефектов и ведет к значительным переоценкам при $l > 1 \text{ мм}$.

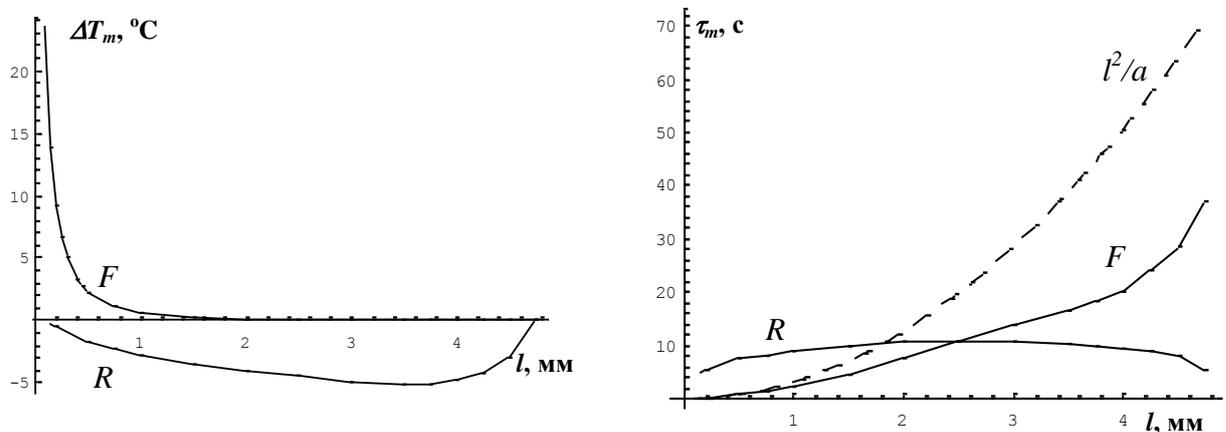


Рисунок 2.4 - Параметры ΔT_m и τ_m как функции глубины дефектов (модель Рисунка 2.3, $L=5 \text{ мм}$)

2.1.5 Толщина (тепловое сопротивление) дефектов

Дефекты с бóльшим тепловым сопротивлением (толщиной) производят бóльшие сигналы при более длительных временах. Это положение проиллюстрировано на Рисунке 2.5, где представлены зависимости ΔT_m и τ_m от h для бесконечного в поперечном направлении дефекта и дефекта размером 10x10 мм как в одно-, так и в двухстороннем ТК. Все зависимости проявляют насыщение для «толстых» дефектов; «бесконечные» дефекты характеризуются вдвое бóльшими сигналами по сравнению с дефектом 10×10 мм.

Можно принять, что во многих материалах максимальные температурные сигналы связаны линейной зависимостью с толщиной дефектов (их тепловым сопротивлением) в диапазоне от 0 до 0,2 мм.

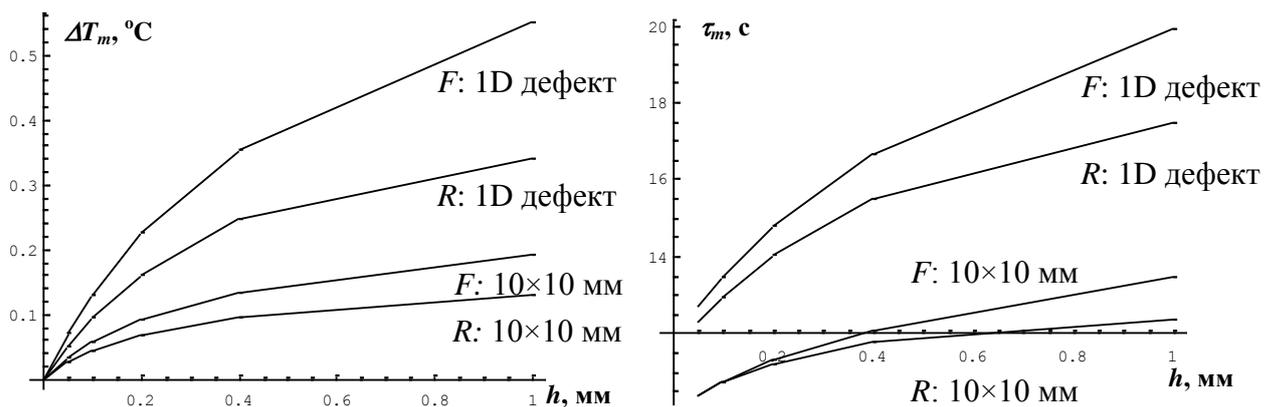


Рисунок 2.5 – Зависимость ΔT_m и τ_m от толщины дефектов (модель Рисунка 2.3, $L=5$ мм)

2.2 Обзор методов обработки динамических ИК термограмм

Типичная экспериментальная процедура активного ТК завершается регистрацией последовательности ИК термограмм, которая отражает изменение поверхностной температуры объекта контроля $T(x, y, \tau)$ во времени. Математически такая последовательность может рассматриваться как трехмерная матрица температурных данных $T(i, j, k)$. В ТК алгоритмы обработки данных бывают либо одномерными $T(\tau)$ (1D), либо двумерными $T(x, y)$ (2D). Отдельные термограммы обычно фильтруются

и/или сегментируются для снижения случайного шума и/или анализа геометрических параметров зон интереса. Информацию о параметрах скрытых дефектов извлекают из анализа температурных пиксельных функций $T(\tau)$. Классификация и краткое описание этих алгоритмов дано в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Базовые алгоритмы обработки данных в ТК

Алгоритм и краткое описание	Преимущества	Недостатки
<p><u>Дифференциальный температурный сигнал</u> Данный параметр отражает сравнительное изменение температуры во времени в дефектной и бездефектной зонах $\Delta T = T_d - T_{nd}$. [56-60]</p>	<p>Параметр напрямую связан с физикой ТК. Его величина ограничена температурным разрешением ИК тепловизора. Необходима эталонная точка.</p>	<p>Параметр подвержен поверхностным шумам (поглощения/излучения)</p>
<p><u>Текущий температурный контраст</u> Безразмерный параметр, определяемый формулой: $Con = T_d / T_{nd} - 1$. [56-60]</p>	<p>Текущий контраст не зависит от мощности нагрева.</p>	<p>Возможно усиление случайного шума. Диффузия тепла вокруг дефектов не учитывается.</p>
<p><u>Дифференциальный контраст</u> Данная техника предполагает, что при ранних временах наблюдения объект контроля ведет себя как полубесконечное тело. Дифференциальный контраст определяется формулой: $C^{dif}(x, y, \tau^{(n)}) = T(x, y, \tau) - \sqrt{\frac{\tau^{(n)}}{\tau}} T(x, y, \tau^{(n)}),$ где $\tau^{(n)}$ - время, принятое для нормализации [58, 61].</p>	<p>Необходимость в эталонной точке отсутствует.</p>	<p>Техника применима для неглубоких дефектов и изделий, которые можно рассматривать в качестве полубесконечного тела.</p>
<p><u>Усреднение</u> Усреднение N изображений во времени снижает белый шум в \sqrt{N} раз [57, 62].</p>	<p>Эквивалентно улучшению температурного разрешения тепловизора (при снижении быстродействия).</p>	<p>Техника не воздействует на шум поглощения/излучения</p>
<p><u>Нормализация</u> Деление на эталонное (нормализующее) изображение [63].</p>	<p>Подавление эффекта неравномерного нагрева.</p>	<p>Случайный шум может возрастать. Эффективность использования данного</p>

		параметра зависит от диффузии тепла вокруг дефектов.
<u>ИК радиометрия с разрешением по температуре (TRIR)</u> Длительный нагрев. Момент оптимального контроля находится внутри импульса нагрева [63].	Длительный нагрев может улучшить выявляемость глубоких дефектов.	Излучение нагревателя, отраженное от поверхности контролируемого изделия, существенно влияет на результаты ТК. Рекомендуется нагрев оптическим излучением с длиной волны, находящейся вне спектрального диапазона работы тепловизора.
<u>Раннее обнаружение</u> Температурные «отпечатки» скрытых дефектов анализируют при ранних временах наблюдения [64].	Отсутствие существенной диффузии тепла обеспечивает четкое воспроизведение формы скрытых дефектов.	Отношение сигнал/шум невелико, поэтому только большие дефекты обнаруживаются.
<u>Преобразование Лапласа</u> Дифференциальное уравнение теплопроводности заменяется линейными матричными уравнениями [62, 65].	Решение дифференциального уравнения в пространстве температуры заменяют решением алгебраических уравнений в области Лапласа. При этом возможно получение алгебраических выражений для тепловой дефектометрии.	Предполагается одномерный характер теплопередачи. Расчеты являются время-емкими, поэтому данный метод чаще всего применяют к отдельным точкам.
<u>Преобразование Фурье (импульсно-фазовая термография)</u> <u>Последовательность ИК изображений, являющаяся результатом импульсного ТК (используют также метод тепловых волн) преобразуется с помощью преобразования Фурье в изображения</u>	Подавляется эффект неравномерного нагрева. Улучшается выявляемость глубоких дефектов.	Эффективность метода зависит от интервала записи и длины последовательности. Дефектометрия

<p><u>Фурье фазы (фазограмму) и Фурье магнитуды (амплиграмму) [66].</u></p>		<p>не является тривиальной.</p>
<p><u>Вейвлет преобразование</u> Применяют скалярное и комплексное вейвлет-преобразование с использованием перемещаемого самонастраиваемого пространственно-временного окна, что позволяет анализировать как низко-, так и высокочастотные сигналы в различных временных масштабах [67].</p>	<p>Техника подобна Фурье анализу, но позволяет локализовать сигналы во времени.</p>	<p>Применение данного метода в ТК малоизучено.</p>
<p><u>Декомпозиция сингулярных значений (SVD), или анализ главных компонент (PCA)</u> Техника основана на расчете ковариационной матрицы входных данных, а также собственных векторов и собственных значений этой матрицы. Собственные вектора располагаю в порядке их магнитуды, чем обеспечивают компоненты анализируемого статистического набора данных [68].</p>	<p>РСА используют для извлечение пространственно-временных особенностей поведения температурных сигналов. Пренебрегая компонентами высокого порядка, можно снизить метрику задачи (снизить количество анализируемых изображений), а также снизить влияние неравномерного нагрева или подчеркнуть отдельные дефекты.</p>	<p>Изображения главных компонент теряют физический смысл теплопередачи. Дефектометрия не является тривиальной.</p>
<p><u>Полиномиальная аппроксимация</u> Аппроксимация температурных пиксельных функций полиномиальными (и другими) функциями [69].</p>	<p>Последовательность изображений произвольной длины может быть заменена последовательностью из нескольких изображений, представляющей собой набор полиномиальных коэффициентов.</p>	<p>Изображения полиномиальных коэффициентов теряют физический смысл. Тепловая дефектометрия не является тривиальной.</p>
<p><u>Термографическая реконструкция сигналов (TSR)</u> Данная техника использует полиномиальную аппроксимацию пиксельных функций с последующим анализом первой и второй производной от температуры по времени [70-72].</p>	<p>Эффективная дискриминация дефектных зон. Изображения дефектов высокого качества.</p>	<p>Техника применима к импульсному одностороннему ТК изделий, которые могут рассматриваться как полубесконечные тела.</p>

<p><u>Корреляция</u> Определение коэффициента корреляции между всеми температурными функциями во всех точках изображения и эталонной температурной функцией [73].</p>	<p>Эффективное подавление многих видов шумов.</p>	<p>Эффективность техники зависит от длины последовательности. Тепловая дефектметрия не является тривиальной.</p>
<p><u>Динамическая тепловая томография (DTT)</u> Томографическое представление дефектов осуществляют путем анализа изменения температуры во времени в односторонней процедуре ТК. Более глубокие дефекты производят более длинные времена наблюдения, поэтому путем сортировки сигналов по времени возможно осуществлять послойный анализ объекта [74, 75].</p>	<p>Подавление поверхностной помехи. Разделение объекта контроля по слоям.</p>	<p>Число выделяемых слоев не превышает 3-5. Необходима эталонная точка.</p>
<p><u>Преобразование Хью</u> Эта техника распознает образы (в ТК-линии) путем обнаружения геометрических структур [76].</p>	<p>Преобразование Хью позволяет разделить дефектные и бездефектные зоны, предполагая, что температурный сигнал в бездефектных зонах является линейной функцией в логарифмических координатах. Отсутствует необходимость выбора эталонной точки.</p>	<p>Применима к образцам, которые можно рассматривать как полубесконечные тела.</p>
<p><u>Преобразование Радона</u> Данная техника позволяет реконструировать изображения путем интегрирования вдоль прямых линий, параметрами которых является угол наклона и офсет [77].</p>	<p>Подобно преобразованию Хью, преобразование Радона позволяет разделить дефектные и бездефектные зоны, предполагая, что температурный сигнал в бездефектных зонах является линейной функцией в логарифмических координатах. Отсутствует необходимость выбора эталонной точки.</p>	<p>Применима к образцам, которые можно рассматривать как полубесконечные тела.</p>

<p><u>Нейронные сети</u> Представляет собой компьютерную программу, симулирующую набор простых процессоров с множеством связей. Процессоры обладают внутренней памятью, приобретаемой в результате обучения. Нейронные сети пригодны для решения задач с большим числом неизвестных параметров [78].</p>	<p>Универсальная техника, которая чувствительна к слабым вариациям температурного сигнала.</p>	<p>Каждый класс объекта контроля требует специального обучения.</p>
<p><u>Синтез данных</u> Комбинирование ТК с другими методами НК осуществляется, если: 1) ТК служит в качестве скринингового метода, за которым применяют другие методы контроля; 2) аппаратура, используемая различными методами, включает одинаковые компоненты, например, нагреватели; 3) синтез данных не является простым суммированием результатов, но приводит к новому качеству контроля [79].</p>	<p>Обнаружение и оценка дефектов может быть более эффективной за счет использования различных физических принципов.</p>	<p>Техника изучена слабо. Возможны проблемы с геометрической подготовкой изображений различного формата и ракурса к синтезу.</p>

2.3 Статистическая оценка результатов ТК

2.3.1 Отношение сигнал/шум в ТК и условия обнаружения скрытых дефектов

Основным критерием сравнения различных процедур ТК является отношение сигнал/шум, которое определяют как

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M (T_i - \bar{T}_{nd})^2 / M}}{\sigma_{nd}}, \quad (2.1)$$

где T_i - температура (или производный от нее сигнал) в i -м пикселе дефектной области, \bar{T}_{nd} - средняя температура в бездефектной области, M – число пикселей в выбранной дефектной области.

Уравнение (2.1) используют, если имеется эталонный образец (вплоть до СОПа-стандартного образца предприятия). В качестве таких образцов используют пластины из однородных материалов (металлов) с выемками различной глубины на задней

поверхности или из композиционных материалов с искусственными расслоениями или фторопластовыми вставками. Величина S зависит от того, как оператор выбирает дефектную и бездефектную зоны, и, следовательно, в определенной степени является субъективным параметром.

Внутренний дефект может быть надежно обнаружен оператором или автоматическим устройством, если в момент наблюдения обусловленный им сигнал превышает уровень шума:

$$S > 1, \text{ или } \Delta T > \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2}. \quad (2.2)$$

Дисперсия шума, как и $\Delta T(\tau)$, изменяется во времени, поэтому максимальное значение S наступает в определенный момент времени, в общем случае не совпадающий с максимумом $\Delta T(\tau)$ или $C = \Delta T(\tau)/T(\tau)$. В теории ТК рассматривают два крайних случая: 1) шумы ТК являются только аддитивными и полностью определяются шумами

детектора ΔT_{res} , т.е. $\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2} = \Delta T_{res}$; 2) шумы ТК являются только

мультипликативными и определяются излучательно-поглощательными свойствами изделия; их можно характеризовать контрастом помехи

$C_{noise} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2(\tau) / T_{nd}(\tau)} = \Delta T_{noise}(\tau) / T_{nd}(\tau)$, который не зависит от времени в силу

линейности задач ТК. В первом случае оптимальное время наблюдения совпадает со временем наступления максимального сигнала $\Delta T(\tau_m)$, и первое условие обнаружения дефекта можно записать в виде:

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{res}. \quad (2.3)$$

Во втором случае оптимальные условия обнаружения имеют место при максимуме контраста $C(\tau_m)$, и второе условие обнаружения дефекта имеет вид:

$$C(\tau_m) > C_{noise}. \quad (2.4)$$

Отметим, что максимальные температурные контрасты возникают при кратковременном (дираковском) нагреве.

Принципиальное различие двух последних выражений состоит в том, что условию (2.3) можно всегда удовлетворить путем увеличения поглощенной энергии W (мощности нагрева Q). Условие (2.4) не зависит от W (Q) и определяется исключительно поверхностными свойствами изделия.

На практике абсолютная температура поверхности изделия в конце нагрева T_{abs} не должна превышать порога деструкции материала T_{destr} (третье условие обнаружения дефекта):

$$T_{abs}(\tau = \tau_h) < T_{destr}. \quad (2.5)$$

Поскольку избыточная температура изделия пропорциональна $W(Q)$, последнее условие накладывает ограничение на поглощенную энергию. Перегрев поверхности изделия наиболее вероятен при кратковременном нагреве, поэтому каждая дефектная ситуация требует оптимального выбора мощности и длительности теплового импульса.

Таким образом, будем считать, что внутренние дефекты обнаруживаются тепловым методом, если выполняются следующие три условия:

$$\begin{aligned} \Delta T(\tau_m) &> \Delta T_{res}; \\ C(\tau_m) &> C_{noise}; \\ T_{abs}(\tau = \tau_h) &< T_{destr}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Дополнительное (четвертое) условие обнаружения дефектов накладывается временным разрешением аппаратуры ТК, или частотой записи ИК термограмм f , которая должна быть достаточно высока для того, чтобы накопить требуемое число термограмм перед достижением оптимального времени наблюдения τ_m . Это условие можно записать в виде:

$$f \geq (5...10) / \tau_m. \quad (2.7)$$

В условиях (2.1-2.7) участвуют параметры:

- 1) аппаратуры (ΔT_{res} и f);
- 2) изделия C_{noise} ;
- 3) нагрева (T_{abs});
- 4) дефекта (ΔT или C).

2.3.2 Предельные показатели теплового контроля на примере углепластика

В настоящем параграфе показано как теория предыдущего параграфа может быть применена для оценки предельных возможностей ТК углепластикового композита.

В теоретическом плане для определения предельной чувствительности одностороннего ТК была составлена Таблица 2.2, на основе которой была разработана калибровочная кривая на Рисунке 2.6. При этом было учтено, что: 1) основным параметром чувствительности ТК является безразмерный текущий температурный контраст C ;

2) поперечные размеры дефектов, по крайней мере, больше, чем 10x10 мм, практически не влияют на их выявляемость (показано выше), поэтому расчеты выполнены только для одного размера 10x10 мм; 3) варьируемыми параметрами ТК являются длительность нагрева и толщина, на основе чего определяется предельная глубина залегания обнаруживаемых дефектов в углепластике толщиной 5 мм, причем порог обнаружения определяется контрастом шума конкретного материала, который для углепластика принят равным 5%; 4) дополнительным параметром является дифференциальный температурный сигнал ΔT , который рассчитан для мощности нагрева 10 кВт/м², а для других мощностей нагрева соответствующие значения могут быть определены пропорциональным пересчетом.

Графически порог обнаружения, равный 0,05 (5%), показан на Рисунке 2.6, определяя, таким образом, диапазон глубин, соответствующих данному порогу.

Таблица 2.2 – К определению предельной чувствительности одностороннего ТК дефектов в углепластике толщиной 5 мм (поперечный размер дефекта 10x10 мм; толщина дефектов: 0,1; 0,15 и 0,2 мм; глубины дефектов: 1; 2; 3; 3,5; 4; 4,5 мм; мощность нагрева 10 кВт/м²; длительность нагрева 5 и 10 с

l , мм	d , мм	ΔT_m^F , °C	$\tau_m^F(\Delta T)$, с	C_m^F	$\tau_m^F(C)$, с
Нагрев 10 кВт/м ² , 5 с					
1	0,1	4,52	5,7	0,261	6,7
2	0,1	1,57	8,9	0,138	10,7
3	0,1	0,60	12,5	0,064	14
3,5	0,1	0,36	14,2	0,041	15,6
4	0,1	0,19	16,2	0,023	17,7
4,5	0,1	0,11	21,9	0,014	23,6
1	0,15	6,22	5,8	0,373	7
2	0,15	2,16	9,2	0,195	11,2
3	0,15	0,83	12,8	0,090	14,4
3,5	0,15	0,51	14,6	0,058	16
4	0,15	0,27	16,7	0,033	18,2
4,5	0,15	0,16	22,4	0,021	24
1	0,2	7,65	5,9	0,474	7,3
2	0,2	2,66	9,5	0,245	11,6
3	0,2	1,03	13,2	0,113	14,7
3,5	0,2	0,64	14,9	0,074	16,4
4	0,2	0,34	17,1	0,042	18,7
4,5	0,2	0,21	22,7	0,028	24,3
Нагрев 10 кВт/м ² , 10 с					
1	0,1	6,46	10,4	0,222	11,2

2	0,1	2,76	12,7	0,127	14,4
3	0,1	1,11	15,9	0,060	17,5
3,5	0,1	0,68	17,6	0,039	19
4	0,1	0,37	19,6	0,022	21,1
4,5	0,1	0,22	25,0	0,014	26,8
1	0,15	9,21	10,5	0,323	11,5
2	0,15	3,85	13,0	0,180	14,8
3	0,15	1,54	16,3	0,085	17,8
3,5	0,15	0,95	17,9	0,055	19,4
4	0,15	0,52	20,1	0,032	21,7
4,5	0,15	0,32	25,5	0,021	27,1
1	0,2	11,66	10,5	0,417	11,7
2	0,2	4,79	13,2	0,228	15,1
3	0,2	1,92	16,5	0,106	18,2
3,5	0,2	1,20	18,3	0,070	19,8
4	0,2	0,66	20,5	0,041	22,1
4,5	0,2	0,42	25,8	0,027	27,4

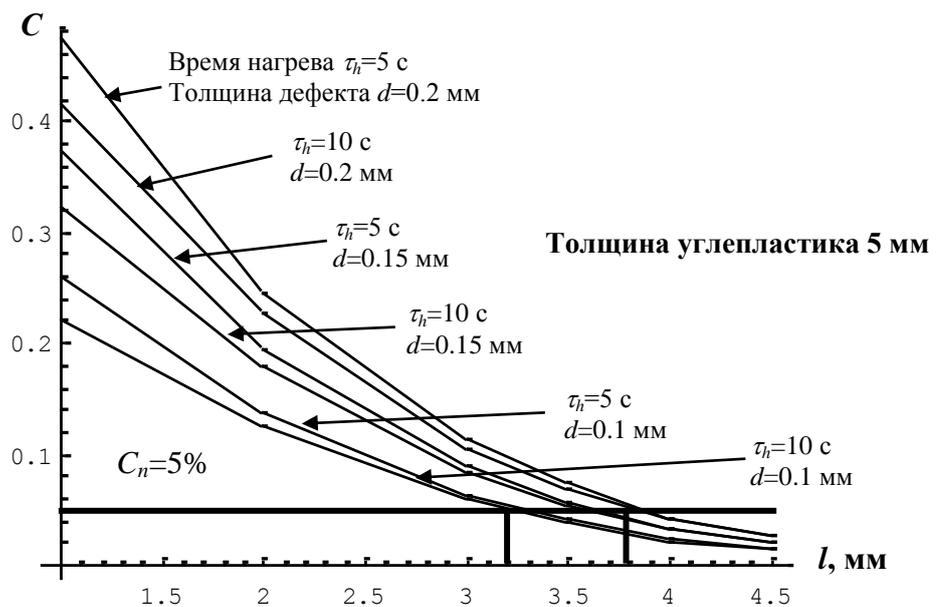


Рисунок 2.6 – К определению предельной глубины обнаружения воздушных расслоений в углепластике толщиной 5 мм при одностороннем ТК (по данным Таблицы 2.1)

В экспериментальном плане определены текущие контрасты и значения отношения сигнал/шум температуры для дефектов в двух цилиндрических образцах из углепластика (см. Таблицу 2.2 и Рисунок 2.7).

В Таблице 2.3 приведены значения отношения сигнал/шум над дефектами в вышеуказанных образцах при различных видах нагрева. Видно, что в односторонней

процедуре не выявляются дефекты на глубинах 4 и 4,7 мм. Ниже будет показано, что это находится в согласии с теорией ТК. Дефекты на всех глубинах выявляются в двухсторонней процедуре, причем их выявляемость практически не зависит от глубины. Тем не менее, с учетом ограничений на практические процедуры ТК, обычно накладываемых заказчиками, двухсторонний ТК не рассматривается в качестве основы для создания экспериментальной установки. Такая установка может быть создана на основе мощного оптического нагрева с помощью галогенных ламп, а также на основе конвективного нагрева с помощью фена.

На Рисунке 2.7 приведено сравнение экспериментальных и теоретических значений максимальных температурных контрастов для двух дефектов на глубине 1,64 мм. Видно, что ближе всего расчетные и экспериментальные данные совпадают для оптимальных времен наблюдения сигналов, тогда как различие в амплитуде контрастов достаточно существенно. Это объясняется, в основном, тем, что расчет выполнен для воздушных дефектов толщиной 0,15 мм, в то время как в стандартных образцах дефекты имитированы фторопластовыми вставками с неизвестными толщинами воздушных зазоров между фторопластом и композитом. С учетом раннего опыта исследований в лаборатории ТК ТПУ можно полагать, что предложенная теоретическая модель адекватно описывает воздушные дефекты в углепластике, поэтому заключение о возможностях активного ТК целесообразно делать на основе расчетных данных с использованием шумового порога температурного контраста в конкретном материале (углепластике). Эти данные приведены выше в Таблице 2.1 и на Рисунке 2.6.

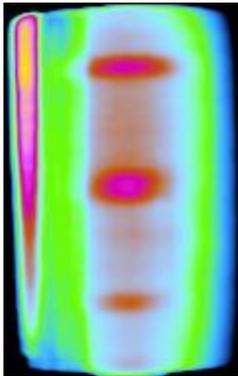
Таблица 2.3 – Показатели эффективности экспериментальных процедур ТК образцов 1 и 2 из углепластикового композита (для дефектов размером 20x20 мм)

Процедура	Отношение сигнал/шум S		
	Глубина дефекта 1,64 мм	Глубина дефекта 4,0 мм	Глубина дефекта 4,7 мм
Односторонний контроль			
Равномерный нагрев галогенными лампами (2x1 кВт)	5,1 (РСА)	*	*
Полосовой нагрев галогенной лампой 2 кВт	4,7 (исходная термограмма)	*	*
Равномерный нагрев галогенными лампами (6x5 кВт)	9,8 – 12,1 (РСА)	*	*
Конвективный нагрев фенами 3 кВт	8,5	*	*

Двухсторонний контроль			
Равномерный нагрев изнутри галогенной лампой 2 кВт	6,0 – 13,0 (РСА)	~7,4	~8,7
Полосовой нагрев галогенной лампой 2 кВт	4,1	**	**

* Дефекты не обнаруживаются

** Значения S не определялись



Эксперимент: $C=0,09$ при 10,4 с

Теория: $C=0,26$ при 11,4 с

Эксперимент: $C=0,10$ при 10,4 с

Теория: $C=0,26$ при 11,4 с

Рисунок 2.7 – Температурные контрасты над дефектами на глубине 1,64 мм при одностороннем ТК с помощью галогенных ламп мощностью 30 кВт (нагрев в течение 7 с) в образце Ц2: сравнение экспериментальных и теоретических данных

Основным выводом из вышеописанных исследований углепластиковых цилиндров является то, что при толщинах дефектов от 0,2 до 0,1 мм и длительности нагрева от 5 до 10 с предельная глубина обнаружения при одностороннем контроле составляет от 3,9 до 3,2 мм.

2.4 Выводы по Главе 2

- В настоящее время получено множество теоретических решений прямых задач активного ТК. В значительной степени этому способствовали многолетние исследования по тепловому контролю научной группы НИ ТПУ. Тем не менее, даже в аспекте моделирования прямых задач, для ряда практических приложений решения, позволяющие оптимизировать экспериментальные процедуры, отсутствуют. В настоящем исследовании акцент сделан на получение практических рекомендаций по выявлению несплошностей и расслоений в виде фторопластовых включений в углепластике, который является одним из основных конструкционных материалов при производстве самолетов (в последнее время этот материал становится популярным в строительстве, энергетике и автомобилестроении).

- Число решений обратных задач активного ТК, используемых для дефектометрии, значительно меньше числа решений прямых задач. Это объясняется как чисто математическими трудностями решения некорректно поставленных задач, так и сравнительно низким уровнем применения количественного ТК в промышленности, где роль данного метода в большинстве случаев сводится к чистой дефектоскопии. В настоящем параграфе определены границы применимости ранее предложенной методики дефектометрии углепластиковых образцов путем определения температурного контраста.

- Базируясь на опыте исследований ТПУ, обобщены алгоритмы обработки инфракрасных (ИК) изображений, включая тривиальную фильтрацию, полиномиальную аппроксимацию, Фурье- и вейвлет преобразование, метод анализа главных компонент, корреляционный и статистический анализ. В качестве стандартного критерия эффективности вышеупомянутых алгоритмов в настоящих диссертационных исследованиях принято отношение сигнал/шум. Недостатком данного критерия является то, что он включает анализ пиксельных амплитуд без учета текстуры изображения, что в принципе может приводить к недооценке возможностей теплового метода, например, когда оператор может идентифицировать дефектные отметки на фоне амплитудных шумов благодаря их специфическим геометрическим сигнатурам. Тем не менее, критерий отношения сигнал/шум метод остается наиболее употребимым в практике ТК.

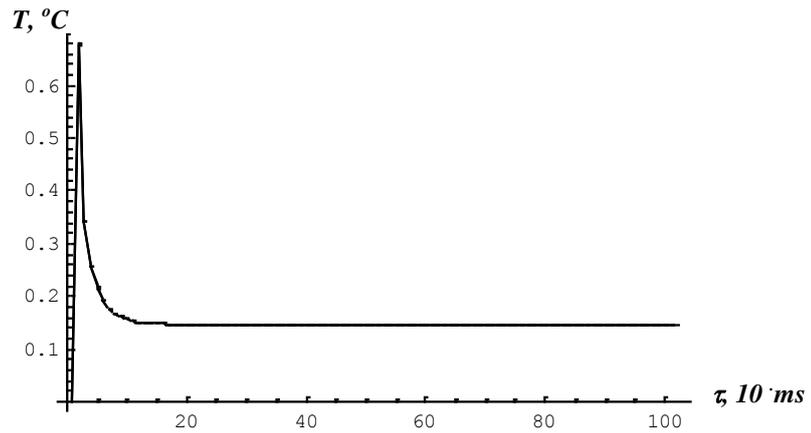
Глава 3. Метод и аппаратура ТК коррозии в металлических изделиях

3.1 Алгоритмы оценки коррозии

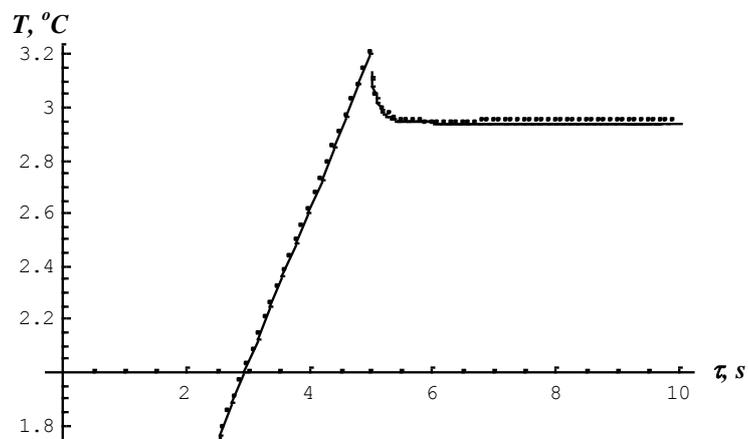
3.1.1 Решение прямой задачи теплового контроля коррозии: основные зависимости

На данном этапе исследований были проанализированы особенности численного решения трехмерной задачи ТК по сравнению с аналитическими решениями и численными решениями, полученными на платформе Comsol Multiphysics, а также исследованы особенности развития температурных сигналов во времени. Было рассчитано до 100 дефектных ситуаций, различавшихся уносом материала δ , размерами дефектов D_x, D_y и длительностью нагрева τ_h . Использована упомянутая выше компьютерная программа ThermoCalc-6L, разработанная в НИ ТПУ и позволяющая решать трехмерные нестационарные задачи теплопроводности в многослойных телах со скрытыми дефектами.

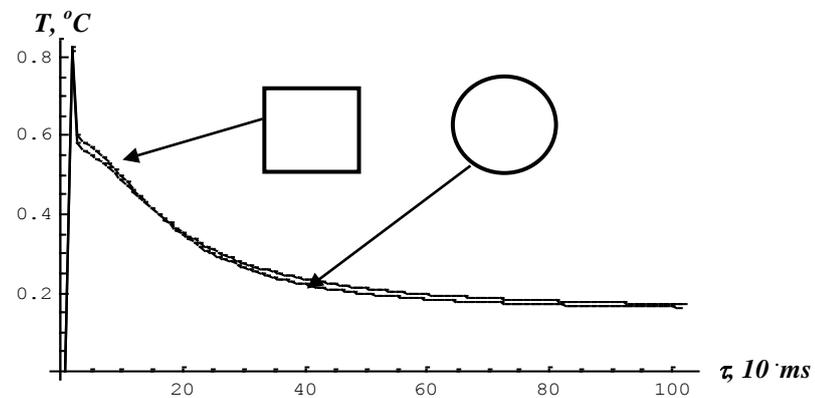
Особое внимание было уделено анализу точности вычислений, которая была исследована несколькими способами. «Бездефектные» температуры сравнивались с аналитическим решением для адиабатической пластины, нагреваемой прямоугольным импульсом. Максимальное расхождение данных не превышало долей процента (Рисунке 3.1а). Температуру в дефектной области сравнивали с данными аналитического расчета для бесконечных в поперечном направлении дефектов, а также с данными, полученными для дисковидных дефектов в цилиндрической геометрии с помощью программы ThermoCalc-2D, также разработанной в НИ ТПУ. Расхождение значений не превышало 3% для бесконечных дефектов (Рисунок 3.1б) и 6% для дефектов конечных размеров (Рисунок 3.1в), причем в последнем случае определенную роль могло играть различие в формах дефектов при постоянной площади: квадрат в декартовой системе и окружность в цилиндрической системе.



а



б



в

Рисунок 3.1 – Анализ точности численных решений при моделировании коррозии:

а - изменение температуры во времени на поверхности адиабатической пластины из стали AISI 1010 толщиной 2 мм (мощность нагрева 10^5 Вт/м², длительность 10 мс); приведены две кривые для аналитического и численного решения; различия практически отсутствуют);

б - изменение температуры во времени на поверхности пластины из стали AISI 1010 толщиной 5 мм с бесконечным в поперечном направлении дефектом (мощность нагрева 10^5 Вт/м², длительность 5с); приведены две кривые для аналитического (сплошная линия) и численного решения (точки);

в - изменение температуры во времени на поверхности дефектной пластины из стали AISI 1010 толщиной 2 мм (мощность нагрева 10^5 Вт/м², длительность 10 мс, унос

материала 75%, площадь дефекта 36 мм²); приведены две кривые численного решения, полученные с помощью программ ThermoCalc-2D и ThermoCalc-6L)

При моделировании скрытой коррозии был проведен анализ влияние конфигурации дефектов на распределение температуры (Рисунок 3.2) для двух моментов времени. Подтверждено, что эффект поперечной диффузии тепла особенно заметен для дефектов малого размера (верхний ряд дефектов).

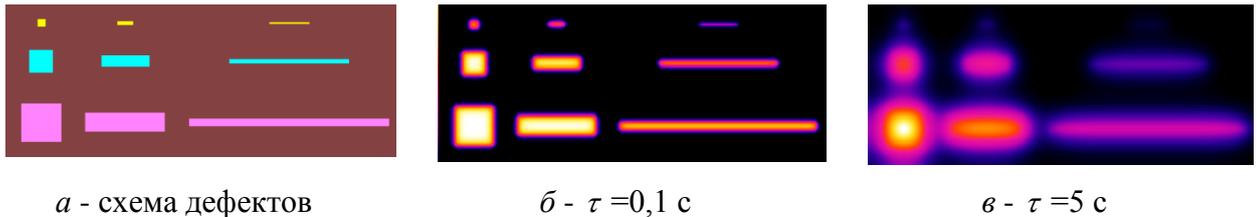


Рисунок 3.2 – Моделирование 25% коррозии в пластине из стали AISI 101 толщиной 5 мм, нагреваемой прямоугольным тепловым импульсом (размеры дефектов изменяются от 25x1 до 125x2,5 мм; программа ThermoCalc-6L)

Анализ зависимости результатов контроля коррозии от типа стали (низко- и высокотеплопроводной, см. Таблицу 3.1) смоделирован на пластине с девятью коррозионными дефектами, различающихся размером и степенью уноса материала (Рисунок 3.3). Для удобства интерпретации данных принято, что производится равномерный нагрев поверхности пластины из стали тепловым потоком с плотностью мощности 10 кВт/м², что близко к практическим значениям, достижимым при оптическом нагреве с помощью галогеновых ламп. В силу линейности задач ТК возможно производить пересчет температур для любых значений мощности теплового потока нагрева. Рассмотрено три толщины изделия (5; 10 и 20 мм) и три длительности нагрева (1, 5 и 10 с).

В Таблице 3.2 приведены максимальные температуры нагреваемых пластин, которые наблюдаются в бездефектной области в конце нагрева. Максимальные температурные перепады в зонах коррозии различного размера, безразмерные температурные контрасты, а также моменты их оптимального наблюдения, приведены в Таблице 3.3.

Интерпретировать данные таблицы нужно следующим образом (см. выделенную жирным шрифтом строку). В высокотеплопроводной стали ($\lambda = 63,9$ Вт/(м⁰С) толщиной 10 мм при нагреве тепловым потоком мощностью 10 кВт/м² в течение 10 с избыточная температура нагреваемой поверхности в конце нагрева составляет 3,45 °С (Таблица 3.2). При этом, как следует из Таблицы 3.3, над зоной уноса материала 25 % размером 50x50 мм возникает температурный перепад $\Delta T_m = 0,766$ °С в момент времени $\tau_m (\Delta T_m) = 11,3$ с, т.е.

через 1,3 с после окончания нагрева. Безразмерный температурный контраст составит $C_m = 0,259$, или 25,9%, причем это значение наступает при $\tau_m(C_m) = 11,5$ с. Такой же дефект в низко теплопроводной стали создает температурные сигналы сопоставимой амплитуды, однако время их оптимального наблюдения сдвигается примерно на 10 с после окончания нагрева (см. Таблицу 3.3).

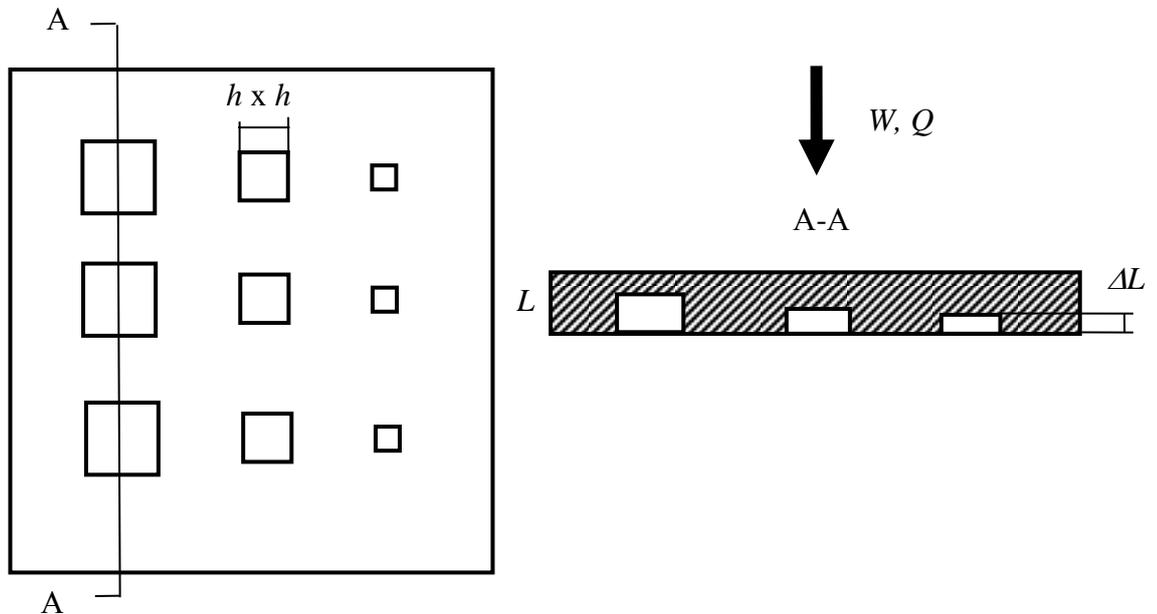


Рисунок 3.3 – Модель теплового контроля коррозии

Таблица 3.1 – Теплофизические свойства сталей

Материал изделия	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг·К)	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Температуропроводность a , 10 ⁻⁶ м ² /с
Низкотеплопроводная сталь (типа AISI 316)	8240	468	13,1	3,47
Высокотеплопроводная сталь (типа AISI 1010)	7830	434	63,9	18,8

Таблица 3.2 – Температура нагреваемой поверхности пластины толщиной 10 мм в конце импульса нагрева при плотности мощности теплового потока $Q = 10$ кВт/м² *

Сталь	Температура в конце нагрева, °С		
	Время нагрева $\tau_h = 5$ с	10 с	20 с
$\lambda = 13,1$ Вт/(м·К)	3,53	5,06	7,68
$\lambda = 63,9$ Вт/(м·К)	1,99	3,45	6,37

* Температура поверхности изделия слабо зависит от его толщины

Таблица 3.3 – Расчетные параметры контроля коррозии в пластине из стали (типа AISI 1010). $Q=10$ кВт/м²

Сталь	$\Delta L/L, \%$	$h \times h, \text{ мм}$	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	$\tau_m(\Delta T_m), \text{ с}$	C_m	$\tau_m(C_m), \text{ с}$
$L = 5 \text{ мм}, \tau_h = 10 \text{ с}$						
$\lambda = 63,9$ Вт/(м ⁰ С)	10	50x50	0,691	10,3	0,127	4,4
		20x20	0,276	10,1	0,084	2,0
		10x10	0,092	10,0	0,039	1,3
	25	50x50	1,804	10,3	0,318	5,1
		20x20	0,633	10,1	0,177	2,2
		10x10	0,219	10,0	0,087	1,4
	50	50x50	4,68	10,2	0,831	5,0
		20x20	1,693	10,0	0,556	1,8
		10x10	0,556	10,0	0,286	1,1
$\lambda = 13,1$ Вт/(м ⁰ С)	10	50x50	0,708	12,6	0,137	12,8
		20x20	0,536	11,7	0,102	11,9
		10x10	0,233	11,1	0,044	11,3
	25	50x50	1,896	13,0	0,368	13,3
		20x20	1,245	11,7	0,238	12,0
		10x10	0,561	11,0	0,105	11,3
	50	50x50	5,047	13,1	0,980	13,7
		20x20	3,755	11,0	0,707	11,5
		10x10	1,659	10,4	0,301	10,8
$L = 10 \text{ мм}, \tau_h = 10 \text{ с}$						
$\lambda = 63,9$ Вт/(м ⁰ С)	10	50x50	0,255	11,6	0,086	11,8
		20x20	0,096	10,8	0,032	11,0
		10x10	0,030	10,6	0,010	4,9
	25	50x50	0,766	11,3	0,259	11,5
		20x20	0,282	10,6	0,093	10,8
		10x10	0,088	10,4	0,032	4,1
	50	50x50	2,302	10,8	0,769	11,2
		20x20	0,819	10,2	0,311	4,0
		10x10	0,254	10,1	0,117	2,9
$\lambda = 13,1$ Вт/(м ⁰ С)	10	50x50	0,265	25,4	0,103	26,0
		20x20	0,144	18,8	0,054	19,5
		10x10	0,051	17,1	0,019	17,9
	25	50x50	0,805	23,4	0,312	24,3
		20x20	0,461	17,1	0,171	18,0
		10x10	0,164	15,4	0,059	16,3
	50	50x50	2,444	20,6	0,939	22,2
		20x20	1,549	14,3	0,542	15,8
		10x10	0,610	12,1	0,197	13,8
$L = 20 \text{ мм}, \tau_h = 10 \text{ с}$						
$\lambda = 63,9$ Вт/(м ⁰ С)	10	50x50	0,100	16,5	0,067	16,9
		20x20	0,028	14,5	0,018	15,1
		10x10	0,008	14,2	0,005	14,8
	25	50x50	0,316	15,3	0,208	15,9
		20x20	0,091	13,3	0,057	14,0
		10x10	0,024	13,0	0,015	13,7

$\lambda = 13,1$ Вт/(м ⁰ С)	50	50x50	1,019	13,3	0,647	14,4
		20x20	0,327	11,5	0,189	12,4
		10x10	0,090	11,1	0,050	11,9
	10	50x50	0,094	59,1	0,073	61,4
		20x20	0,028	47,3	0,021	50,1
		10x10	0,008	45,8	0,006	48,9
	25	50x50	0,302	51,9	0,229	55,1
		20x20	0,096	39,6	0,068	43,1
		10x10	0,025	37,7	0,018	41,7
50	50x50	0,992	40,6	0,718	46,5	
	20x20	0,393	27,3	0,243	32,3	
	10x10	0,113	24,0	0,065	28,8	

Следует заметить, что, например, при увеличении мощности нагрева в 10 раз, то есть до 100 кВт/м², избыточная температура в конце нагрева пропорционально возрастет до 34,5 °С, температурный сигнал над дефектом увеличится до 7,66 °С, причем величина относительного контраста при этом не изменится, равно как и оптимальные времена регистрации перепада и контраста.

Сравнительные результаты ТК коррозии с использованием различных процедур испытаний для изделий из стали приведены в Таблице 3.4. Наряду с оптимальными параметрами обнаружения дефектов приводится максимальная избыточная температура нагреваемой поверхности в конце нагрева для принятых значений поглощенной мощности.

При выявлении коррозии на задней поверхности стальной пластины (Таблица 3.4) глубина дефекта и его толщина выражаются через унос материала, однако процедуры ТК сохраняют свои классические особенности, например, поперечные размеры дефектов влияют, главным образом, на температурные контрасты, но не на оптимальные времена наблюдения. Данные Таблицы 3.4 также доказывают, что все три распространенных метода ТК (импульсный, ступенчатый и гармонический нагрев) обеспечивают близкие значения параметров обнаружения, что является отражением общности физических принципов ТК.

Таблица 3.4 – Оптимальные параметры обнаружения коррозии в стали (сталь: $a = 7,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 32$ Вт/(мК))

Толщина изделия L , мм	Унос материала, %	Радиус дефекта r_d , мм	Максимальный температурный контраст C_m^{run}	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{run}), c$
Кратковременный нагрев ($\tau_h = 0,01$ с; $T_{max} \approx 8,4$ °С для $Q = 10^6$ Вт/м ²) *				
1	90	5	8,79	0,11

5	50	10	8,89	0,15	
		20	8,89	0,15	
		5	0,99	0,14	
		10	1,00	0,19	
		20	1,00	0,19	
		5	0,11	0,16	
	10	90	10	0,11	0,22
			20	0,11	0,23
			5	4,56	0,61
		50	10	4,78	1,23
			20	8,51	2,05
			5	0,58	1,06
	10	10	10	0,89	1,57
			20	0,99	2,51
			5	0,055	1,49
90		10	0,097	1,97	
		20	0,11	2,96	
		5	2,24	0,86	
		10	4,68	2,42	
		20	7,52	4,73	
		5	0,24	3,14	
50	10	0,58	4,26		
	20	0,89	6,25		
	5	0,017	4,70		
10	10	10	0,053	5,51	
		20	0,093	7,82	
		Длительный нагрев ($\tau_h = 5$ с)			
10	90	5	1,47	5,22	
		10	4,12	5,97	
		20	7,21	7,88	
	50	5	0,19	6,61	
		10	0,53	7,60	
		20	0,86	9,38	
	10	5	0,014	7,88	
		10	0,049	9,06	
		20	0,090	10,90	
Нагрев гармоническими тепловыми волнами**					
10	90 (частота $f=4$ Гц)	5	8,60	0,26	
		10	8,78	0,26	
		20	8,78	0,26	
	50 (частота $f=0,14$ Гц)	5	0,19	7,34	
		10	0,50	7,59	
		20	0,72	14,69	
	10 (частота $f=0,1$ Гц)	5	0,013	10,43	
		10	0,043	10,93	
		20	0,073	11,26	

* Максимальная избыточная температура изделия в конце кратковременного нагрева слабо зависит от толщины изделия

** Квазиоптимальная частота для обнаружения конкретного дефекта

3.1.2. Построение калибровочных кривых и оценка предельных возможностей теплового метода контроля коррозии

Отношение сигнал/шум является общим критерием сравнения различных процедур ТК, не зависящим от типа контролируемого материала. Подробно процедура определения отношения сигнал/шум была рассмотрена в главе 2.

Для графической интерпретации предельной чувствительности одностороннего ТК металлических изделий, основанной на данных Таблицы 3.4, была построена калибровочная кривая для дефектов размерами 10×10 мм (Рисунок 3.4). Данные Таблицы 3.4 также доказывают, что все три распространенных метода ТК (импульсный, ступенчатый и гармонический нагрев) обеспечивают близкие значения параметров обнаружения, что является отражением общности физических принципов ТК.

Вне зависимости от типа контролируемого материала основным параметром чувствительности ТК является безразмерный текущий температурный контраст C . Поперечные размеры коррозионного пятна большего, чем 10×10 мм, практически не влияют на его выявляемость. Варьируемыми параметрами ТК являются длительность нагрева и толщина изделия. Порог определения величины уноса материала обуславливается контрастом шума объекта контроля. Повышение мощности нагрева, как правило, влечет пропорциональное повышение дифференциального температурного сигнала ΔT .

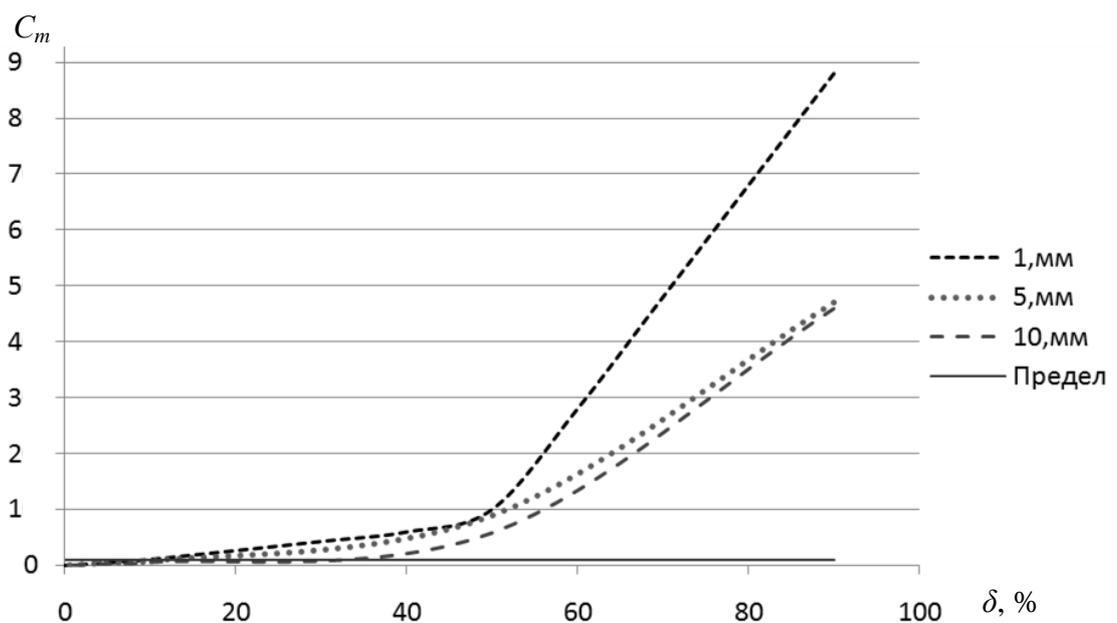


Рисунок 3.4– Зависимость максимального контраста температуры над коррозионными пятнами размером 10x10 мм в стали при импульсном нагреве

Кривые на Рисунке 3.4 можно аппроксимировать следующими полиномами третьей степени:

$$\text{при толщине стали } L=1 \text{ мм } C = 0,0197\delta - 0,00108\delta^2 + 0,0000218\delta^3;$$

$$\text{при толщине стали } L=5 \text{ мм } C = 0,0119\delta - 0,000308\delta^2 + 8,5 \cdot 10^{-6}\delta^3; \quad (3.1)$$

$$\text{при толщине стали } L=10 \text{ мм } C = 0,00905\delta - 0,000482\delta^2 + 0,0000107\delta^3;$$

где δ - унос материала в %.

Предельные возможности теплового контроля можно определить как приближенно по графикам Рисунка 3.4, так и по формулам (3.1). Исходным параметром является контраст шума C_n , который характеризует материал объекта контроля, состояние его поверхности, наличие краски, ржавчины и т.п. Например, если $C_n=10\%$, то в стали толщиной 10 мм будет обнаружен унос материала около 36%, как это следует из Рисунка 3.4.

В теории ТК считается, что при использовании так называемых «черных» покрытий, приближающих тепловое излучение тела к излучению абсолютно черного тела, минимальная величина C_n может составлять 0,02, или 2% (черная краска, сажа, графит и т.п.). Если проводятся испытания стальных изделий толщиной 1 мм, то предельное значение обнаруживаемой коррозии можно найти из уравнения:

$$0,0197\delta - 0,00108\delta^2 + 0,0000218\delta^3 = 0,02, \quad (3.2)$$

что дает $\delta=1,0\%$.

Более практический порог с учетом требуемого значения отношения сигнал/шум можно принять равным 0,05 (5%). Тогда предельное значение δ для стали толщиной 1 мм составит 3%. В случае контроля пластины толщиной 10 мм предельное значение δ возрастет до 9%.

Ранее было показано, что различные виды нагрева (импульсный, продолжительный, гармонический) приводят к близким значениям температурных контрастов над зонами коррозии, причем наибольшие сигналы возникают при импульсном нагреве. Поэтому вышеприведенные оценки можно считать предельными значениями при контроле коррозии в стали. Анализ других способов ТК можно найти в [80–89].

Разработанный подход к определению предельных возможностей ТК коррозии является достаточно простым и гибким, поскольку требует построения калибровочных графиков типа Рисунка 3.4 или составления формул типа (3.1), что можно сделать для любых тестовых ситуаций.

3.1.3 «Одномерный» алгоритм количественной оценки степени коррозии

Если принять, что поперечные размеры зоны коррозии значительно больше, чем толщина стенки объекта контроля, то методически количественное определение степени уноса материала $\Delta L / L$ сводится к измерению избыточных температур в дефектных (T_d) и бездефектной (T_{nd}) зонах и последующему решению простого уравнения:

$$\frac{\Delta L}{L} = 1 - \frac{T_{nd}}{T_d}. \quad (3.3)$$

Формула (3.3) выражает «одномерный» алгоритм количественной оценки коррозии, который был предложен в работе В.П. Вавилова и др. [90]. Помимо этого формула (3.3) может быть выражена через так называемый текущий контраст $C^{run} = (T_d - T_{nd}) / T_{nd}$, который обычно рассчитывается в результате теоретического моделирования:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{C^{run}}{1 + C^{run}}; \quad C^{run} = \frac{\Delta L / L}{1 - \Delta L / L}. \quad (3.4)$$

3.1.4 «Трехмерный» алгоритм количественной оценки степени коррозии

При практической реализации формулу (3.3) целесообразно уточнить в двух аспектах: 1) при использовании нестационарных значений температуры; 2) при идентификации дефектов малого поперечного размера, для которых существенна диффузия тепла в «поперечных» направлениях.

«Трехмерный» алгоритм оценки коррозии предполагает анализ изменяющихся температур T_d и T_{nd} во времени, определение их экстремумов, визуальную оценку реальных максимального и минимального размеров коррозионных пятен и определение степени коррозии по следующим соотношениям [91]:

$$\frac{\Delta L}{L} = [1 - \frac{T_{nd}^{ap}(\tau_m)}{T_d^{ap}(\tau_m)}] / k(D/L, \tau), \quad (3.5)$$

где корректирующие коэффициенты рассчитывают на основе экспериментальных данных следующим образом:

$$k(D/L, \tau) = 0.114792 Fo_m^{-0.94743} (D_{max}^{ap} / L)^{0.166544} (D_{min}^{ap} / L)^{0.898941} (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})_{min}^{-0.034607} \quad (3.6)$$

в случае кратковременного (импульсного) нагрева, и

$$k(D/L, \tau) = 0.161392 Fo_h^{-0.319918} Fo_m^{-0.371239} (D_{max}^{ap} / L)^{0.262664} (D_{min}^{ap} / L)^{0.842875} (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})_{min}^{-0.316916} \quad (3.7)$$

в случае длительного нагрева (импульс прямоугольной формы).

Здесь индекс «*ap*» относится к видимым (кажущимся) значениям, $D_{\max}^{ap}, D_{\min}^{ap}$ соответствуют максимальному и минимальному видимым значениям поперечных размеров зон коррозии, при этом $Fo_h = Fo_m$, если оптимальное время наблюдения находится «внутри» нагрева, иначе $Fo_h < Fo_m$, $Fo_m = \alpha \tau_m / L^2$ относится к оптимальному времени наблюдения τ_m . Точность оценок по вышеприведенным формулам инверсии составляет от 2 до 25 %.

В случае зон коррозии квадратной формы ($D_x = D_y$):

$$k(D/L, \tau) = 0.114792 Fo_m^{-0.94743} (D^{ap}/L)^{1.065485} (T_{nd}^{ap}/T_d^{ap})^{-0.034607}; \quad (3.8)$$

$$k(D/L, \tau) = 0.161392 Fo_h^{-0.319918} Fo_m^{-0.371239} (D^{ap}/L)^{1.10554} (T_{nd}^{ap}/T_d^{ap})_{\min}^{-0.316916} \quad (3.9)$$

для импульсного и длительного нагрева соответственно.

Оптимальное время наблюдения предложено оценивать по формуле:

$$Fo_m = 0.540303 Fo_h^{0.284477} (\Delta L/L)^{-0.205735} (D/L)^{0.463687}, \quad (3.10)$$

где $\Delta L/L$ есть ожидаемый унос материала, и D есть характерный размер ожидаемого дефекта.

Инверсию экспериментальных данных (решение обратной задачи ТК) проводят следующим образом. Вначале по уравнению (3.10) оценивают ожидаемое оптимальное время регистрации температурных сигналов. Затем оператор или автоматическое устройство обнаруживает зоны коррозии и определяет минимумы функций T_{nd}^{ap}/T_d^{ap} для каждого дефекта, а также максимальный и минимальный размер дефектов. Степень коррозии определяют, подставляя экспериментальные значения в формулы (3.5-3.7).

Вышеприведенные аналитические значения позволяют оценить предельные значения обнаруживаемой коррозии $\{\Delta L/L\}_{\min}$, если известен шумовой контраст температуры C_n на поверхности объекта контроля. Подставляя уравнение (3.10) в выражения (3.5-3.7) и вводя

$$r = \left\{ \frac{T_{nd}}{T_d} \right\}_{\min} = \frac{1}{1 + C_n}, \text{ получаем следующую оценку } \{\Delta L/L\}_{\min} :$$

$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 3.75623 Fo_h^{0.225557} (D/L)^{-0.52403} r^{0.0289617} (1-r)^{0.836876} \quad (3.11)$$

в случае импульсного нагрева и

$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 4.40248 Fo_h^{0.395323} (D/L)^{-0.867169} r^{0.294428} (1-r)^{0.929043} \quad (3.12)$$

в случае непрерывного нагрева.

В предельном случае $Fo_m = Fo_h$:

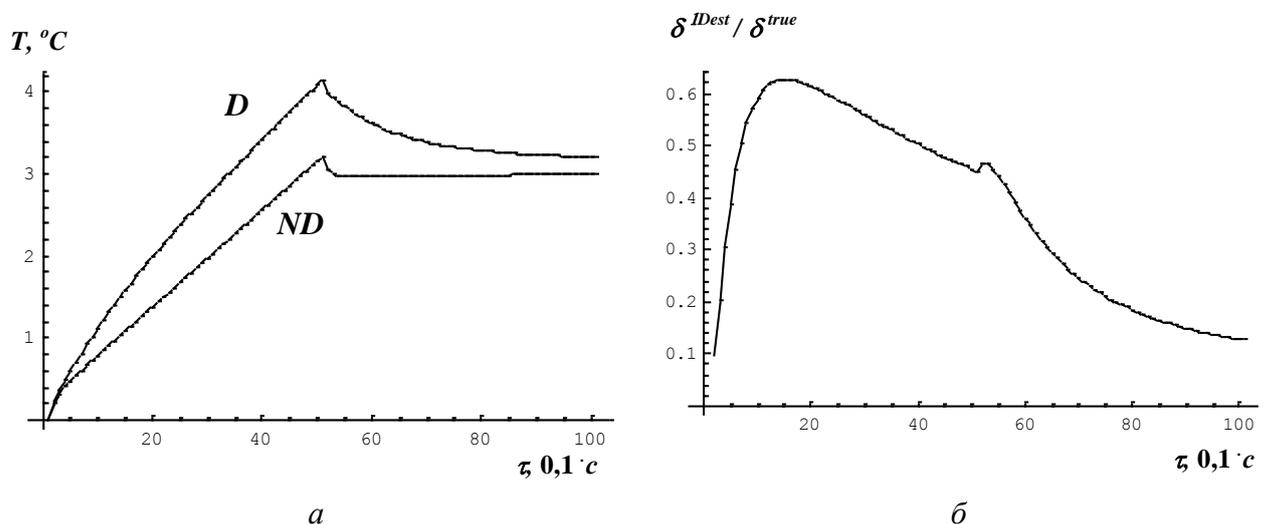
$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 3.62736 (D/L)^{-0.689343} r^{0.332188} (1-r)^{1.04819}. \quad (3.13)$$

Анализируя вышеприведенные аналитические выражения, можно показать, что для оценки зон коррозии, характеризующихся значениями $D/L > 3-4$, можно использовать «одномерную» оценку предельно обнаруживаемой коррозии, которая ограничена значением шумового контраста $C_n/(1+C_n)$ при условии, что отношение сигнал/шум $SNR_{thr} \geq 1$.

3.1.5 Изменение погрешности оценки коррозии во времени

Пример изменения измеряемого температурного сигнала в дефектной и бездефектной зонах показано на Рисунке 3.5а. Другие графики на Рисунке 3.5 показывают, как изменяется во времени отношение «одномерной» оценки уноса материала δ^{1Dest} (описание «одномерного» алгоритма дано выше) к истинному уносу материала $\delta^{true} = \Delta L/L$. Очевидно, что чем ближе отношение $\delta^{1Dest} / \delta^{true}$ к единице, тем точнее экспериментальная оценка степени коррозии; таким образом, представленные графики позволяют для каждого конкретного случая определить оптимальное время контроля коррозии τ_m .

Легко продемонстрировать, что τ_m есть также время достижения максимального текущего контраста температуры $C^{run} = (T_d - T_{nd})/T_{nd}$, или минимального отношения $r = T_{nd}/T_d$. При длительном нагреве τ_m наступает еще в ходе нагрева, затем непосредственно после окончания импульса нагрева имеет место локальный экстремум, за исключением ряда случаев (Рисунок 3.5б). При коротком импульсе нагрева имеет место единственный максимум контраста в определенный момент времени после нагрева (Рисунок 3.5г), что соответствует случаю дираковского нагрева.



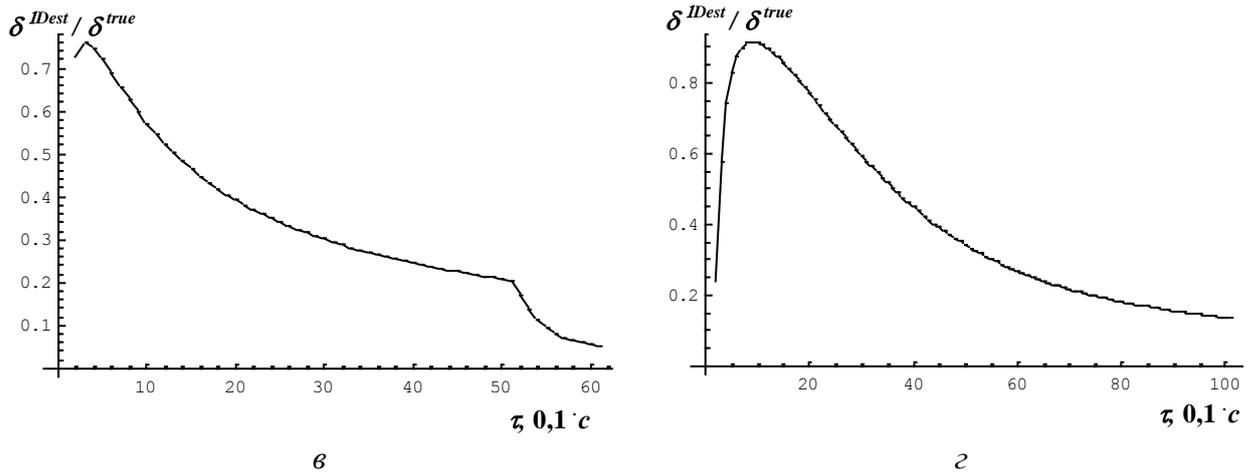


Рисунок 3.5 – Эволюция параметров оценки коррозии во времени:

а - температура в дефектной (*D*) и бездефектной (*ND*) областях (теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=5$ мм; $\tau_h=5$ с; дефект 15×15 мм; коррозия $\Delta L/L=50$ %);

б - оценка $\delta^{1Dest}(\tau) = [1 - T_{nd}(\tau)/T_d(\tau)] / \delta^{true}$ (теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=5$ мм; $\tau_h=5$ с; дефект 15×15 мм; коррозия $\Delta L/L=50$ %);

в - оценка $\delta^{1Dest} / \delta^{true}$ (теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=2$ мм; $\tau_h=5$ с; дефект 6×6 мм; коррозия $\Delta L/L=75$ %);

г - оценка $\delta^{1Dest} / \delta^{true}$ (теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=2$ мм; $\tau_h=5$ с; дефект 6×6 мм; коррозия $\Delta L/L=50$ %)

Еще несколько примеров характерных профилей динамической температуры приведено на Рисунке 3.6. Видно, что в низкотеплопроводной стали максимум отношения $\delta^{1Dest} / \delta^{true}$ может наступать как внутри импульса нагрева, так и после него (следует отметить, что самый большой дефект на Рисунке 3.6 *в* является практически одномерным, то есть бесконечным в поперечных направлениях).

Проведенный теоретический анализ подтвердил, что импульсная процедура ТК обеспечивает более высокую точность дефектометрии по сравнению с длительным (непрерывным) нагревом. В то же время в течение слишком короткого импульса поглощенной энергии может быть недостаточно для того, чтобы в зоне дефектов создать необходимые дифференциальные сигналы ΔT . Иными словами, толстые металлические изделия следует нагревать в течение некоего оптимального времени. При этом для достижения наилучшей точности дефектометрии время нагрева τ_h не должно превышать время τ_m . Если при этом поглощенной энергии будет недостаточно для возбуждения сигналов ΔT выше, чем температурная чувствительность использованного тепловизора, следует продолжить нагрев с прогрессирующей потерей точности оценки степени коррозии.

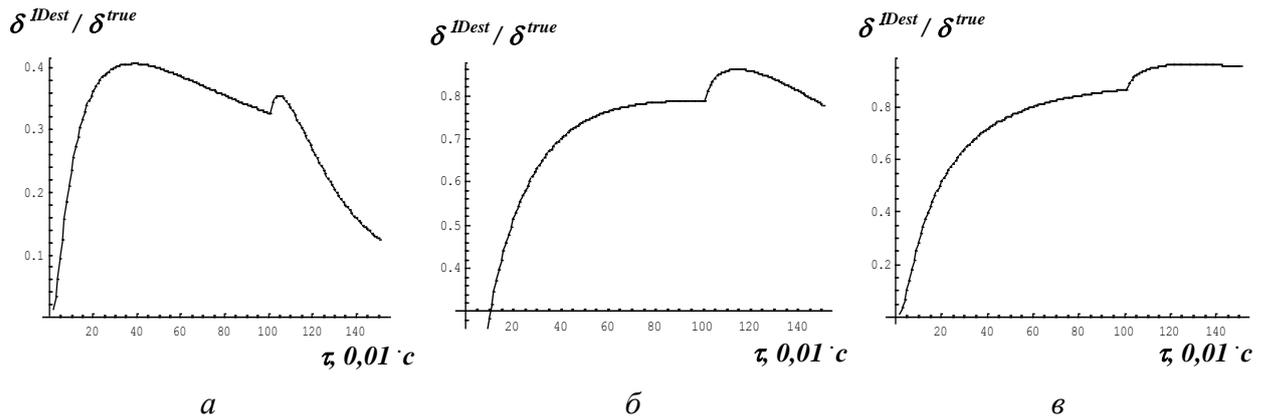


Рисунок 3.6 – Эволюция одномерной оценки коррозии:

а - теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=2$ мм; $\tau_h=1$ с; дефект 2x2 мм; коррозия $\Delta L/L=75$ %);

б - теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=2$ мм; $\tau_h=1$ с; дефект 6x6 мм; коррозия $\Delta L/L=75$ %);

в - теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К), толщина пластины $L=2$ мм; $\tau_h=1$ с; дефект 10x10 мм; коррозия $\Delta L/L=75$ %)

На Рисунке 3.7 сравнены оценки коррозии в одномерном и трехмерном случаях. В соответствии с теорией ТК точность оценки уноса материала возрастает во времени и достигает истинного значения (25 %) после нагрева. В то же время трехмерная диффузия тепла ухудшает оценку коррозии до 17 %, причем оптимальная оценка наступает уже «внутри» импульса нагрева.

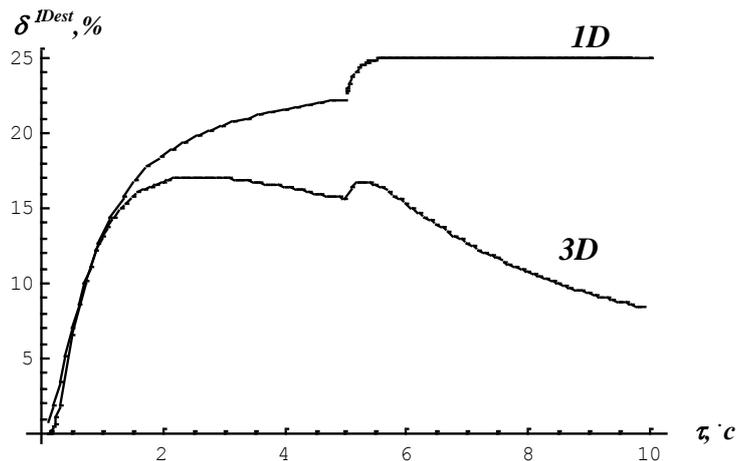


Рисунок 3.7 – Одномерная (1D) и трехмерная (3D) оценки 25 % коррозии в стали AISI 1010 (теплопроводность стали $K=63,9$ Вт/(м·К) толщиной 5 мм при нагреве импульсом длительностью 5 с, дефект 25x25 мм

3.2 Стандартные образцы

3.2.1 Стандартные образцы из стали Ст10 и С345Т толщиной 1 и 2 мм

Для экспериментальных исследований ТК стальных изделий были изготовлены четыре образца из стали толщиной 1 и 2 мм. Образцы №1 и №2 – плоские с пятью дефектами с четкими границами, имитирующими различную степень уноса материала (Рисунок 3.8 и 3.9, а также Таблица 3.6), испытывались как неокрашенными, так и окрашенными желтой акриловой краской. Образец №1 и №2 были изготовлены из стали Ст10. Образцы №3 и №4 – цилиндрические, окрашенные желтой акриловой краской, как матовой, так и глянцевой, содержали четыре дефекта без четких границ с уносом материала от 10 до 35% (Рисунок 3.10). Образцы №3 и №4 изготовлены из стали марки С345Т.



Образец №1 толщиной 1 мм



Образец №2 толщиной 2 мм

Рисунок 3.8 - Стандартные образцы, изготовленные из стали Ст10

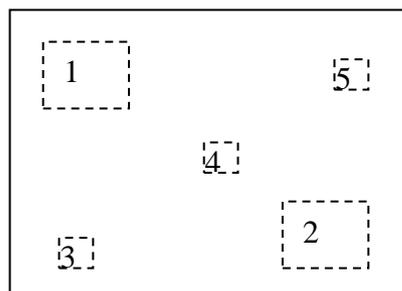


Рисунок 3.9 - Нумерация дефектов в стандартных образцах №1 и №2

Таблица 3.5 - Глубина «уноса» материала в образцах №1 и №2 в миллиметрах, измеренная по центру дефекта

	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
Пластина №1	0,25	0,46	0,19	0,23	0,45
Пластина №2	0,21	0,45	0,10	0,23	0,46



Рисунок 3.10 – Цилиндрические стандартные образцы №3 и №4 из стали С345Т толщиной 1 и 2 мм (слева-глянцевая акриловая краска желтого цвета, справа – матовая акриловая краска желтого цвета)

3.2.2 Стандартные образцы из стали Ст45 толщиной 6 и 10 мм

Для имитации дефектов в толстостенных стальных изделиях были изготовлены плоские образцы №5 и №6 из стали Ст45 толщиной 6 и 10 мм. Схема дефектов показана на Рисунке 3.11. Образцы были зачернены.

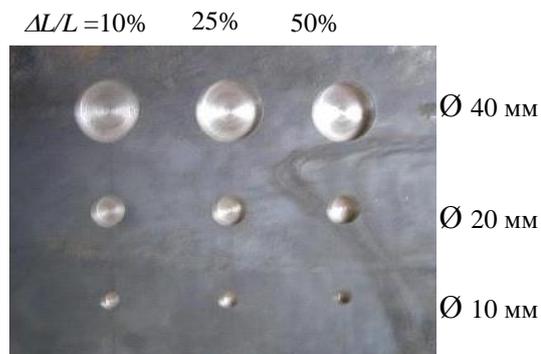


Рисунок 3.11– Плоские стандартные образцы №5 и №6 из стали Ст45 толщиной 6 и 10 мм

3.3 Аппаратура ТК

3.3.1 Тепловизионные системы

В экспериментальных исследованиях использованы два тепловизора ThermaCAM P65 HS фирмы FLIR Systems (США) и NEC TH-9100 фирмы NEC Avio (Япония). Оба прибора обладают весьма близкими характеристиками и производят приблизительно одинаковые результаты ТК коррозии.

Для обеспечения показателей тепловизионного контроля, соответствующих лучшим мировым приборам, был также применен тепловизор SC7700M (Рисунок 3.12) производства фирмы FLIR Systems (США).

Основные параметры тепловизора:

- Инфракрасный охлаждаемый МСТ детектор (КРТ) со спектральной чувствительностью в диапазоне 8-10 мкм, матрица 640x512 элементов, скорость 115 Гц (полный кадр), до 2900 Гц (в уменьшенном окне), чувствительность 0,02°C.
- Софтвр Altair - запись, анализ, экспорт данных.
- Температурная калибровка HiperCAL (5°C - 500°C).

Параметрами тепловизора, делающими его одной из лучших в мире моделей для проведения научных исследований, являются: 1) формат изображения 640x512; 2) температурная чувствительность 20 мК; частота смены изображений 115 Гц при полном формате.



Рисунок 3.12 – Тепловизор FLIR SC 7700M

3.3.2 Оптические и конвективные источники нагрева для контроля стандартных образцов №1 и №2

В качестве оптических источников нагрева стальных тонкостенных стандартных образцов №1 и №2 использовали галогеновые лампы различных модификаций, ксеноновые лампы вспышки и светодиодные панели (Рисунок 3.13). Из них: два галогеновых нагревателя на основе трубчатых ламп мощностью 1 кВт каждая (Рисунок 3.13а), две импульсные ксеноновые лампы (Рисунок 3.13б) с энергией 3,2 кДж (длительность импульса 5 мс), 30 кВт галогеновый нагреватель (Рисунок 3.13в), состоящий из 6 трубчатых галогенных ламп мощностью 5 кВт каждая. Также для проведения исследований был разработан источник оптического нагрева мощностью 12 кВт (Рисунок 3.13г), состоящий из двух оптических головок, в каждой из которых размещены три трубчатые галогеновые лампы мощностью 2 кВт каждая. Основываясь на результатах предыдущих исследований по выявлению коррозии, в данном источнике оптического нагрева введены непрозрачные шторки, которые автоматически перекрывают поток излучения после выключения нагревателя, в результате чего устраняется мощная

помеха за счет отраженного излучения горячих ламп после их выключения. На Рисунке 3.13д представлены светодиодные панели, представляющие новое поколение оптических нагревателей. Основными достоинствами светодиодных нагревателей является работа в узком спектральном диапазоне, не попадающем в инфракрасную часть, что в свою очередь преимущественно по сравнению с галогеновыми лампами. В качестве конвективного источника нагрева использовали промышленные фены мощностью в 2 кВт каждый (Рисунок 3.13е).



a – Галогеновые лампы мощностью по 1 кВт каждая



б– Импульсные ксеноновые лампы вспышки мощностью 3,2 кДж



в – 30 кВт галогеновый нагреватель площадочного типа



г – Специализированный источник нагрева на галогеновых лампах общей мощность 2×6 кВт



д-светодиодные панели 2×500Вт



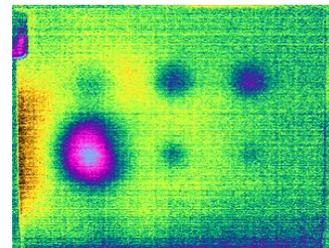
е- промышленный фен мощностью 2 кВт

Рисунок 3.13 – источники нагрева стандартных образцов №1 и №2

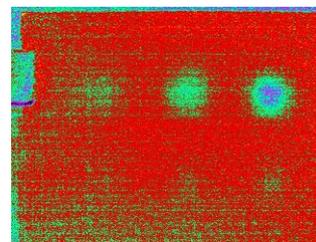
3.3.3 Источники нагрева толстостенных стандартных образцов №5 и №6

Для контроля стандартных образцов №5 и №6 толщиной 6 мм и 10 мм применялись следующие источники нагрева: промышленный фен мощностью 2 кВт, галогеновая лампа мощностью 1 кВт, резистивный полосовой нагреватель мощностью 2 кВт, площадочный контактный нагреватель мощностью 1,5 кВт и две ксеноновые импульсные лампы с энергией 3,2 кДж и длительностью импульса 5 мс.

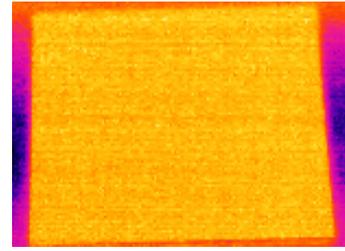
Сравнение техник нагрева продемонстрировано на Рисунке 3.14, где приведены оптимальные инфракрасные изображения, обработанные по методу анализа главных компонент (АГК), полученные с помощью различных нагревателей. Отрицательные результаты были получены с использованием полосового нагревателя, по-видимому, из-за неоптимальной скорости сканирования поверхности. Проблема с использованием контактного площадочного нагревателя состояла в появлении воздушных зазоров между плоскостью нагревателя и поверхностью объекта контроля, что создавало неравномерный нагрев. Конвективный и оптический нагрев привели к сходным результатам, обеспечивая обнаружение от четырех до шести дефектов из имевшихся в образце девяти дефектов. Данные по количеству обнаруживаемых дефектов приведены в Таблице 3.6.



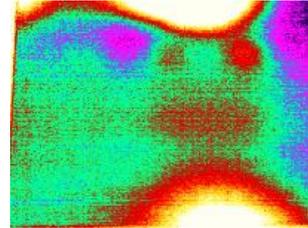
а - конвективный нагрев промышленным феном мощностью 2 кВт



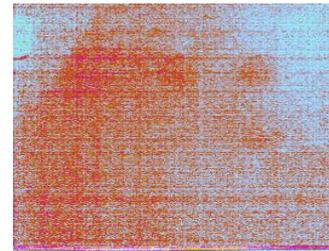
б - оптический нагрев галогенной лампы мощностью 1 кВт



в - нагрев полосовым резистивным нагревателем мощностью 2 кВт, вручную перемещаемым вдоль поверхности объекта контроля



г - контактный нагрев площадочным резистивным нагревателем мощностью 1,5 кВт



д - оптический нагрев двумя ксеноновыми импульсными лампами с энергией 3,2 кДж и длительностью импульса 5 мс

Рисунок 3.14 – Сравнение техник нагрева при испытаниях стандартного образца №3 толщиной 6 мм

Таблица 3.6 – Сравнительные результаты активного ТК образца №5 толщиной 6 мм

Источник нагрева	Число обнаруженных дефектов (из 9)
Промышленный фен	5
Галогенная лампа 500 Вт	4
Полосовой нагреватель	0
Площадочный нагреватель	2
Две ксеноновые лампы 3,2 кДж	3

3.3.4 Инфракрасная термографическая система контроля коррозии

Инфракрасная термографическая система контроля коррозии (ИТСКК) предназначена для активного теплового неразрушающего контроля дефектов в металлических и неметаллических материалах и изделиях, в особенности, металлических образцов плоской и цилиндрической формы с дефектами в виде локальной коррозии. ИТСКК может быть использована для неразрушающего контроля композиционных, многослойных и сотовых материалов и конструкций, используемых в авиакосмической, энергетической и энергетической промышленности, а также в судо- и автомобилестроении. Основное назначение ИТСКК - обнаружение скрытой коррозии в стальных цилиндрических контейнерах, используемых на атомных станциях для хранения низкоактивных радиоактивных отходов.

ИТСКК может эксплуатироваться в двух вариантах: с использованием оптического и конвективного нагрева. Общая структура обоих вариантов показана на Рисунке 3.15. Вертикально-расположенное изделие нагревают по образующим либо двумя трубчатыми галогеновыми лампами (вариант а)), либо двумя промышленными фенами (вариант б)).

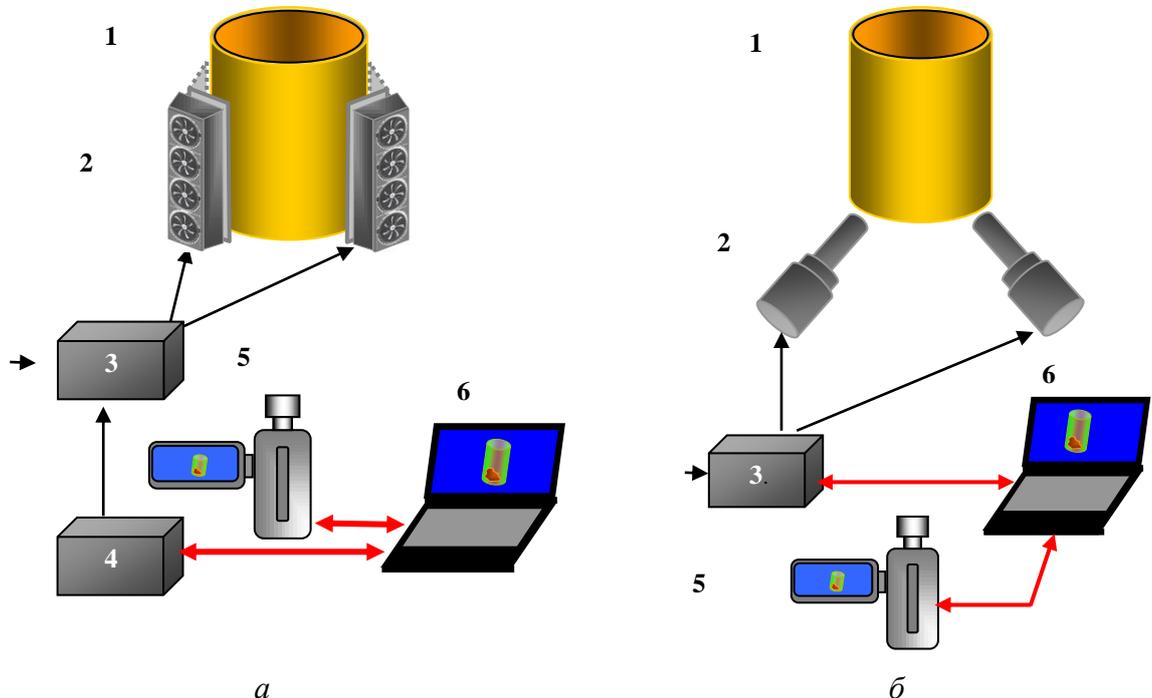


Рисунок 3.15 – Лабораторная термографическая система (ИТСКК): вариант с оптическим нагревом (а) и с конвективным нагревом (б) (1–изделие; 2–источник нагрева; 3–блок управления; 4–блок связи; 5–тепловизор; 6–компьютер)

3.3.5 Компьютерная программа обработки данных (ThermoLab)

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы ThermoFit Pro, ранее разработанной В.В. Ширяевым в Томском политехническом университете и специализированной программой ThermoLab для синхронной работы с управляющей программой.

3.4 Экспериментальные результаты

3.4.1 Проверка формул «трехмерной» инверсии данных

Два дефекта, выбранные в образце №5 и обозначенные D1 и D2 (Рисунок 3.16), соответствовали уносу материала 50% при диаметре дефектов соответственно 40 и 20 мм. Применили оптический нагрев галогенными лампами мощностью 5 кВт в течение 20 с. Максимальные значения температурных контрастов над центрами дефектов составили $C_m=0,66$ и $C_m=0,36$ для дефектов D1 и D2, причем они наблюдались соответственно через 11 и 6 с после начала нагрева. Температуропроводность стали, необходимая для определения чисел Фурье в предложенных выше формулах инверсии, была измерена по методу Паркера на уровне $13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а видимые размеры дефектных отметок составили 43 мм ($D/L=4,3$) и 21 мм ($D/L=2,1$) соответственно. Значения вышеуказанных экспериментальных параметров были подставлены в «трехмерные» уравнения инверсии (3.5), причем было принято, что $Fo_h = Fo_m$, поскольку максимумы контрастов наблюдались в ходе нагрева. Оценки величины уноса материала с применением «трехмерного» алгоритма инверсии составили соответственно 53% и 55% при истинном значении 50%. Заметим, что применение «одномерной» формулы (3.3) привело к оценкам 40% и 26% соответственно, следовательно, наивысшую точность дефектометрии обеспечил предложенный «трехмерный» алгоритм инверсии данных.

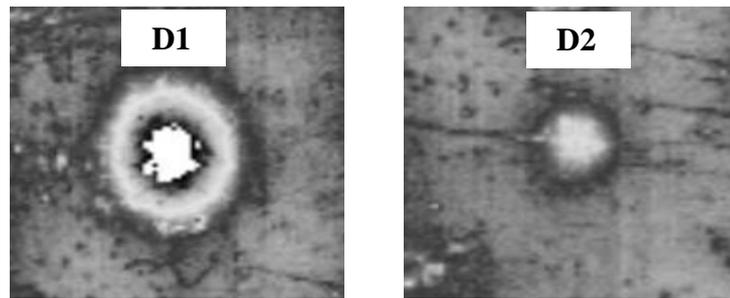
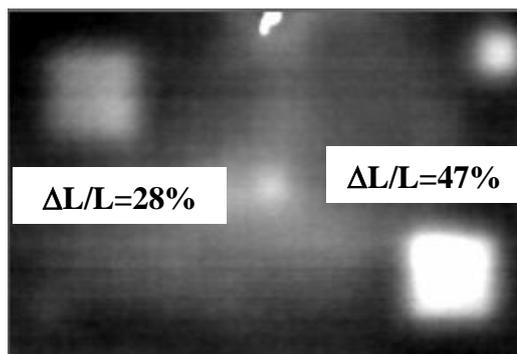


Рисунок 3.16 – Применение «трехмерного» алгоритма инверсии экспериментальных данных при оценке параметров двух дефектов в образце №5 толщиной 6 мм

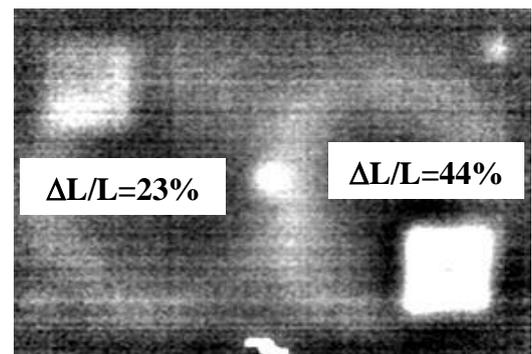
3.4.2 Конвективный нагрев

Эффективность методов тепловой стимуляции контролируемых образцов оценивалось по критерию отношения сигнал/шум. Забегая вперед обозначим, что наилучшее значения отношения сигнал/шум (SNR) в последовательностях инфракрасных изображений получается при использовании метода корреляционного анализа, анализа главных компонент (АГК) и Фурье анализа. При этом предварительная обработка (фильтрация, нормализация) не требуется, так как она не влияет на величину SNR .

Влияние толщины стандартного образца и алгоритма обработки данных на выявляемость дефектов представлены на Рисунке 3.17. За алгоритм обработки был выбран метод АГК.



АГК. Поверхность окрашена желтой акриловой краской.
Образец №1 толщиной 1 мм



АГК. Поверхность окрашена желтой акриловой краской.
Образец №2 толщиной 2 мм

Рисунок 3.17 – Результаты теплового контроля образцов №1 и №2 при конвективном нагреве

Результаты статистической обработки данных при конвективном нагреве образцов №1 и №2 приведены Таблицах 3.7 и 3.8 (серым цветом выделены ячейки таблицы, соответствующие случаям с $SNR < 3$).

Таблица 3.7 – Конвективный нагрев образца №1 толщиной 1мм

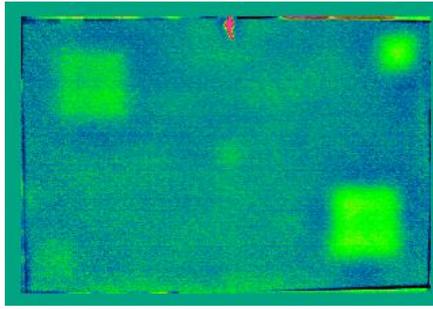
Нагрев воздухом 10 с					
	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	2.4053	13.481	1.1698	3.3336	8.8544
Вероятность обнаружения	0.769	1.000	0.274	0.823	1.000
Нагрев воздухом 30 с					
	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	4.0051	11.697	1.1815	5.4307	13.120
Вероятность обнаружения	0.935	1.000	0.305	1.000	1.000

Таблица 3.8 - Конвективный нагрев образца №2 толщиной 2мм

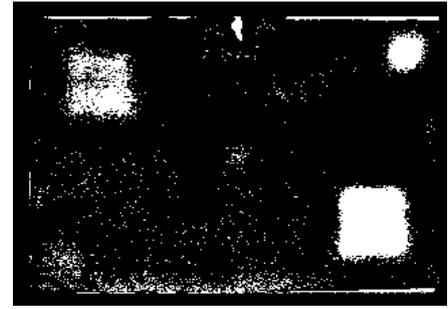
Нагрев воздухом 15 с					
	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	3.6702	4.6447	-	3.2505	5.1781
Вероятность обнаружения	0.910	0.990	-	0.803	0.963
Нагрев воздухом 30 с					
	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	5.5146	14.453	-	1.9953	6.252
Вероятность обнаружения	0.757	1.000	-	0.128	0.917
Нагрев воздухом 45 с					
	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	8.5161	16.509	0.6693	1.8882	3.6827
Вероятность обнаружения	1.000	1.000	0.076	0.611	0.885

3.4.3 Оптический нагрев

Результаты испытаний образца №2 с помощью специализированного источника нагрева на галогеновых лампах общей мощностью 2х6 кВт показаны на Рисунке 3.18 (длительность нагрева 30 с) и в таблице 3.9.



a - изображение 2-й компоненты по методу АГК



б - бинарное изображение

Рисунок 3.18 – Результат теплового контроля образца №2 (оптический нагрев 30 секунд, 5 кВт) и статистической обработки данных (уровень ложной тревоги 5%)

Таблица 3.9 – Оптический нагрев образца №2 толщиной 2 мм

	Дефект №1	Дефект №2	Дефект №3	Дефект №4	Дефект №5
<i>SNR</i>	2.8446	8.7865	1.1389	1.5503	9.8894
Вероятность обнаружения	0.795	1.000	0.188	0.310	1.000

Следует заметить, что при нагреве образца №2 с помощью двух ксеноновых ламп-вспышек общей мощностью 3,2 кДж дефекты не обнаруживались вследствие малой поглощенной энергии.

3.4.4 Моделирование реальной коррозии

Все вышеприведенные данные были получены на стандартных образцах с дефектами в виде засверловки, имеющими резко выраженные границы. В реальных контейнерах на результаты ТК оказывают влияние излучательно-поглощательные свойства контролируемой поверхности (цвет и состояние краски), а также сглаженная форма коррозионных участков.

В частности, до окрашивания стандартных образцов №3 и №4 был измерен коэффициент излучения поверхности. В случае образца №3 толщиной 1 мм из стали С345Т коэффициент излучения составил 0,14 (следует отметить, что в большинстве методических указаний по применению ИК термографии не рекомендуется контролировать материалы с коэффициентом излучения менее 0,6). Поэтому ни один из способов нагрева не обеспечил надежного выявления дефектов в неокрашенном образце №3.

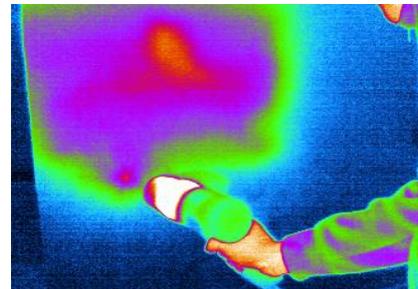
Неокрашенный образец №2 из углеродной стали Ст10 толщиной 2 мм обладал коэффициентом излучения, равным 0,64, что обеспечило выявление четырех дефектов из пяти при использовании конвективного нагрева.

После того, как образцы были окрашены желтой акриловой краской, аналогичной той, которая используется на контейнерах для хранения радиоактивных отходов, выявляемость дефектов существенно улучшилась, в особенности, при конвективном нагреве (проблемой оптического нагрева является высокий коэффициент отражения видимого света желтой краской). Эти результаты были представлены на Рисунке 3.19.

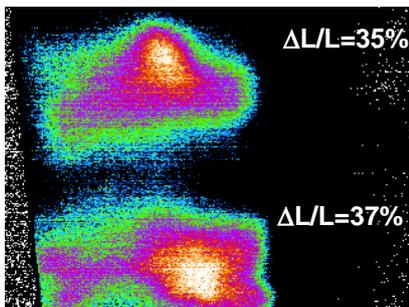
Стандартный образец №4 из стали С345Т был окрашен наполовину матовой и наполовину глянцевой желтой краской (Рисунок 3.19а). Каждая зона содержала два участка коррозии со сглаженными границами. Применяя конвективный нагрев (Рисунок 3.19б), все четыре дефекта легко обнаруживались, причем разницы между матовой и глянцевой краской обнаружено не было, поскольку коэффициент излучения в ИК диапазоне для обеих красок был измерен на уровне 0,93–0,95. Построенные карты коррозии показали хорошее соответствие оценок степени уноса материала до от 10 до 37% по сравнению с истинными значениями (Рисунок 3.19в,г).



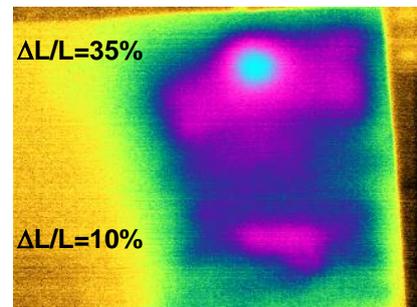
а - цилиндрический стандартный образец №3 толщиной 1 мм (слева-глянцевая акриловая краска желтого цвета, справа – матовая акриловая краска желтого цвета)



б - процесс нагрева с помощью промышленного фена



в - тепловой контроль левой стороны образца



г - тепловой контроль правой стороны образца

Рисунок 3.19– Результаты теплового контроля образца №3 при конвективном нагреве

3.4.5 Оптимизация процедуры нагрева стальных изделий

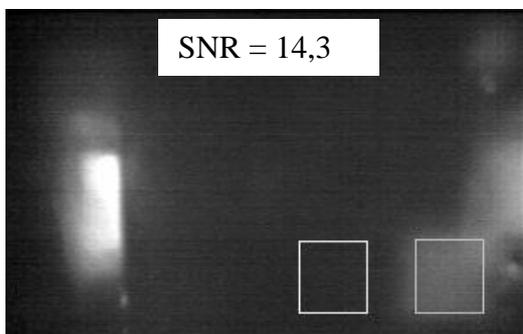
Одной из основных задач исследований было сравнение эффективности различных способов нагрева изделий из стали толщиной 1...2 мм с применением различных алгоритмов обработки. На Рисунке 3.20 приведены обобщенные результаты экспериментальных исследований; приведены достигнутые отношения сигнал/шум на примере образцов №1 и №2. Для определения значений отношения сигнал-шум на инфракрасном изображении выбирались квадратные зоны интереса.

Левая колонка изображений (см. Рисунок 3.20) относится к образцу №1, правая – к образцу №2. Визуальный анализ полученных инфракрасных термограмм позволяет сделать следующие выводы: 1) в соответствии с теорией ТК, дефектные зоны выглядят теплее, чем бездефектные в «сырых» изображениях, в то время как участки с коррозией в обработанных изображениях характеризуются как более теплые, так и более холодные, чем бездефектный фон; 2) все используемые техники обработки изображений основаны на анализе изменения температуры во времени и обеспечивают значительное снижение неравномерности нагрева; 3) наилучшие, с точки зрения визуального восприятия результаты получены с использованием 30 кВт галогенового источника нагрева и 4 кВт воздушных фенов; 4) независимо от толщины образца 25 % процентный унос материала с поперечными размерами в 10x10 мм может быть выявлен с большой долей вероятности; дефекты меньшего размера также могут быть обнаружены, но достоверность такого выявления будет достаточно низкой.

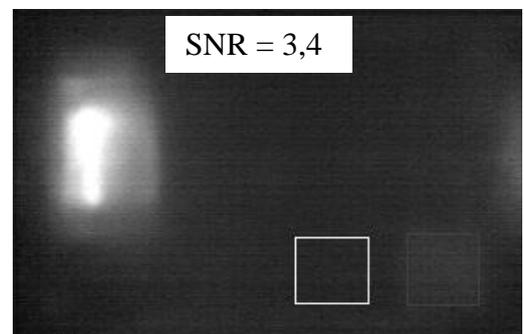
Образец №1

Образец №2

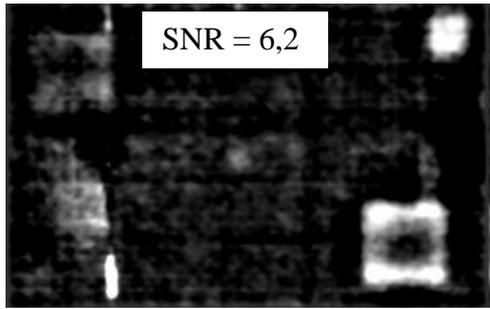
Две галогеновые лампы мощностью по 1 кВт каждая. Нагрев 10с.



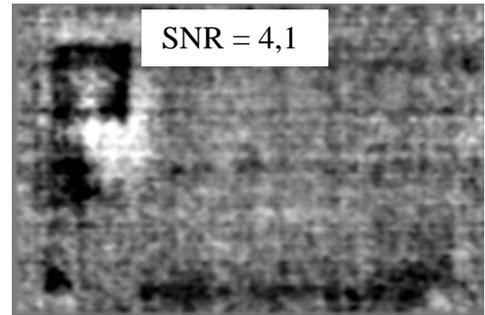
«Исходное» изображение



«Исходное» изображение

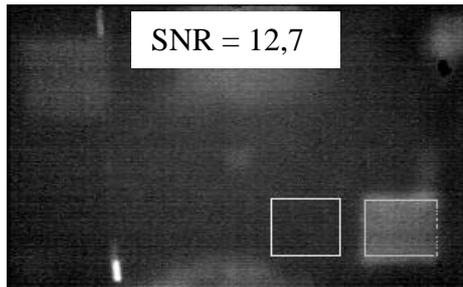


АГК

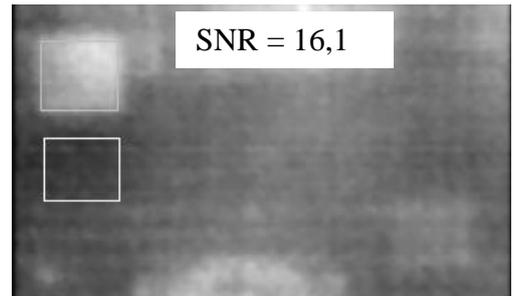


АГК

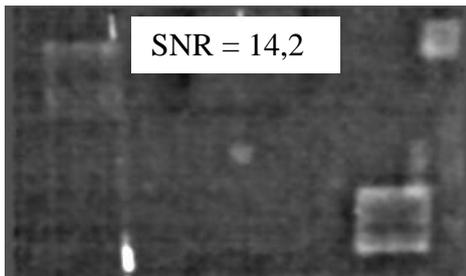
30 кВт галогеновый нагреватель площадочного типа. Нагрев 3с.



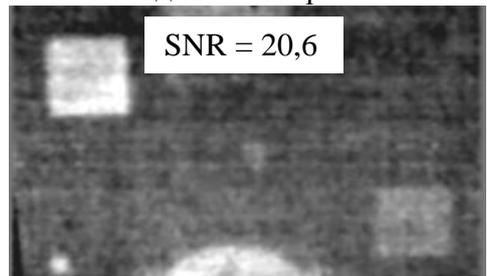
«Исходное» изображение



«Исходное» изображение

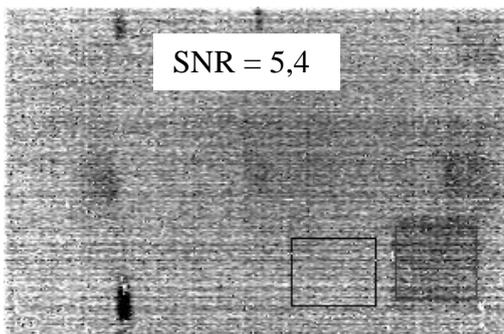


АГК

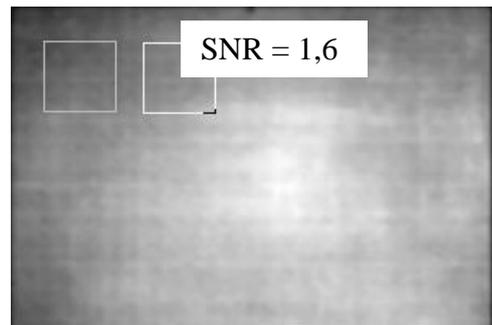


АГК

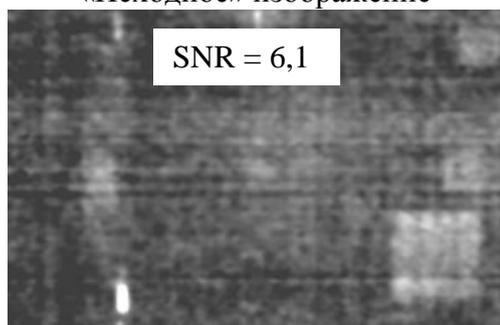
Импульсные ксеноновые лампы вспышки мощностью 3,2 кДж. Нагрев 5мс.



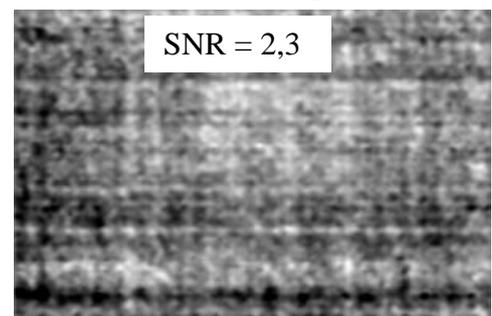
«Исходное» изображение



«Исходное» изображение

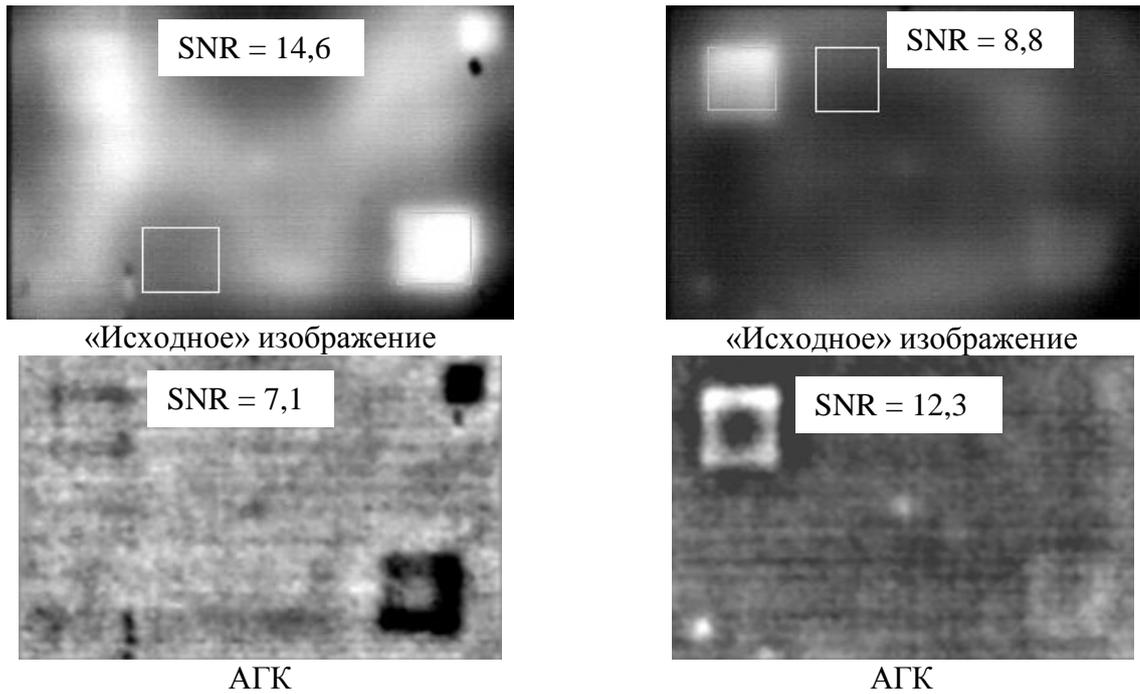


АГК



АГК

Промышленные фены суммарной мощностью в 4 кВт. Нагрев 5с.



Светодиодные панели 2×500 Вт. Нагрев 5с.

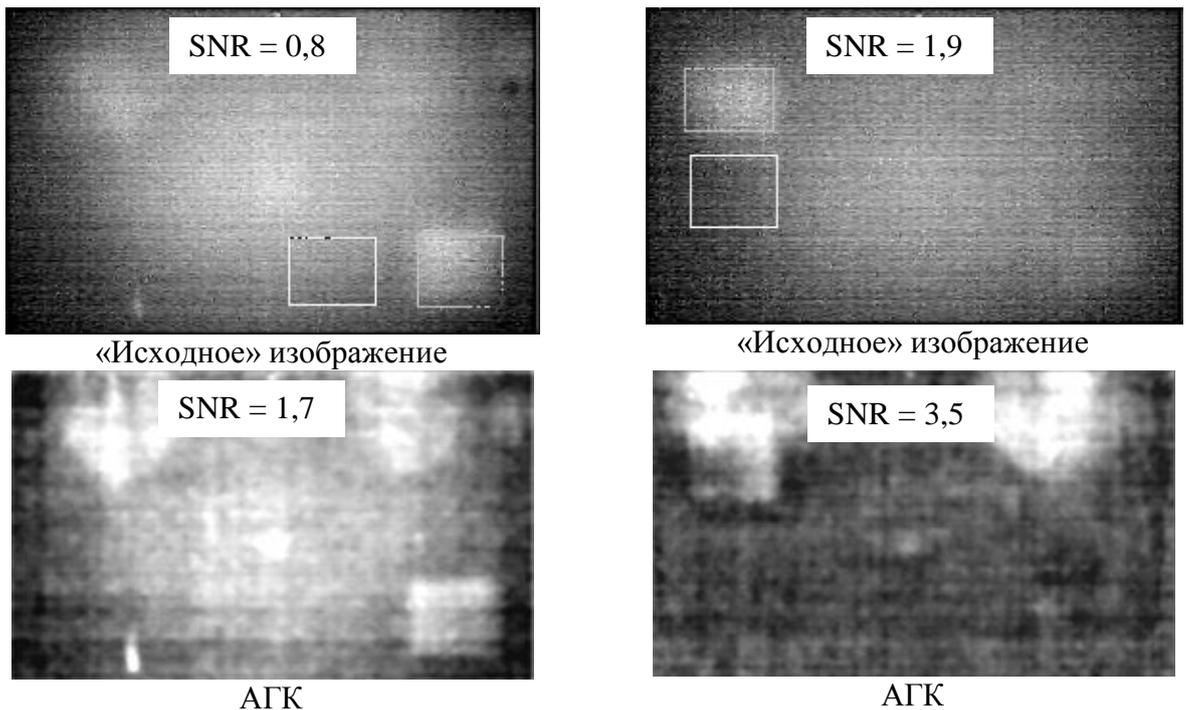


Рисунок 3.20 – результаты проведения контроля коррозии стальных образцов №1 и №2

Анализ экспериментальных данных по значениям отношений сигнал–шум после применения алгоритмов обработки: анализ главных компонент (АГК) и корреляционный анализ (КА), представленный на Рисунке 3.21 также указывает на преимущества 30 кВт галогенового и 4 кВт воздушного источников нагрева. Наибольшее значение S на уровне 20,6 обеспечивает надежное обнаружение соответствующих ему дефектов. Интересным

фактом является то, что в некоторых случаях значения S выше у необработанных «сырых» изображениях, нежели у обработанных, однако визуальное распознавание дефектов значительно улучшается после применения перечисленных выше алгоритмов обработки. Это может быть объяснено выбором дефектных и бездефектных зон малого размера, хотя достоинства обработки изображений проявляются при оценке изображений большого формата. Слабая эффективность ксеноновых ламп может быть объяснена существенной толщиной стальных образцов; эта техника лучше всего проявляет себя в контроле тонких алюминиевых пластин. Важно отметить неудовлетворительные результаты полученные светодиодными нагревателями. Такое открытие не оправдывает надежд по улучшению результатов при использовании излучения, близкого к монохроматическому, спектр которого лежит в области 0,7 мкм, т.е. далеко за пределами спектрального диапазона большинства ИК камер (2-5 и 7-13 мкм), и не создает шумов в виде отражений. Однако, в проделанном эксперименте, поглощение светодиодного излучения образцами, окрашенными желтой краской слишком мало, чтобы обеспечить достаточный температурный сигнал.

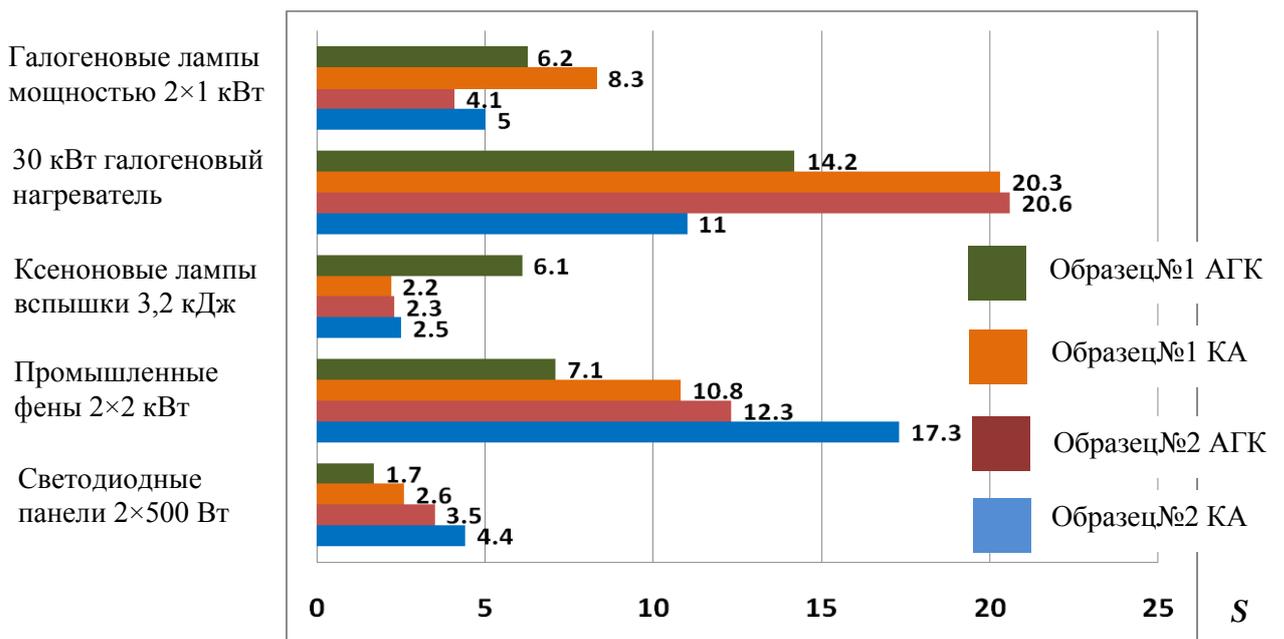


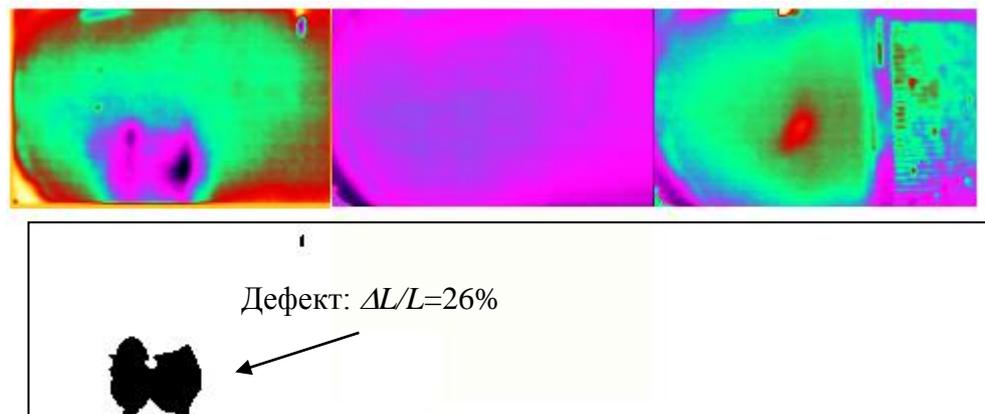
Рисунок 3.21 – Оценка эффективности различных источников нагрева при контроле коррозии в образцах толщиной 1 и 2 мм

3.4.6 Модуль программы обработки данных ThermoLab «Контроль коррозии в цилиндрических изделиях»

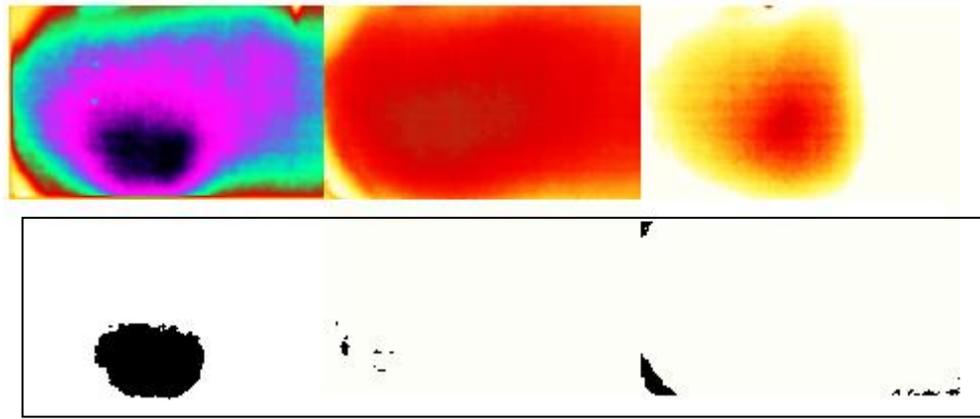
Программа ThermoLab дополнена специализированным программным модулем «Контроль коррозии в цилиндрических изделиях», который позволяет автоматизировать сбор и обработку данных при неразрушающих испытаниях цилиндрических изделий, в особенности, стальных «бочек» объемом от 50 до 400 литров.

На Рисунках 3.22-3.24 и приведены иллюстрации обработки данных при тепловом контроле стальной бочки с толщиной стенки 1 мм, содержащей несколько участков внутренней коррозии.

Наиболее простой принцип сбора и обработки данных представлен двумя верхними термограммами на Рисунке 3.22, где показаны три последовательные полные термограммы участка бочки и ниже приведена бинарная карта дефектов, построенная на основе гистограмм исходных изображений при 5%-ном уровне ложной тревоги. На карте дефектов отчетливо видна зона коррозии с 26% уноса материала стенки. Для того же участка бочки на изображениях ниже приведены три изображения главной компоненты, а также построенная на их основе карта дефектов.



a



б

Рисунок 3.22 – Результаты ТК кольцевой зоны стального контейнера толщиной 1 мм с локальным уносом материала 26% (импульсный оптический нагрев):

a – исходные термограммы и карта дефектов;

б – изображения 1-й главной компоненты и карта дефектов

Еще один алгоритм обработки данных связан с применением нейронной сети иллюстрируется Рисунками 3.23 и 3.24. Перспективность применения нейронной сети заключается в относительно высокой скорости обработки данных и простоте использования. Предварительно обучив персептрон или другую нейронную сеть на тестовых последовательностях, можно в дальнейшем использовать их при обработке данных. В качестве нейронной сети использован персептрон с 16 входами, способный к классификации 2-х классов качества (дефектная зона, бездефектная зона). Результаты использования персептрона приведены ниже.

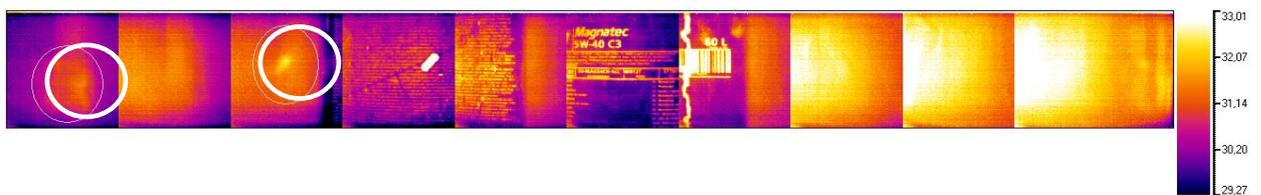


Рисунок 3.23 – Панорамное изображение развертки цилиндрического изделия без обработки данных (эллипсами выделены дефектные зоны)

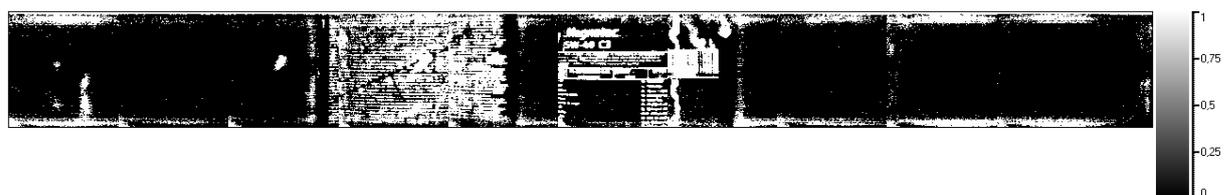


Рисунок 3.24 – Результат использования нейронной сети на основе персептрона (приведено бинарное изображение, на котором белым цветом показаны дефектные зоны;

помимо дефектных зон выделены бумажные маркеры, наклеенные на поверхность цилиндрической бочки)

Следует отметить, что нейронная сеть распознала все две зоны с коррозией. Дальнейшее исследование нейронных сетей связано с усложнением их структуры и процесса обучения, что позволит повысить достоверность применения нейронной сети. Например, возможно обучить нейронную сеть на классификацию зон с коррозией, зон с наклеенной бумагой, зон с отсутствием краски (царапины), а также бездефектных зон.

3.5 Маркетинговые аспекты ТК коррозии контейнеров, используемых для хранения радиоактивных отходов

3.5.1 Требования к контролю коррозии в металлических оболочках

3.5.1.1 Контейнеры для хранения радиоактивных отходов

Проблема утилизации подобных отходов в последние десятилетия стала одной из наиболее злободневных в плане безопасности окружающей среды. Объемы радиоактивных отходов (РАО) насчитывают многие тысячи тонн в год. Основная цель обращения с РАО – их надежная изоляция, обеспечивающая радиационную безопасность человека и окружающей среды на весь период потенциальной опасности. Безопасность при хранении и (или) захоронении радиоактивных отходов должна обеспечиваться за счет последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду.

На сегодняшний день существует три класса РАО – низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные. Наиболее простой является утилизация первых двух классов. Стоит отметить, что в зависимости от своего химического состава радиоактивные отходы подразделяются на короткоживущие (с малым периодом полураспада) и долгоживущие (с большим периодом полураспада). В первом случае самым простым способом будет временное хранение радиоактивных материалов на специальных площадках в герметических контейнерах. После определенного промежутка времени, когда происходит распад опасных веществ, оставшиеся материалы уже не представляют опасности и могут быть утилизированы как обычный мусор. Именно так поступают с большей частью

технических и медицинских источников радиоактивного излучения, которые содержат только короткоживущие изотопы с периодом полураспада максимум несколько лет. В качестве контейнеров для временного хранения в этом случае обычно используют стандартные металлические бочки объемом 200 литров. При этом низко и среднеактивные отходы заливают цементом или битумом для предотвращения их попадания за пределы емкости.

3.5.1.2 Резервуары типа РВС

Своевременное выявление и устранение дефектов, нарушающих герметичность резервуаров, является важнейшим обеспечением их эксплуатационной надежности. Ежегодному профилактическому осмотру должны подвергаться открытые участки стен и кровли, доступные для осмотра внутренние поверхности резервуаров, места ввода трубопроводов в проходном тоннеле, каналы и колодцы, находящиеся в непосредственной близости к резервуарам, а также пьезометрические скважины в районе расположения резервуаров. При обнаружении признаков нарушения герметичности резервуара, повреждения его конструкций, осадки основания должно производиться внутреннее и наружное обследование резервуара.

При коррозионном износе металла для определения необходимости вывода металлического резервуара в ремонт руководствуются нормативными требованиями, содержащимися в соответствующих отраслевых документах.

3.5.2 Традиционные методы контроля коррозии

Традиционными методами неразрушающего контроля коррозии в металлических оболочках являются ультразвуковые (УЗ) и вихретоковые (ВТ), причем для резервуаров и сосудов различного типа наиболее часто применяют УЗ контроль.

В России нормативные аспекты неразрушающего контроля наиболее разработаны для толстостенных стальных резервуаров, используемых в нефтехимии. Согласно документу РД 153-112-017-97 «Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров» выбирают необходимое минимальное число точек измерения на поверхности элемента корпуса резервуара. В частности, документ СТО 0030-2004 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и

нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции» предписывает, что толщину трех нижних поясов, кроме низа стенки, измеряют не менее чем по четырем диаметрально противоположным образующим в трех точках по высоте пояса (низ, середина, верх). Толщина остальных поясов должна измеряться не менее, чем по одной образующей также в трех точках по высоте каждого пояса.

3.5.3 Тепловой контроль коррозии реальных объектов

Активный ТК конструкционных материалов, полуфабрикатов и готовых изделий можно рассматривать как штатный метод неразрушающего контроля в ограниченном числе стран, прежде всего в США, Франции, Германии и, в какой-то степени, в бывшем СССР. Подавляющее число систем, описанных в научно-технической литературе, были разработаны для лабораторных исследований и в редких случаях заканчивались тиражированием в заметных количествах.

Одним из показателей повышения интереса и уровня доверия к системам теплового контроля является, разработанная в недавнем времени, ИК термографическая установка контроля коррозии в контейнерах для хранения радиоактивных отходов является система, внедренная на атомной станции Ангра (Бразилия). Термографическая установка разработана в рамках совместного проекта Томского политехнического университета и Папского католического университета г. Рио-де-Жанейро, и предназначена для решения специализированной задачи контроля коррозии в стальных контейнерах на атомных станциях толщиной до 1–2 мм. Следует отметить, что данная установка является аналогом созданной в НИ ТПУ ИТСКК с схожими техническими возможностями по обнаружению скрытых дефектов.

Сущность разработанной технологии отображается Рисунком 3.25, на котором представлен рабочий момент процедуры контроля резервуара для хранения радиоактивных отходов на атомной станции Ангра, Бразилия (вклад зарубежного партнера состоит в создании автоматизированной системы транспортировки контейнеров, их размещения на рабочем месте и сканировании боковой поверхности и днища). Система содержит устройство импульсного нагрева контейнера - две импульсные ксеноновые лампы.

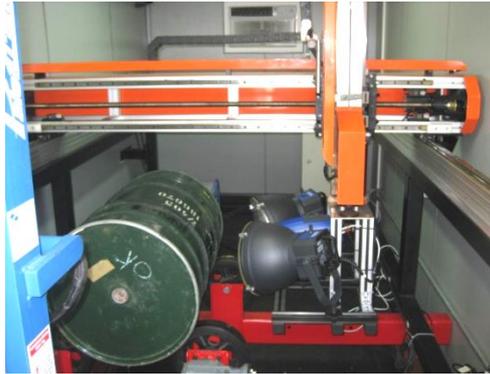


Рисунок 3.25 – Технология импульсного ТК коррозии в контейнерах для хранения радиоактивных отходов

Контейнер транспортируют из ангара хранения в ангар контроля, где размещают на специальных направляющих, управляемых роботизированной системой ТК, которая периодически вращает и переворачивает контейнер для стопроцентного контроля. Процесс испытаний состоит из 200 эпизодов. В каждом из эпизодов контролируется определенная зона относительно небольших размеров, которая вначале нагревается двумя импульсными ксеноновыми лампами с энергией 3,2 кДж и длительностью импульса 5 мс, после чего регистрируют быстротекущий процесс охлаждения нагретого участка контейнера с помощью тепловизора (частота записи до 100 Гц). Все проконтролированные фрагменты «сшиваются» с помощью специальной компьютерной программы, которая также позволяет оценить унос материала в процентах.

3.5.4 Потребители технологии ТК коррозии

Отрасли промышленности-потребители предлагаемого научно-технического продукта:

- ядерная энергетика (основной потребитель);
- теплоэнергетика;
- нефтехимия.

Объекты применения предлагаемого научно-технического продукта:

- в ядерной энергетике – стальные контейнеры для хранения низкоактивных радиоактивных отходов, сосуды и резервуары;
- в теплоэнергетике – сосуды и резервуары, трубопроводы;
- в нефтехимии – надземные резервуары, корпуса химических реакторов, сосуды и трубопроводы.

Примеры объектов контроля приведены на Рисунке 3.26.

Обнаруживаемый тип дефектов – скрытая коррозия внутренней стенки, выражаемая в процентах уноса основного материала и площади коррозии.



Рисунок 3.26 – Объекты применения технологии ТК коррозии в ядерной промышленности, теплоэнергетике и нефтехимии

3.5.5 Сравнительный анализ существующих систем ТК коррозии

Сравнительный анализ основных технических характеристик разработанной в НИ ТПУ ИТСКК и продукции мировых лидеров приведен в Таблице 3.10. В качестве аналогов выбраны коммерческая система ThermoScope™ фирмы Thermal Wave Imaging (США) и экспериментальная установка производства NASA (США). Следует заметить, что система ThermoScope™ не может быть использована для контроля коррозии в толстостенных стальных оболочках, поскольку предназначена для испытаний алюминиевых самолетных панелей. Система NASA является более специализированной, чем ИТСКК, поскольку

реализует принцип полосового нагрева и строчного сканирования; ее основное назначение – неразрушающий контроль трубных досок бойлеров тепловых станций.

Таблица 3.10 – Сравнительный анализ основных технических характеристик выполненной разработки и продукции мировых лидеров в области создания систем активного ТК коррозии

Параметр	Выполненная разработка (ИКТСС)	ThermoScope™ (Thermal Wave Imaging, США) *	Система контроля коррозии (NASA, США) **
Объект контроля и его толщина 	Стальные оболочки 0–15 мм	Алюминиевые панели 0–2 мм	Стальные оболочки 0–15 мм
Размер зоны одновременного контроля 	0,04 м	0,02 м	0,04 м
Производительность испытаний	4,7 м ² /час	2,4 м ² /час	5 м ² /час
Предельный обнаруживаемый унос материала	10%	5% ***	10%
Минимальный обнаруживаемый размер коррозионного пятна	10 мм	5 мм ***	10 мм
Предельная мощность нагрева	15 кВт/м ² (галогеновые лампы) До 10000 Дж/м ² (ксеноновые лампы)	До 10000 Дж/м ² (ксеноновые лампы)	30 кВт/м ² **** (галогеновые лампы) До 10000 Дж/м ² (ксеноновые лампы)
Длительность нагрева	5 мс (ксеноновые лампы) До 20 с (галогеновые лампы)	5 мс (ксеноновые лампы)	Непрерывный полосовой нагрев галогеновыми лампами
Наличие прецизионной системы сканирования	Нет	Нет	Да
Спектральный диапазон	3–5 мкм 7–13 мкм (в зависимости от типа примененного тепловизора)	3–5 мкм 7–13 мкм (в зависимости от типа примененного тепловизора)	3–5 мкм 7–13 мкм (в зависимости от типа примененного тепловизора)

Температурная чувствительность	0,02–0,06°C (в зависимости от типа примененного тепловизора)	0,02–0,06°C (в зависимости от типа примененного тепловизора)	0,02–0,06°C (в зависимости от типа примененного тепловизора)
Алгоритмы обработки ИК изображений 	Фильтрация Полиномиальная аппроксимация Определение уноса материала Бинарная карта дефектов Фурье-анализ Вейвлет-анализ Анализ главных компонент	Фильтрация Полиномиальная аппроксимация Определение уноса материала Бинарная карта дефектов	Фильтрация Определение уноса материала Бинарная карта дефектов
Питание	Сеть 220 В	Сеть 220 В	Сеть 220 В
Масса	5–10 кг	3 кг	10–15 кг с системой сканирования
Цена 	До 80 тыс. долларов США	> 100 тысяч долларов США	> 100 тысяч. долларов США

* Коммерческая система, ориентированная на военную и авиакосмическую технику

** Изготавливалась в ограниченном объеме для энергетики

*** Данный параметр привязан к контролю тонких алюминиевых листов; испытания стальных изделий толщиной более 2 мм невозможны

**** Данная плотность мощности достижима только в узкой полосе нагрева. Нагрев большой зоны невозможен.



Параметр превосходит аналоги

Основной вывод из сравнения разработанной системы ИТКСС с мировыми аналогами состоит в том, что по базовым техническим характеристикам данная система соответствует аналогам, а по ряду показателей, таких как гибкость применения, алгоритмы обработки ИК изображений и цена, превосходит аналоги.

3.6 Выводы по Главе 3

- Выполнено теоретическое трехмерное моделирование задач ТК коррозии с помощью модифицированной программы ThermoCalc-3D.
- Разработан подход к определению предельных возможностей ТК коррозии на основе сравнения расчетных данных и экспериментальных значений шумового контраста C_n , который характеризует любой контролируемый материал. Например, при

реалистическом значении $C_n \sim 5\%$ в стали толщиной 1 мм возможно обнаружение уноса материала до 3%, а в стали толщиной 10 мм предельная обнаруживаемая коррозия составляет около 9%.

- Выполнен сравнительный анализ одномерного и трехмерного алгоритмов при экспериментальной оценке коррозионного уноса материала.
- Разработан управляемый оптический источник нагрева на галогеновых лампах мощностью 12 кВт с перекрытием потока излучения специальной шторкой для устранения отраженного излучения.
- Выполнены экспериментальные исследования на стальных изделиях марок Ст10, С234Т и Ст45 толщиной от 1 до 10 мм, а также на цилиндрических контейнерах толщиной 1 и 2 мм с использованием различного типа оптических нагревателей и конвективных нагревателей. Проведен анализ эффективности источников тепловой стимуляции на выявляемость дефектов в виде скрытой коррозии по критерию отношения сигнал/шум. Установлено преимущество галогенового нагревателя мощностью в 30кВт и конвективным нагревателем мощностью в 4 кВт.
- Проведен анализ маркетинговых аспектов ТК коррозии контейнеров, используемых для хранения радиоактивных отходов. Проведено сравнение параметров разработанного в НИ ТПУ ИТСКК с известными мировыми аналогами.

Глава 4. Метод и аппаратура ТК скрытых дефектов в углепластиковых композитах

4.1. Экспериментальные процедуры ТК (на примере цилиндрических изделий из углепластика)

4.1.1. Базовые процедуры ТК цилиндрических изделий

При использовании оптического нагрева возможны 6 вариантов контроля в зависимости от взаимного расположения нагревателя и устройства регистрации температуры и формы зоны нагрева; кроме того, возможна ультразвуковая и индукционная стимуляция объектов контроля (последний тип тепловой стимуляции в настоящей работе не рассмотрен).

4.1.2 Расчет параметров сканирования

ОК-СН-ТН – односторонний контроль, сканирующий нагрев, точечный нагреватель

В данной процедуре оптимизации подлежат скорость вращения и скорость линейного перемещения цилиндра, время задержки и размер пятна сканирования. Пусть n - число оборотов в секунду и $\tau_{rev} = 1/n$ - время одного оборота. Линейная скорость вращения $V_{rev} = \pi D / \tau_{rev}$. Если H - ширина окна полосового нагревателя, то время нагрева $\tau_h = H / V_{rev}$.

Введем размер элемента $\Delta l \times \Delta l$, тогда скорость линейного перемещения цилиндра для плотной укладки «спирали» сканирования должна быть $V = \Delta l / \Delta \tau_{rev} = n \Delta l$.

Если задано время оптимальной задержки τ_{del} для регистрации либо дифференциального температурного сигнала ΔT , либо контраста C , то расстояние между краем нагревателя и зоной регистрации будет $L = V_{rev} \tau_{del}$.

Пример. В конкретном эксперименте: $\tau_{rev} = 30$ с и $D = 155$ мм, следовательно, $V_{rev} = 16,23$ мм/с (длина окружности 487 мм). Время нагрева при ширине окна нагрева $H = 30$ мм равно $\tau_h = 1,84$ с. Если пятно сканирования $\Delta l = 5$ мм, то потребуется линейная скорость перемещения цилиндра $v = 5/30 = 0,166$ мм/с. При времени задержки $\tau_{del} = 15$ с расстояние от нагревателя до зоны сканирования должно быть равно $L = 16,23 \cdot 15 = 243,5$ мм, или примерно половине окружности цилиндра.

ДК-СН-ПН – двухсторонний контроль, сканирующий нагрев, полосовой нагреватель

Для данной процедуры введем размер элемента (строки сканирования) Δl , тогда время прохождения одной строки сканирования в поле зрения тепловизора будет $\Delta \tau = \Delta l / V_{rev}$. Таким образом, интервал записи между двумя последовательными кадрами должен быть выбран равным $\Delta \tau_{rec} = \Delta \tau$ для того, чтобы осуществить плотную укладку строк синтезированного изображения. Заметим, что если $\Delta \tau_{rec} > \Delta \tau$, то будет происходить пропуск части поверхности объекта контроля, а если $\Delta \tau_{rec} < \Delta \tau$, то строки будут частично накладываться друг на друга, т.е. точки поверхности объекта будут сканироваться более, чем однократно.

Пример. В конкретном эксперименте: $\tau_{rev} = 30$ с и $D = 155$ мм, следовательно, $V_{rev} = 16,23$ мм/с (длина окружности 487 мм). Время нагрева при ширине окна нагрева $H = 15$ мм равно $\tau_h = 0,92$ с. Ширину строки сканирования определим из термограммы изделия (Рисунок 4.1): $\Delta l = 0,756$ мм, тогда интервал записи будет равен $\Delta \tau_{rec} = 0,756 / 16,23 = 0,0466$ с (частота записи 21,5 Гц). В эксперименте следует выбрать $\Delta \tau_{rec} = 0,05$ с (частота записи 20 Гц), при этом тепловизор нужно размещать на таком расстоянии от объекта контроля, чтобы диаметр цилиндра соответствовал 220 пикселям, т.е. на 7 % больше, чем это показано на Рисунке 4.1. Всего должно быть записано не менее $30 \text{ с} / 0,05 \text{ с} = 600$ изображений (фактически, чуть больше с учетом включения нагревателя и начала вращения).

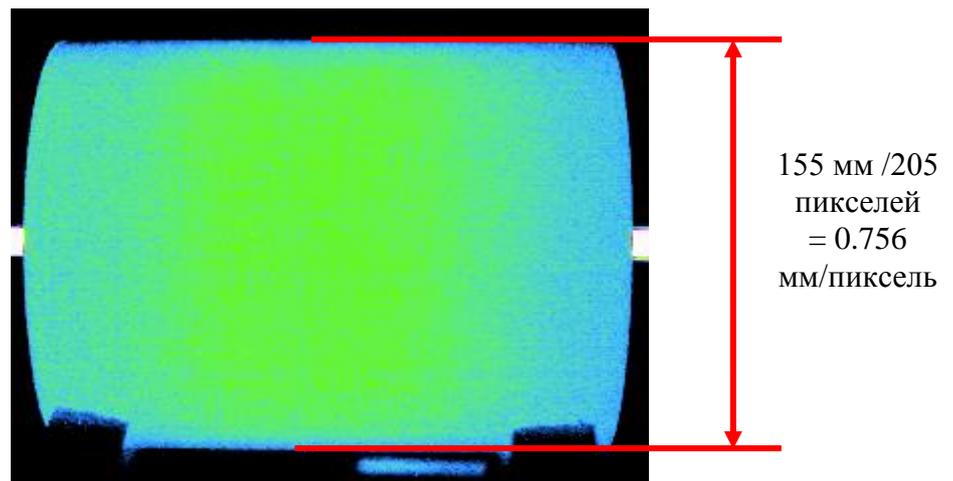


Рисунок 4.1 – Термограмма цилиндрического изделия и расчет размера пикселя

4.2. Оптимизация процедуры обработки динамических ИК термограмм (статистический подход)

В настоящем параграфе изложен подход к сравнительной оценке и оптимизации процедур активного ТК, принятый в Лаборатории теплового контроля ТПУ и описанный как в работах автора, так и других сотрудников лаборатории [28, 36, 44, 92-107].

Ниже рассмотрены экспериментально определенные параметры тепловых шумов на примере композиционных материалов, а также приведены результаты сравнительного анализа различных алгоритмов обработки экспериментальных результатов с использованием отношения сигнал/шум в качестве критерия оптимизации.

4.2.1 Внешний аддитивный шум, создаваемый отраженным излучением

Помехи окружающей среды создаются тепловыми потоками от окружающих предметов, либо отраженными от объекта контроля, либо непосредственно попадающими во входной зрачок тепловизора. Источниками этих помех являются нагреватели, Солнце, калориферы, лампы электрического освещения и т.п. Прямое излучение устраняют, используя бленды, экраны, фильтры и т.п. Труднее устраняется излучение, отраженное от объекта контроля. В активном ТК основным источником внешнего шума является сам нагреватель. Например, при оптическом нагреве металлов остаточное излучение ламп может серьезно исказить вид термограмм и приводить к некорректным оценкам параметров дефектов, если используются чисто температурные модели тепловой дефектометрии. Если коэффициент излучения изделия невелик, а «черные» покрытия применить невозможно, рекомендуется оценить вклад отраженного излучения и произвести корректировку пиксельных функций изменения температуры во времени перед применением алгоритмов идентификации. В современных тепловизорах соответствующая процедура называется введением поправки на «отраженную (reflected) температуру фона».

Иными словами, в активном ТК на уровень отраженного излучения основное влияние оказывает мощность источника нагрева и коэффициент отражения $\rho = 1 - \varepsilon$ поверхности контролируемого объекта.

Например, для углепластика величина ρ находится в пределах от 0,16 до 0,02, т.е. является относительно малой. Тем не менее, отраженное излучение в ряде описанных ниже экспериментов оказывало существенное влияние на профили температуры. При использовании импульсных ксеноновых ламп после окончания основного импульса

нагрева изделие продолжает нагреваться излучением колбы и рефлектора. Мощность этого излучения относительно мала и оно имеет место в течение нескольких секунд, поэтому его влияние заметно при ТК тонких пластин с малыми временами наблюдения температурных сигналов. При использовании галогеновых ламп, мощность остаточного излучения сопоставима с мощностью основного излучения нагрева и может существенно искажать истинные температурные сигналы. Поэтому в экспериментах обычно галогеновые лампы экранируют вручную после окончания нагрева, а практические источники нагрева должны иметь автоматические шторы.

Влияние отраженного излучения при использовании галогеновых ламп хорошо видно на температурных профилях Рисунка 4.2: перекрытие потока излучения после выключения лампы «улучшает» вид температурных профилей, делая их близкими к теоретическим.

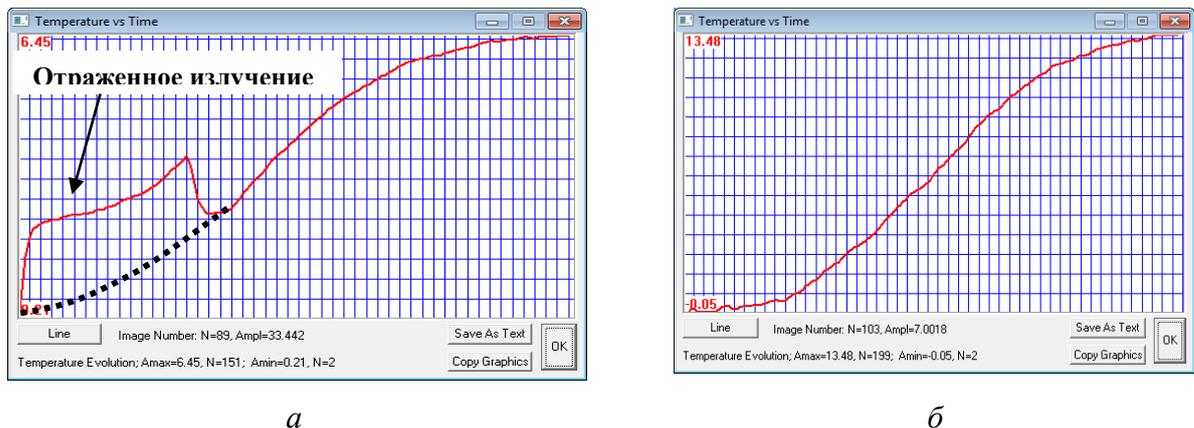


Рисунок 4.2– Влияние отраженного излучения на профили температуры при двухстороннем ТК углепластика:

- a* – нагрев галогенной лампой 1000 Вт в течение 5 с, углепластик толщиной 4,1 мм;
- б* – боковое излучение ламп экранировано по отношению к объекту контроля

4.2.2 Мультипликативный структурный шум, обусловленный поверхностью изделия

В наибольшей степени результаты ТК зависят от уровня структурных шумов, создаваемых объектом контроля. Эти шумы возникают вследствие как поверхностных, так и объемных флуктуаций физических свойств материалов. Наибольшие неприятности в процедурах пассивного и активного ТК доставляют поверхностные флуктуации излучательно-поглощательных свойств объекта контроля, которые могут изменяться в пространстве, времени и по спектру длин волн. Амплитуду шума можно выразить в

температуре, однако более предпочтительны относительные единицы, которые в меньшей степени зависят от мощности нагрева.

Типовой подход к оценке шумов состоит в оценке стандартного отклонения динамического температурного сигнала в бездефектных зонах $\sigma_n(\tau)$ и текущего контраста шума $C_n^{r_{mn}}$. Для строго мультипликативной помехи, определяемой только источником нагрева, шумовой контраст не должен изменяться во времени. На практике, в силу действия различных факторов, в том числе, влияния аддитивных шумов, контраст шума изменяется во времени при нагреве/охлаждении изделия. Тем не менее, во многих случаях относительный шум поверхности можно считать постоянным во времени и выражать его в терминах контраста шума $C_n^{r_{mn}} = \sigma_n(\tau)/T(\tau)$, усредненного по времени и пространству. Тогда величина $C_n^{r_{mn}}$ будет характеризовать конкретный материал и ограничивать выявление скрытых дефектов, создающих «полезный» температурный контраст $C^{r_{mn}} = \Delta T(\tau)/T(\tau)$.

Примеры изменения шумового контраста во времени для односторонней процедуры ТК образцов из углепластика показаны на Рисунке 4.3. Видно, что непосредственно после окончания нагрева шум составляет около 1% (0,01) и возрастает до 10% по мере охлаждения образца вследствие снижения избыточной температуры. В двухсторонней процедуре контраст шума велик в начальный момент, когда избыточная температура поверхности близка к нулю, однако в момент оптимального контроля он равен 7–8%.

Заметим, что по нашему опыту, например, в углепластике производства Индии шумовые контрасты составляли 0,02–0,04. Обнаруженные различия для композитов от различных производителей обусловлены различиями в технологии производства материалов.

На Рисунке 4.4 показано изменение во времени отношения сигнал/шум для одного из углепластиковых образцов, что позволяет по максимуму этого отношения выбирать оптимальное время наблюдения (заметим, что для двухстороннего контроля отношение сигнал/шум является условно-отрицательным, потому что отрицательны дифференциальные температурные сигналы).

При оптимизации ТК конкретного изделия рекомендуется анализировать изменение во времени отношения сигнал/шум $S(\tau) = \Delta T(\tau)/\sigma_n(\tau) = C(\tau)/C_n(\tau)$, а не отдельных параметров $\Delta T(\tau)$, $C(\tau)$, $\sigma_n(\tau)$, $C_n(\tau)$. Момент времени, когда наступает максимальное значение S , и является оптимальным моментом для проведения ТК.

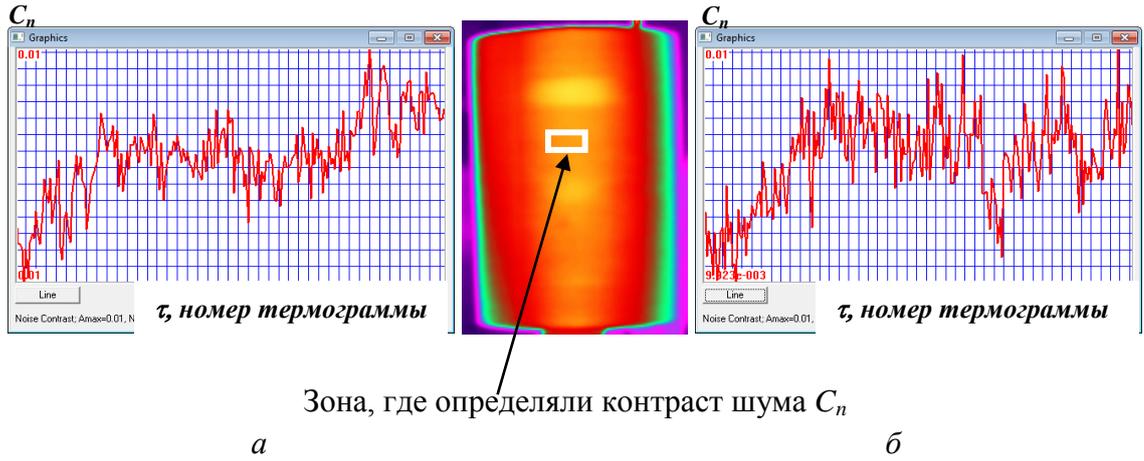
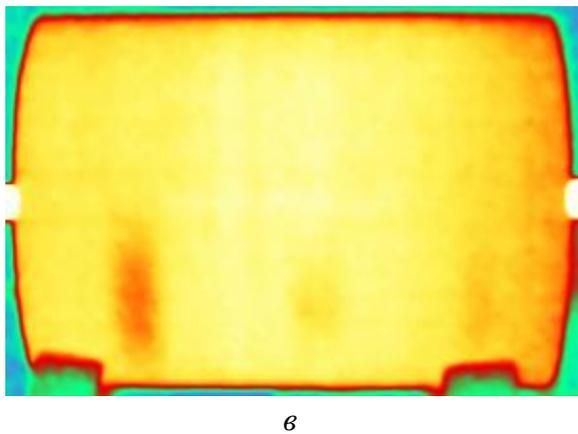
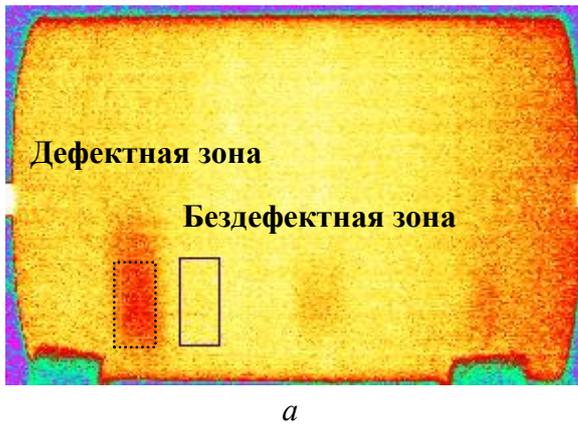
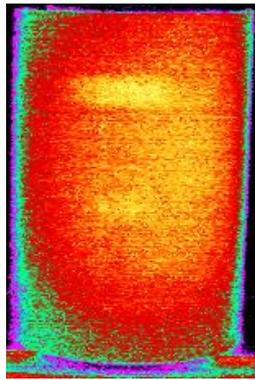


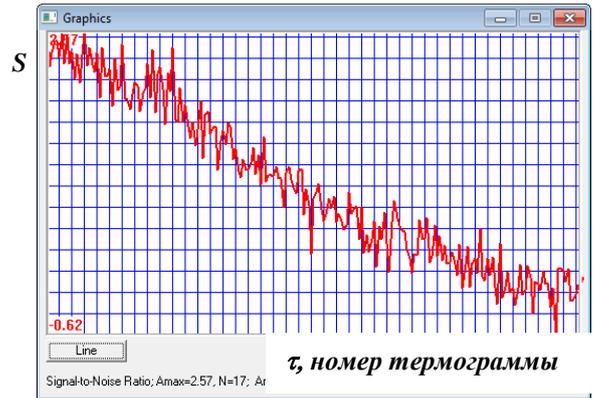
Рисунок 4.3 – Изменение контраста шума во времени на стадии охлаждения углепластиковых цилиндров (нагрев в течение 7 с источником на галогенных лампах мощностью 30 кВт):

- a* – образец Ц1;
- б* – образец Ц2





д



е

Рисунок 4.4 – Изменение отношения сигнал/шум во времени для цилиндрического образца из углепластика:

a – двухсторонняя процедура, нагрев изнутри цилиндрической лампой мощностью 2000 Вт, максимальное отношение сигнал/шум $S = -5,77$ наступает в термограмме №112 (исходные данные);

б – изменение S во времени для данных *a*;

в – двухсторонняя процедура, нагрев изнутри цилиндрической лампой мощностью 2000 Вт, максимальное отношение сигнал/шум $S = -23,09$ наступает в термограмме №118 (после пространственной и временной фильтрации); соответствующее время задержки 11,8 с;

г – изменение S во времени для данных *в*;

д – односторонняя процедура, нагрев снаружи двумя галогенными лампами, максимальное отношение сигнал/шум $S = 2,57$ наступает в термограмме №17 (исходные данные);

е – изменение S во времени для данных *д*

4.2.3 Статистическая оценка эффективности алгоритмов обработки данных

Эффективность алгоритмов обработки данных (и процедур ТК) определяют, анализируя амплитудно-временные характеристики отдельных пикселей, а также используя эвристическое восприятие ИК термограмм операторами.

Автоматические устройства имеют дело с температурой, фазой и другими параметрами сигналов, вызванных дефектами. Результатом является бинарная карта дефектов, получаемая с помощью задаваемого порога U_{thr} . При нормально-распределенных сигналах в теории статистических решений используют следующие выражения для вероятности правильного обнаружения $P_{c.d.}$ и ложной тревоги $P_{f.a.}$ (4.1):

$$\begin{aligned}
 P_{c.d.} &= 1 - \Phi \left(Z = \frac{\bar{U}_d - U_{thr.}}{\sigma_{nd}} \right); \\
 P_{f.a.} &= \Phi \left(Z = \frac{U_{thr.} - \bar{U}_{nd}}{\sigma_{nd}} \right),
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где $\Phi(Z) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_Z^{\infty} e^{-x^2/2} dx$ - табулированный интеграл Лапласа, \bar{U}_d, \bar{U}_{nd} - средние значения сигналов, σ_{nd} - стандартное отклонение сигнала в бездефектной области.

Например, для получения $P_{f.a.} = 5\%$ следует установить порог на уровне $\bar{U}_{nd} + 1,6\sigma_{nd}$.

Как уже отмечалось выше, оптимизацию процедур ТК и алгоритмов обработки данных проводят с использованием отношения сигнал/шум, см. формулу (2.1).

На практике можно обрабатывать не отдельные пиксели, а оценивать температурные «паттерны» в целом. Для этого, например, используют критерий Танимото (4.3) [107]:

$$TC = \frac{N_{r.d.} - N_{m.d.}}{N_{r.d.} + N_{f.d.}},
 \tag{4.3}$$

где $N_{r.d.}, N_{m.d.}, N_{f.d.}$ - число истинных, пропущенных и ложных дефектов, обнаруженных в анализируемом изображении. Интересной особенностью критерия Танимото является то, что он комбинирует пропущенные и ложные дефекты. Заметим, что TC равен 100% только если $P_{c.d.} = 100\%$ и $P_{f.a.} = 0$. В качестве дополнительного критерия сравнения мы также использовали вероятность правильного обнаружения $P_{c.d.}$ и вероятность ложной тревоги $P_{f.a.}$, рассчитываемые по гистограмме выбранных информативных критериев путем размещения порога принятия решения; в частности, согласно стратегии Неймана-Пирсона значение $P_{c.d.}$ определяется для фиксированного значения $P_{f.a.}$, что позволяет строить бинарные карты дефектов (см. [107]).

4.2.4 Сравнение эффективности алгоритмов обработки данных

С помощью программы ThermoFit Pro рассчитаны отношения сигнал/шум S для расслоения в цилиндрическом изделии из углепластикового композита (Таблице 4.1). Видно, что максимальные значения достигаются при использовании метода анализа главных компонент (АГК), в частности, в 3-й компоненте. «Сшитые» изображения данного изделия, приведенные в параграфе 4.5, были получены именно с использованием 3-й компоненты.

Таблица 4.1 – Отношение сигнал/шум для дефекта в изделии из углепластика

Изображение	Отношение сигнал/шум S
Фурье-фазограмма (2-я частота)	2,26
Фурье-фазограмма (3-я частота)	1,60
Вейвлет-фазограмма (функция Морле, сдвиг 10, масштаб 100)	4,43
Вейвлет-фазограмма (функция Морле, сдвиг 10, масштаб 50)	3,20
АГК (2-я компонента)	5,00
АГК (3-я компонента)	6,20
Исходная термограмма при через 1,1 с после окончания нагрева	2,10

4.3 Аппаратура ТК композитов

Для выполнения исследований по контролю композиционных материалов и изделий использовалась описанная в Главе 3 экспериментальная аппаратура теплового контроля, базовыми элементами которой являются ИК тепловизор, источники нагрева различного типа, компьютер типа «лэп-топ» и пакет оригинальных компьютерных программ для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных.

4.3.1 Система ТК цилиндрических изделий

Общая схема лабораторной системы применительно к ТК цилиндрических изделий (композиционных и металлических) приведена на Рисунке 4.5.

Цилиндрический объект контроля размещается горизонтально (возможно вертикальное исполнение). Горизонтальное расположение цилиндра предпочтительно для оптимального использования угла зрения тепловизора, который в обычном положении прибора вытянут в горизонтальном направлении. Зона однократного контроля определяется размерами зоны нагрева, которая, в свою очередь, зависит от используемого нагревателя. В качестве основных источников нагрева использован трубчатый резистивный нагреватель мощностью 2 кВт (Рисунок 3.14*в*) или специализированный источник нагрева на галогеновых лампах общей мощностью 2×6 кВт (Рисунок 3.13*г*). В качестве альтернативных источников нагрева использованы промышленные фены (Рисунок 3.13*е*) по 2 кВт каждый. Расстояние от нагревателей до объекта контроля составляет около 0,4 м, и может быть увеличено при обеспечении надлежащей мощности облучения, которая в

терминах поглощенной изделием плотности мощности во многих случаях составляет около 10 кВт/м^2 . Типичное время нагрева составляет 5-20 секунд в зависимости от мощности применяемых ламп и расстояния до объекта контроля. Ключевым моментом применения как галогенных ламп, так и фенов, является применение непрозрачных шторок для быстрого перекрытия потока излучения после поступления соответствующего управляющего сигнала из блока управления.

При контроле цилиндрических изделий тепловизором одновременно просматривается фактически половина цилиндра, однако наилучшие результаты получаются при анализе $1/6$ или $1/8$ круговой поверхности цилиндра. Иными словами, требуется 6 – 8 ракурсов для контроля всей поверхности цилиндра.

Система ТК цилиндрических изделий при типичной процедуре работает следующим образом. Тепловизор 1 записывает термограмму объекта контроля 2 при температуре окружающей среды, затем по сигналу компьютера 3 блок управления 4 запускает нагреватели 5 (например, на 10 с), причем непрерывная цифровая запись термограмм осуществляется на компьютер 3 и продолжается как в ходе нагрева, так и в процессе охлаждения (дополнительные 20 с). Таким образом, полное время записи может достигать 30 секунд и более. При стандартной частоте записи 10 Гц последовательность будет содержать несколько сотен термограмм для каждого ракурса съемки. Далее происходит обработка записанной последовательности, включая пространственную и временную фильтрацию (возможно, усреднение) и выбранный оптимальный алгоритм обработки данных.

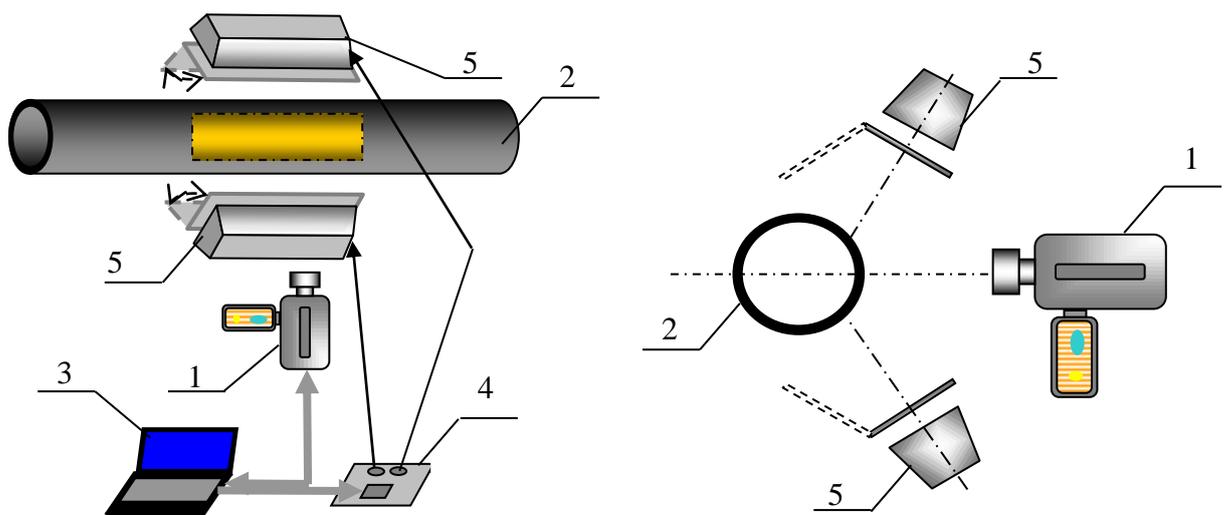


Рисунок 4.5 – Схема система активного одностороннего ТК цилиндрических изделий (углепластиковых цилиндров, стальных контейнеров и т.п.)

Как следует из настоящих (и более ранних) диссертационных исследований, параметры тепловизора не являются критическими для обеспечения требуемых показателей ТК. В настоящее время на рынке имеется значительное число моделей тепловизоров, которые могут быть использованы в подобной процедуре контроля, в частности, в 2015 г. система ТК цилиндрических изделий переведена на использование тепловизионного модуля FLIR A300S.

Результат обработки выводится на экран монитора и записывается в память компьютера как в виде обработанного по одному из алгоритмов изображения, так и в виде бинарной карты дефектов.

После проведения съемки изделия со всех (6-ти) ракурсов, с помощью компьютерной программы синтезируют развертку цилиндра выбранной длины. Операции контроля повторяют при переходе к новому участку трубы.

Применительно к ТК углепластиковых цилиндров, производительность контроля (в расчете на погонный метр трубы) равна: $0,3 \text{ м (или } 0,5 \text{ м)}/N \times (t_{\text{подг}} + t_{\text{контр}} + t_{\text{обр}})$, где N – число ракурсов съемки (6); $t_{\text{подг}}$ – время подготовки образца и перехода к следующему ракурсу съемки (оценено на уровне 5 минут при отсутствии полной автоматизации); $t_{\text{контр}}$ – время контроля (составляет около 30 с, и им можно пренебречь); $t_{\text{обр}}$ – время обработки данных при съемке с одного ракурса (оценено на уровне 2 минут) и, таким образом, составит приблизительно 0,007 м/мин, или 0,42 м/час. (при «длине нагрева» 0,3 м) и 0,012 м/мин, или 0,7 м/час, (при «длине» нагрева 0,5 м).

Спецификация системы ТК цилиндрических изделий:

- Длина одновременно контролируемого участка трубы: 0,3 – 0,5 м.
- Производительность 0,007 м/мин, или 0,42 м/час. (при «длине нагрева» 0,3 м) и 0,012 м/мин, или 0,7 м/час, (при «длине» нагрева 0,5 м).
- Расстояние до объекта контроля: 0,3 – 0,5 м.
- Поперечные размеры выявляемых дефектов: более 10x10 мм (возможно обнаружение дефектов меньшего размера, но при уменьшении глубины обнаружения).
- Толщина дефектов (по воздушному эквиваленту): 50 – 200 мкм.
- Глубина обнаружения дефектов: до 3 – 4 мм при одностороннем контроле труб толщиной 5 мм для указанных выше поперечных размеров и толщины дефектов.
- Тип источника нагрева: 2 излучателя на трубчатых галогенных лампах длиной 0,3 или 0,5 м; мощность каждого излучателя 5 – 6 кВт, или 2 излучателя на базе промышленных фенів (мощность каждого излучателя 2 кВт).

- Требования к тепловизору, или тепловизионному модулю: спектральный диапазон 7-13 мкм; диапазон измеряемых температур от -20 до +120 °С; температурная чувствительность не ниже 0,1 °С; формат изображения не ниже 320x240; частота цифровой записи не менее 10 Гц; угол поля зрения от 15 до 25 угловых градусов.
- Требования к блоку управления: должен включать интерфейс устройства управления мощными нагревателями.
- Требования к программе управления: обеспечение протокола синхронной работы источников нагрева, шторок нагревателей и цифровой записи термограмм в память компьютера типа «лэп-топ».
- Требования к программе обработки данных: пространственная и временная фильтрация, усреднение, реализованный метод анализа главных компонент (АГК), вывод промежуточных и окончательных результатов обработки в режиме оф-лайн, дружественные пользователю интерфейсы.

4.3.2 Портативная дефектоскопическая установка широкого применения

Прототип теплового дефектоскопа широкого применения (Рисунок 4.6) был разработан для проведения диагностики углепластиковых панелей современных гражданских и военных самолетов в условиях ангаров и самолетных стоянок аэропортов. Основными дефектами, возникающими в процессе эксплуатации воздушных судов, являются ударные повреждения, возникшие в результате града, удара птиц, упавших инструментов обслуживающего персонала, а также вода, проникающая или конденсирующаяся в сотовых панелях. Основными элементами теплового дефектоскопа являются: регистратор инфракрасного излучения - тепловизор, источник тепловой стимуляции оптического типа и компьютер.



Рисунок 4.6 – Прототип теплового дефектоскопа широкого применения

Данная система ТК обладает достаточно гибкой архитектурой и позволяет использовать как источники нагрева, так и ИК тепловизоры, различного типа, а при наличии специального программного обеспечения может быть использована в качестве теплового дефектоскопа-томографа. Технические характеристики основных блоков устройства приведены в Таблице 4.2 (томографический вариант установки разработан в рамках мегагранта ТПУ ВИУ_66_2014 при участии В.П. Вавилова, Д.А. Нестерука, В.В. Ширяева, S. Billard и диссертанта).

Таблица 4.2 – Технические характеристики теплового дефектоскопа-томографа

Объекты контроля	
Конструкции	Панели различного радиуса кривизны, цилиндрические и конические изделия
Материалы	Стекло-, угле-, органо- и боропластик, углерод-углеродные и сотовые структуры с металлическими и бумажными ячейками
Толщина материала	0-10 мм *
Площадь зоны одновременного контроля	0,05-0,15 м ²
Производительность испытаний	до 4,5 м ² /час
Минимальные обнаруживаемые дефекты (расслоения)*: по поперечным размерам по толщине по глубине залегания	более 5x5 мм более 50 мкм до 3-6 мм (односторонняя процедура) и до 10 мм (двухсторонняя процедура)
Типы и мощность источников нагрева	Ксеноновые импульсные лампы (3,2 кДж) Галогеновые лампы (1-30 кВт) Светодиоды (до 800 Вт) Конвектор (до 3 кВт) УЗ стимулятор (до 2,5 кВт)
Длительность нагрева	5 мс (ксеноновые лампы) до 20 с (галогеновые лампы, светодиоды, конвекторы и УЗ стимулятор)

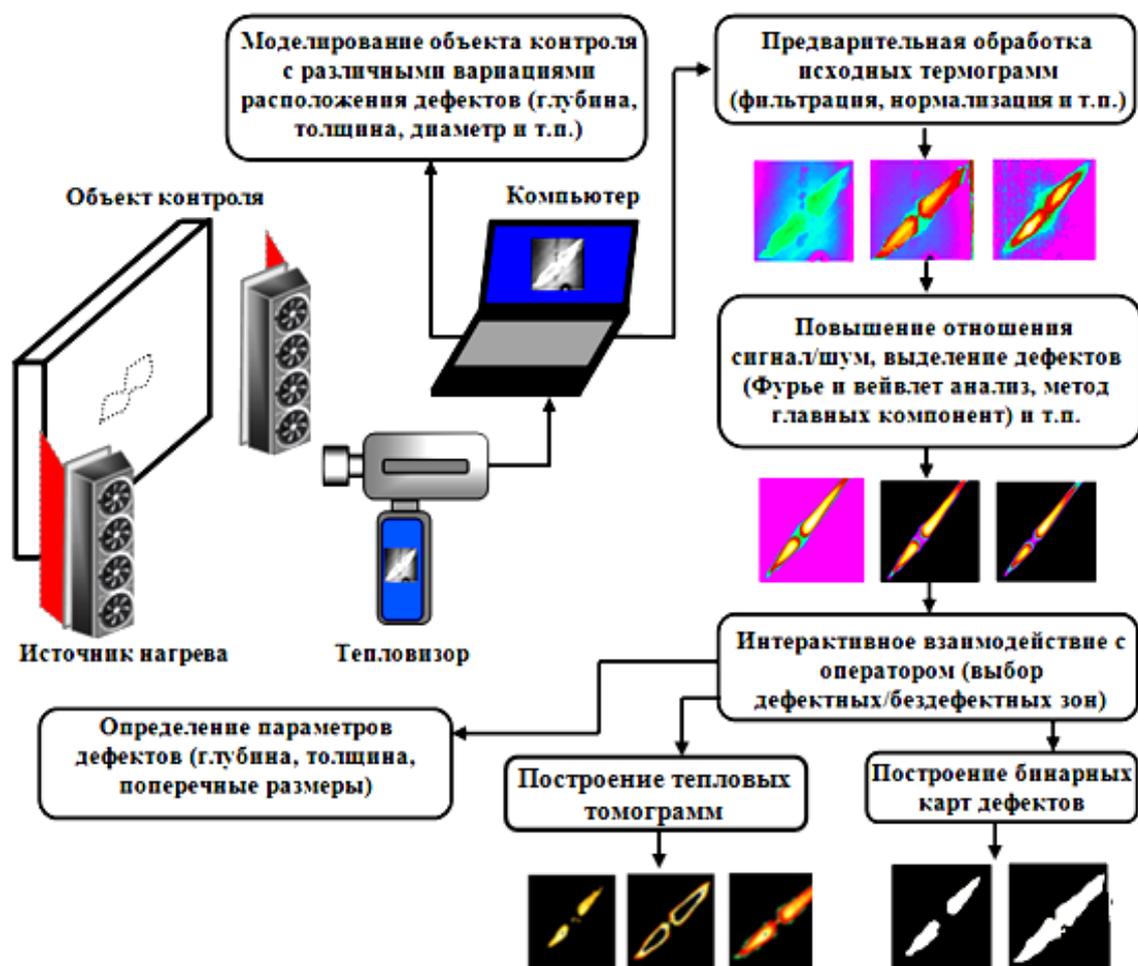
Типы ИК тепловизоров**	NEC Avio TH-9100 ThermaCAM P65 FLIR SC 7700M FLIR A 300 S
Спектральный диапазон	7–13 мкм и 8–10 мкм***
Температурная чувствительность	0,02–0,06°С ***
Формат термограмм	320×240 и 640×512 ***
Частота цифровой записи	0,1-113 Гц (полноформатная термограмма)***
Число термограмм в последовательности	3-2000
Число разрешаемых томографических слоев*	3-5
Алгоритмы обработки ИК изображений	Фильтрация Усреднение Нормализация Полиномиальная аппроксимация Определение уноса материала 1D дефектометрия 3D дефектометрия Статистический анализ и бинарная карта дефектов Корреляционный анализ Анализ производных по времени (включая анализ в логарифмических координатах) Фурье-анализ Вейвлет-анализ Анализ главных компонент Тепловая томография
Масса	5–10 кг (в зависимости от типа источника нагрева и тепловизора)
Питание	Сеть 220 В

* Усредненные значения (данные параметры подлежат определению в конкретных задачах контроля).

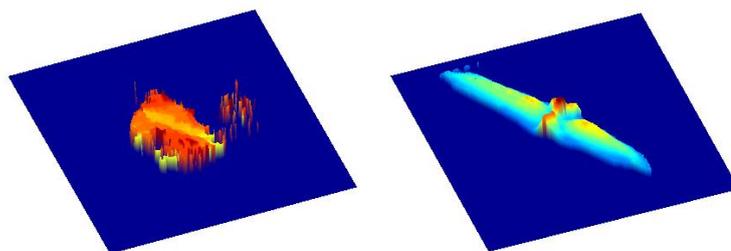
** См. паспортные характеристики ИК тепловизоров.

*** В зависимости от типа тепловизора

Для вышеприведенного аппарата разработана методика проведения активного ТК композиционных и металлических материалов и изделий (алгоритм на Рисунке 4.7), которая базируется на использовании ИК тепловизора, источника нагрева различного типа, компьютера типа «лэп-топ» и пакета оригинальных компьютерных программ для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных методами корреляционного анализа, Фурье- и вейвлет-преобразования и анализа главных компонент (в разработке компьютерных программ принимали участие сотрудники НИ ТПУ В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев).



а



б

Рисунок 4.7 – Алгоритм проведения активного ТК металлических и композиционных материалов (а) и результаты теплового томографического контроля ударного повреждения с энергией около 60 Дж на внешней (слева) и внутренней (справа) стороне панели из углепластика (б)

4.4 Объекты контроля

4.4.1 Цилиндрические образцы из углепластика

В диссертации приведены экспериментальные результаты по ТК дефектов и бесконтактному определению ТФХ в углепластиковых образцах цилиндрической формы (Рисунок 4.8) производства ООО «ННКЦ», г. Новоуральск. Дефекты, содержащиеся в изделиях, получены путем закладки фторопластовой пленки на различной глубине в процессе изготовления изделий. Следует отметить, что данные образцы характеризуются явно выраженной анизотропией. Толщина цилиндрических изделий 1 и 2 (Ц1 и Ц2) равна 5,4 мм, диаметр 146 мм.



Изделие №1 (Ц1) с 9-ю дефектами, 3 из которых расположены на глубине 1,64мм, 3 на глубине 4,0 мм и 3 дефекта на глубине 4,7 мм



Изделие №2 (Ц2) с 9-ю дефектами, 3 из которых расположены на глубине 1,64мм, 3 на глубине 4,0 мм и 3 дефекта на глубине 4,7 мм

Рисунок 4.8 – Цилиндрические изделия из углепластика

4.5 Экспериментальные результаты по ТК дефектов в углепластике

4.5.1 Контроль цилиндрических изделий: процедура ОК-РН-РН (односторонний контроль, равномерный нагрев)

Объект контроля размещали вертикально. Две галогеновые лампы мощностью 1 кВт каждая (Рисунок 3.13а) располагали вертикально и параллельно образующей цилиндра. Нагрев производили в течение 10 с. Результат эксперимента показан на Рисунке 4.9 в виде

4-х исходных термограмм (Рисунок 4.9а), полученных при последовательном повороте цилиндра на 90° , а также в результате применения метода анализа главных компонент (Рисунок 4.9б). Видно, что основной проблемой является отраженное излучение трубчатых галогенных ламп, которое имеет место и после выключения ламп (остаточное излучение ламп). Механическое перекрытие потока излучения ламп вручную существенно улучшало вид термограмм, однако и в этом случае обнаруживаются только дефекты, расположенные на глубине 1,64 мм, если вести отсчет от внешней нагреваемой поверхности.

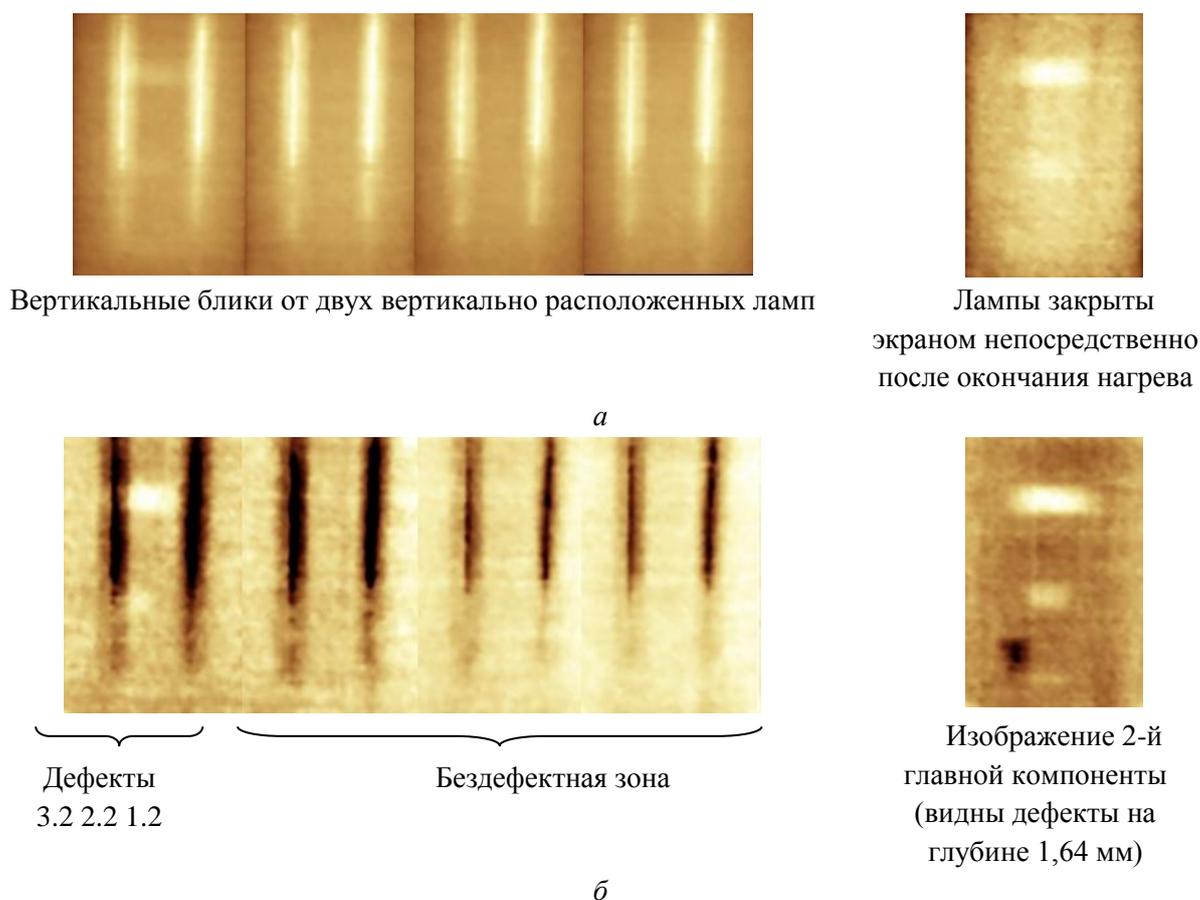


Рисунок 4.9 – Процедура ОК-РН-РН : односторонний ТК изделия Ц2 при нагреве двумя галогенными лампами мощностью 1 кВт каждая (лампы расположены вдоль образующей цилиндра, длительность нагрева 10 с:

a – «сшитые» экспериментальные изображения из 4-х изображений;

б – «сшитые» изображения 2-й главной компоненты

Расположение ламп поперек образующей цилиндра не изменило результатов контроля (Рисунок 4.10).

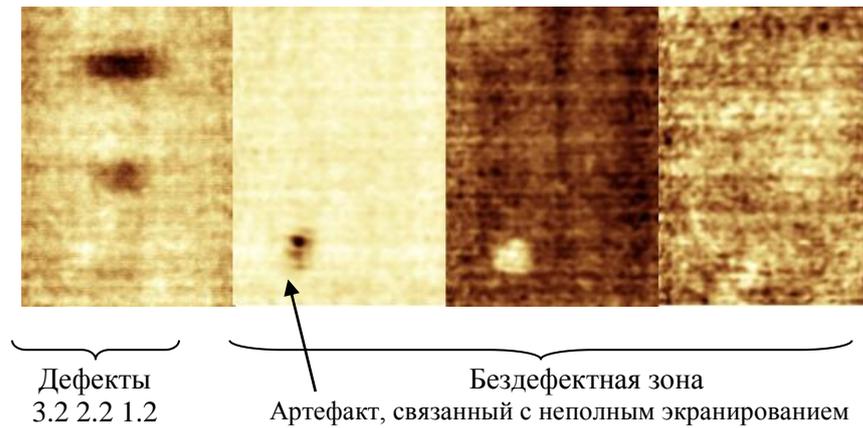


Рисунок 4.10 – Процедура ОК-РН-РН : односторонний ТК изделия Ц2 при нагреве двумя галогеновыми лампами мощностью 1 кВт каждая. Лампы расположены поперек образующей цилиндра, длительность нагрева 10 с; после окончания нагрева лампы экранированы. «Сшитые» изображения 2-й главной компоненты

Основываясь на опыт предыдущих экспериментов, можно сказать, что одним из лучших алгоритмов обработки ИК изображений в ТК является АГК. Для сравнения на Рисунке 4.11 приведены результаты обработки данных Рисунка 4.10 с помощью других алгоритмов и цветовых палитр: Фурье-анализа, корреляционного анализа, комплексного вейвлет-анализа (в последнем случае выбрано 2 различных сочетания характерных параметров вейвлет-анализа: сдвига Shift и масштаба Scale; использована программа ThermoFit Pro). Видно, что эффективное обнаружение, по крайней мере, двух дефектов на глубине 1,64 мм обеспечивает комплексный вейвлет-анализ.

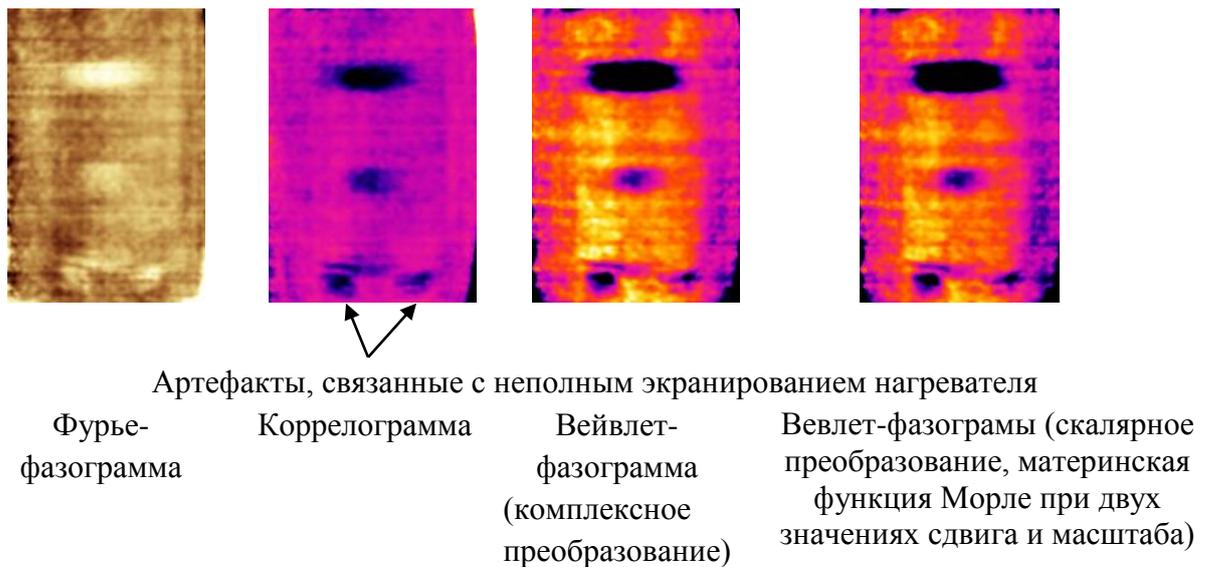


Рисунок 4.11 – Процедура ОК-РН-РН : односторонний ТК изделия Ц2 при нагреве двумя галогенными лампами мощностью 1 кВт каждая (лампы расположены вдоль образующей цилиндра, длительность нагрева 20 с; различные алгоритмы обработки данных)

При использовании мощного источника оптического нагрева, включающего 6 галогенных ламп мощностью 5 кВт каждая (Рисунок 3.12в) процедура ТК была следующей: образец размещали в 40 см от плоскости источника в течение 7 с, после чего образец поворачивали на 90° и фиксировали последовательность ИК термограмм в течение 20 секунд с частотой 10 Гц. Результаты обрабатывали методом АГК. Полная «сшивка» развертки образцов Ц1 и Ц2 из 8-ми отдельных изображений приведена на Рисунке 4.12. «Сшитые» изображения соответствуют 3-й главной компоненте.

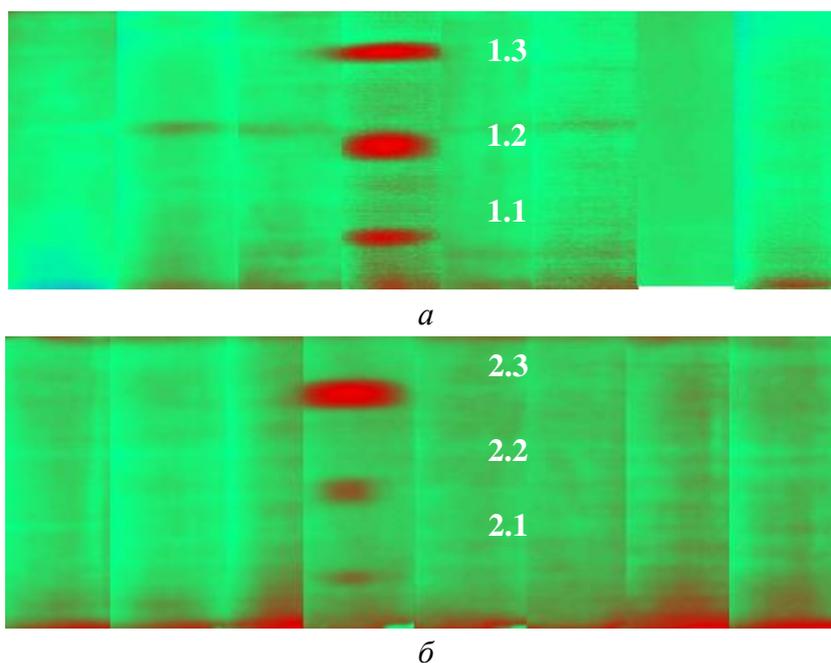


Рисунок 4.12 – Процедура ОК-РН-РН: односторонний ТК стандартных образцов Ц1(а) и Ц2 (б) при нагреве оптическим источником мощностью 30 кВт (лампы расположены перпендикулярно образующей цилиндра, длительность нагрева 7 с)

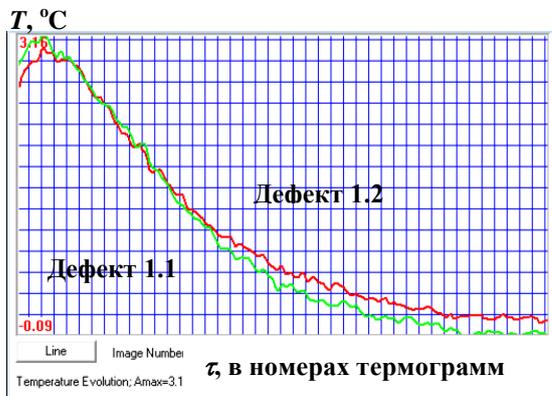
На Рисунке 4.13 для двух дефектов на глубине 1,64 мм в образцах Ц1 и Ц2 показаны характерные температурные профили, которые можно сопоставить с теоретическими данными, включая изменение во времени «бездефектной» температуры, дифференциального температурного сигнала ΔT и текущего температурного контраста C . В частности, для двух последних величин хорошо видно наличие оптимальных моментов регистрации, которые составляют 0,6–2,4 с.



Избыточная температура изделия (максимальное значение около 39°C , максимальная абсолютная температура поверхности в конце нагрева 63°C)



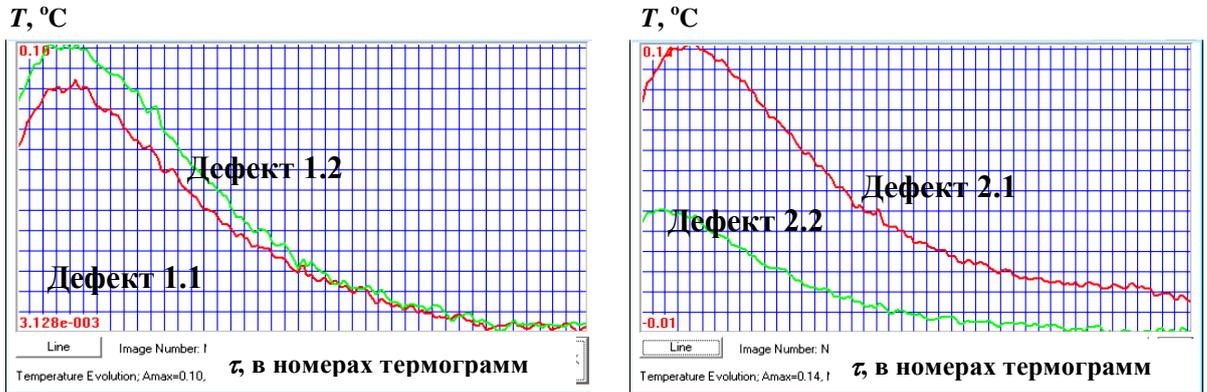
Избыточная температура изделия (максимальное значение около 36°C , максимальная абсолютная температура поверхности в конце нагрева около 58°C)



Дифференциальный температурный сигнал; максимальные значения над дефектом 3.1.1: $3,1^\circ\text{C}$ через 1,3 с, над дефектом 3.1.2: $3,2^\circ\text{C}$ через 2,0 с



Дифференциальный температурный сигнал; максимальные значения над дефектом 3.2.1: $4,06^\circ\text{C}$ через 1,6 с, над дефектом 3.1.2: $1,6^\circ\text{C}$ через 0,6 с



Температурный контраст, максимальные значения над дефектом 3.1.1: 0,09 °С через 2,4 с, над дефектом 3.1.2: 0,10 °С через 2,4 с

a

Температурный контраст, максимальные значения над дефектом 3.2.1: 0,14 °С через 2,4 с, над дефектом 3.2.2: 0,053 °С через 1,1 с

б

Рисунок 4.13 – Изменение во времени над дефектами 1.1 и 1.2 в изделии Ц1 (*a*) и над дефектами 2.1 и 2.2 в изделии Ц2 (*б*) (фаза нагрева в течение 7 с из последовательности удалена, выполнена пространственная и временная фильтрация, частота записи 10 Гц)

Термограмма на Рисунке 4.14, полученная в результате применения алгоритма АГК, показывает, что оптимальная зона контроля с равномерным температурным полем (зона красного цвета) составляет примерно 1/3 видимой половины цилиндра, таким образом, оптимальным является съемка развертки цилиндра с 6-ти ракурсов, т.е. через каждые 60 °.

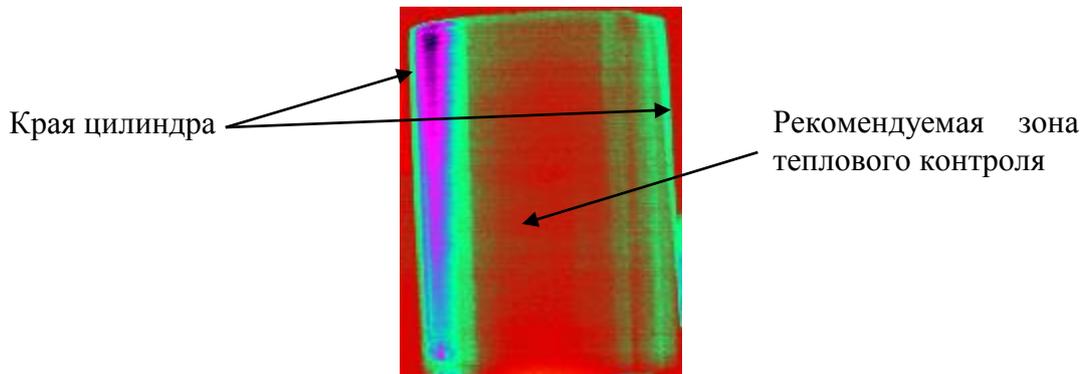


Рисунок 4.14 – выбору зоны одновременного контроля на поверхности цилиндрического изделия (нагрев 6 галогенными лампами общей мощностью 30 кВт в течение 7 секунд с последующим поворотом изделия в зону контроля; зона красного цвета выделена 3-й компонентой с помощью метода анализа главных компонент)

Простым способом нагрева является конвективный с использованием в качестве источника горячего воздуха промышленный фен мощностью 2 кВт (Рисунок 3.13е). При этом важным фактором является выбор оптимальной длительности и траектории нагрева. Результаты приведены на Рисунке 4.15; осуществлена «сшивка» развертки образца по 4-м

ракурсам через каждые 90° . Интересно заметить, что результаты обработки по алгоритму АГК в данном случае не изменяют существенно «видности» дефектов в оптимальной исходной термограмме. Данный метод тепловой стимуляции заслуживает дальнейшей разработки.

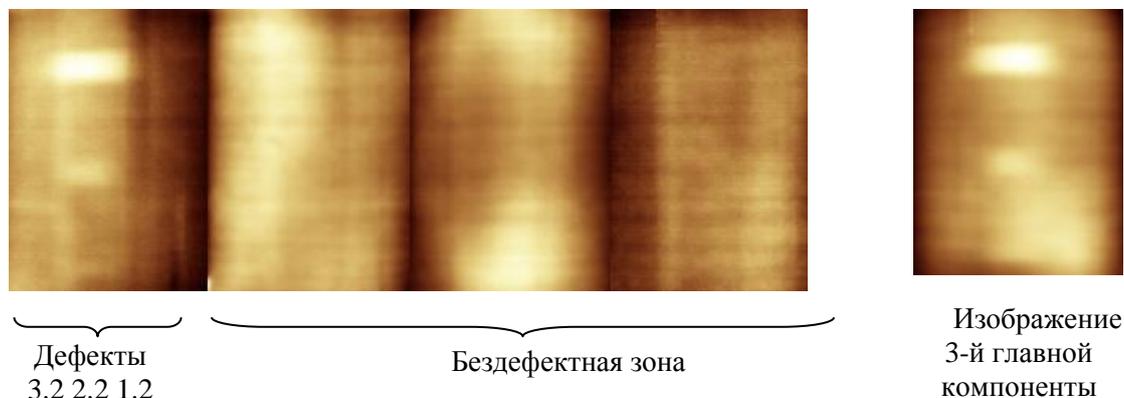


Рисунок 4.15 – Процедура ОК-РН-РН: односторонний ТК изделия Ц2 при конвективном нагреве феном мощностью 1,5 кВт (оператор вручную «сканирует» поверхность в течение 25 с

Ультразвуковое излучение с частотой 22 кГц и электрической мощностью 200 Вт вводили непрерывно в течение 10 с в одну из точек образующей образца Ц2. При данном расположении точки ввода ультразвука отчетливо выявлялся дефект 2.1 как на исходной термограмме, так и после обработки (Рисунок 4.16). Тем не менее, исследование ограничило одним экспериментом из-за опасения разрушения образца; кроме того, по-видимому, необходима специальная оснастка для предотвращения проскальзывания образца в процессе УЗ стимуляции.

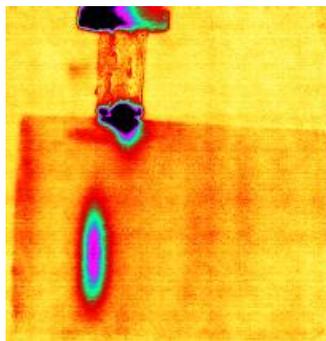


Рисунок 4.16 - Ультразвуковой ИК термографический контроль изделия Ц2 (точка ввода ультразвука 200 Вт в течение 10 с над дефектом 2.1); изображение соответствует 2-й главной компоненте

4.5.2 Цилиндрические изделия: Процедура ОК-СН-ПН (односторонний контроль, полосовой нагрев)

При полосовом сканирующем нагреве в односторонней процедуре полосовой нагреватель - галогенную лампу мощностью 2 кВт (Рисунок 3.14в) размещали на 1/2 окружности цилиндра от центральной строки сканирования тепловизором (Рисунок 4.17). При времени одного оборота 30 с время задержки составило 15 с. Фактически, тепловизор просматривал около 1/6 поверхности цилиндра, поэтому при обработке термограмм была возможность записывать не только центральную строку, но и другие строки, для которых время задержки было менее или более 15 с. После записи последовательности термограмм из каждой термограммы выбирали одну и ту же строку (как правило, центральную) и составляли одну результирующую термограмму, в которой все строки получены при одном и том же времени задержки после окончания нагрева. Следует заметить, что при такой процедуре существует определенное ограничение на скорость вращения и скорость записи термограмм. При оптимальной плотной укладке строк за время между двумя последовательными термограммами (50 мс в конкретном случае) изделие должно сдвинуться на величину строки на образце. При слишком высокой частоте сканирования будет происходить наложение строк друг на друга, что, в принципе, допустимо. При низкой частоте сканирования или чрезмерно высокой скорости вращения, наоборот, произойдет пропуск строк на поверхности изделия, что недопустимо. В конкретном случае линейная скорость вращения равна 16,2 мм/с, а размер строки сканирования на изделии равен 0,76 мм, следовательно, частота записи должна быть $16,2/0,76 = 21$ Гц. В экспериментах выбрана частота записи 20 Гц.



Рисунок 4.17 - Макет устройства ТК углепластиковых цилиндров с использованием полосового нагрева

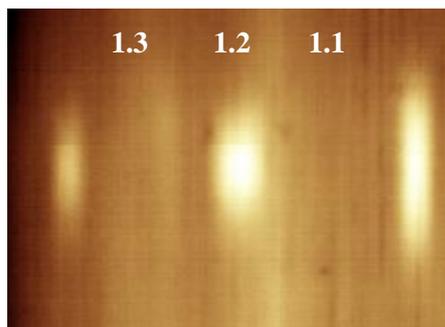
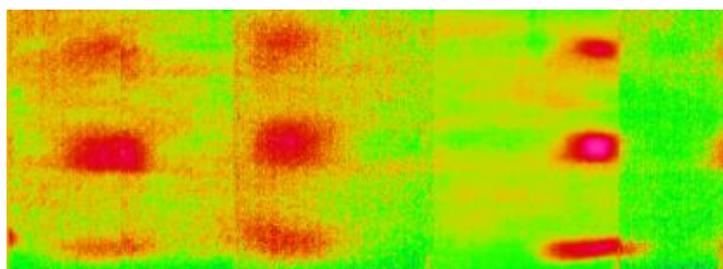


Рисунок 4.18 – Термограмма цилиндрического изделия Ц1 при сканирующем полосовом нагреве снаружи изделия с помощью галогенной лампы 2 кВт (время задержки 15 с; исходная термограмма; видны дефекты ряда 3.1; для дефекта 3.1.2 $S=2,5$)

4.5.3 Цилиндрические изделия: процедура ДК-РН-РН (двухсторонний контроль, равномерный нагрев)

Результаты экспериментов при равномерном нагреве изнутри образца в двухсторонней процедуре приведены на Рисунках 4.19, 4.20 для образцов Ц1 и Ц2. Галогеновую лампу мощностью 2 кВт размещали внутри образцов по оси и записывали последовательность термограмм в ходе процесса нагрева (10 с) и после выключения лампы. Поглощенная мощность нагрева была оценена на уровне 5800 Вт/м^2 . «Сшивку» развертки проводили по 6-ти изображениям. Все 9 дефектов надежно обнаруживались в каждом образце.



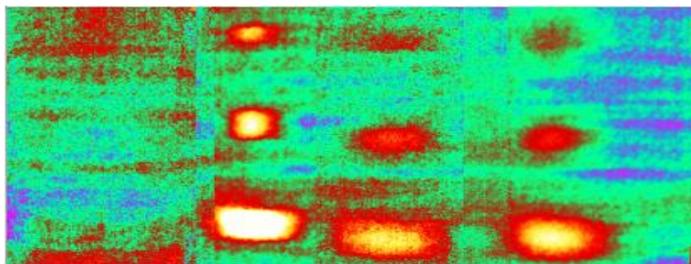
Группы дефектов:

1

2

3

Рисунок 4.19– Процедура ДК-РН-РН : двухсторонний ТК изделия Ц1 при нагреве одной галогенной лампой мощностью 2 кВт (лампа расположена вдоль оси цилиндра, длительность нагрева 10 с; «сшитые» изображения 3-й главной компоненты из 6-ти изображений)



Группы дефектов:

1

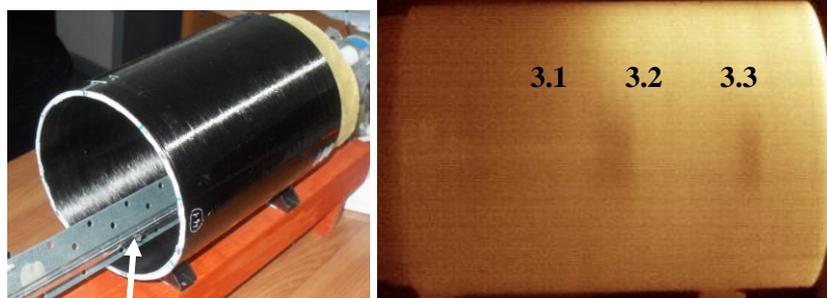
2

3

Рисунок 4.20– Процедура ДК-РН-РН: двухсторонний ТК изделия Ц2 при нагреве одной галогеновой лампой мощностью 2 кВт (лампа расположена вдоль оси цилиндра, длительность нагрева 10 с; «сшиты» изображения 3-й главной компоненты из 6-ти изображений)

4.5.4 Цилиндрические изделия: процедура ДК-СН-ПН (двухсторонний контроль, полосовой нагрев)

В данной процедуре полосовой нагреватель – галогеновую лампу мощностью 2 кВт – размещали внутри образца вблизи стенки (Рисунок 4.21).



Полосовой нагреватель
(галогенная лампа 2 кВт)

Рисунок 4.21– Термограмма цилиндрического изделия Ц1 при сканирующем полосовом нагреве внутри изделия с помощью галогенной лампы 2 кВт (время задержки 15 с; исходная термограмма; для дефекта 1.2 $S=3,6$)

4.6 Определение анизотропной температуропроводности композитов

Как известно, основными теплофизическими ТФХ материалов являются коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость C и плотность ρ . Тем не менее, динамика тепловых процессов в материале лучше всего описывается коэффициентом

температуропроводности $\alpha = \frac{\lambda}{C\rho}$. В настоящей работе рассмотрены все четыре

вышеприведенных ТФХ. При этом принята гипотеза об ортотропности исследуемых композитов. Иными словами, в рассмотрение вводятся три взаимно-перпендикулярные компоненты температуропроводности $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ или теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$. С целью наглядности компонента α_z названа «сквозной», а компоненты α_x, α_y - «поперечными».

4.6.1 «Сквозная» компонента температуропроводности: метод Паркера

В классической работе Паркера и др., опубликованной в 1961 г., был предложен метод, позднее названный импульсным, или методом Паркера, а также методом «вспышки» [108]. В настоящих диссертационных исследованиях данный метод не прорабатывался, но использовался в его базовой форме. Производили импульсный нагрев пластины из исследуемого материала, по температурному отклику задней поверхности определяли так называемое время «половинного сигнала» $\tau_{1/2}$, после чего температуропроводность

α_z вычисляли по известной формуле:

$$\alpha_z = \frac{0,139L^2}{\tau_{1/2}}$$

Основное внимание в данной работе уделено определению «поперечных» компонент температуропроводности.

4.6.2 «Поперечные» компоненты температуропроводности: метод J.-С. Krapez

К настоящему времени, в основном, в зарубежных исследованиях, предложено несколько методов определения «поперечной» температуропроводности. По причинам, изложенным ниже, нами выбран метод, теория которого предложена в работе J.-С. Krapez и др. [109].

Между исследуемым образцом и источником равномерного нагрева размещают полосовую маску, создающую текстуру периодического нагрева на передней поверхности образца (Рисунок 4.22). Температура задней поверхности образца регистрируется тепловизором.

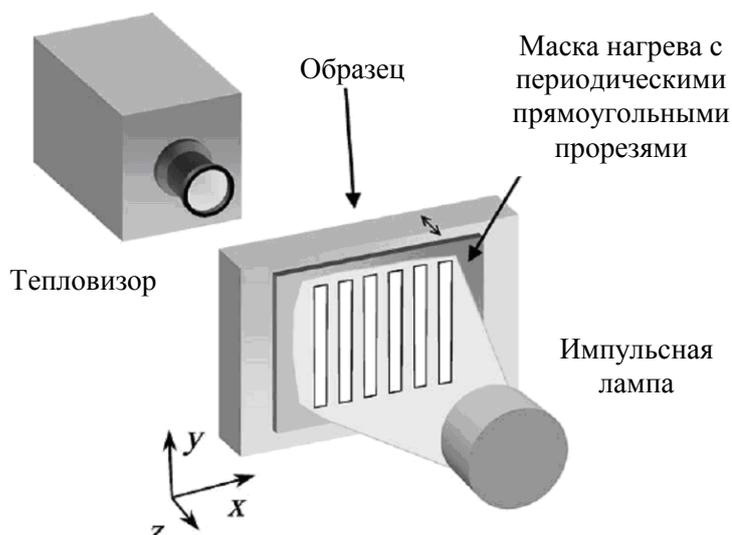


Рисунок 4.22 – Схема определения «поперечной» температуропроводности с использованием полосовой маски (метод Ж.-С. Крапез)

Физическая постановка задачи нагрева - следующая. Бесконечная ортотропная неадиабатическая пластина нагревается тепловым потоком $Q(x, y)Q(z)$, который в общем случае зависит как от двух «поперечных» координат x, y , так и от «сквозной» координаты z . Теория, приведенная ниже, справедлива для произвольного пространственного распределения мощности нагрева (см. два предыдущих параграфа), однако в частности будет рассмотрен случай периодического нагрева с периодом Δ .

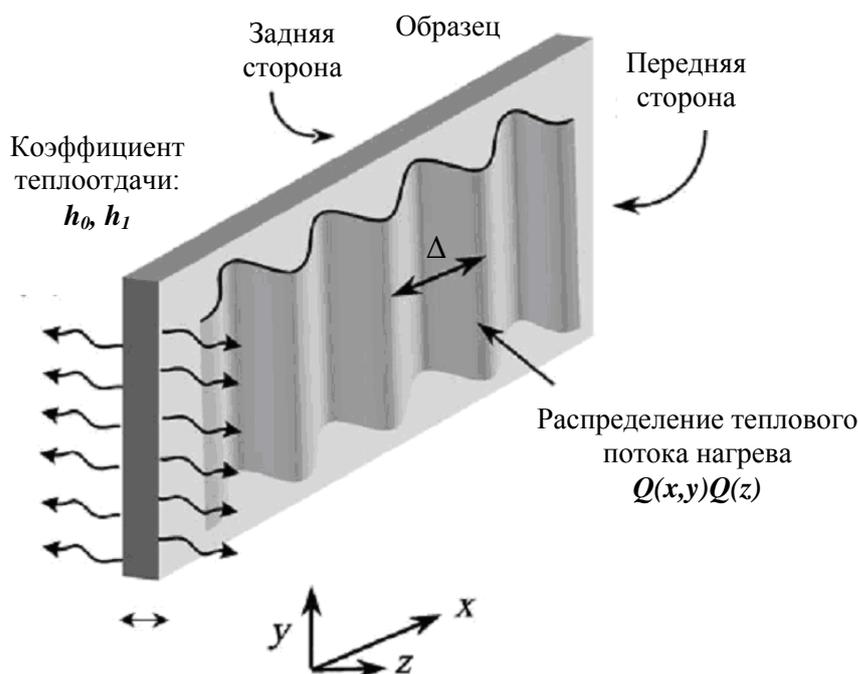


Рисунок 4.23– К постановке задачи нагрева пластины периодически изменяющимся тепловым потоком (рисунок из работы [109])

Математическая постановка имеет вид (Рисунок 4.23):

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_z(z) \frac{\partial T}{\partial z}] ; \quad (4.4)$$

$$T(x, y, z, \tau = 0) = Q(x, y) Q_z(z) / \rho C ; \quad (4.5)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = -h_0 T(x, y, z=0, \tau) ; \quad (4.6)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = h_L T(x, y, z=L, \tau) . \quad (4.7)$$

Теория ниже изложена в соответствии с работами [110, 111]. Применим преобразования Фурье-Лапласа к основному уравнению теплопроводности (4.5):

$$(\rho C p + \lambda_x \omega_x^2 + \lambda_y \omega_y^2) \tilde{\tilde{T}} - \tilde{\tilde{Q}} Q_z(z) = \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_z(z) \frac{\partial \tilde{\tilde{T}}}{\partial z}] . \quad (4.8)$$

Вначале рассмотрим более простую задачу нагрева неограниченной пластины со сквозной теплопроводностью $\lambda_z(z)$ равномерно распределенным тепловым потоком $Q_z(z)$. Обозначим ее решение $T_z(z, \tau)$. Заметим, что, в отличие от двух вышеприведенных моделей, рассмотрен случай зависимости теплопроводности и мощности нагрева от координаты z .

Благодаря свойству сдвига преобразования Лапласа:

$$\tilde{\tilde{T}}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) = \tilde{\tilde{Q}}(\omega_x, \omega_y) T_z(z, \tau) \exp(-\alpha_x \omega_x^2 \tau - \alpha_y \omega_y^2 \tau) , \quad (4.9)$$

где введены поперечные компоненты температуропроводности α_x и α_y . Отсюда следует, что Фурье-температура $\tilde{\tilde{T}}$ после применения двойного пространственного преобразования Фурье при нулевых пространственных частотах $\omega_x = \omega_y = 0$ ведет себя во времени так же, как температура при равномерном поверхностном нагреве потоком $\tilde{\tilde{Q}}(0,0) Q_z(z)$. Заметим, что этот вывод справедлив также и для ограниченной пластины с теплоизолированными торцами. Если принять, что величина $\alpha_z(z)$ постоянна, а нагрев описывается функцией Дирака, то «сквозную» температуропроводность можно определить, как отмечено выше, применяя к Фурье-температуре при нулевых пространственных частотах $\tilde{\tilde{T}}(0,0, \tau)$ классический метод Паркера.

Исключая T_z в уравнении (4.9) путем деления на то же выражение при нулевых пространственных частотах, приходим к выражению:

$$\tilde{T}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau) = \tilde{Q}(\omega_x, \omega_y) / \tilde{Q}(0, 0) \exp(-\alpha_x \omega_x^2 \tau - \alpha_y \omega_y^2 \tau). \quad (4.10)$$

Это базовое выражение справедливо для любой координаты z , включая переднюю и заднюю поверхности. Кроме того, оно справедливо и при наличии теплопотерь на любой поверхности, а также при частичном поглощении энергии нагрева внутри материала, если поток нагрева можно описать в виде $Q(x, y)Q_z(z)$. Данные обстоятельства делают рассматриваемый метод определения «поперечной» температуропроводности устойчивым к ряду факторов, которые трудно контролировать в реальном эксперименте.

На практике в рамках рассматриваемого метода используют периодический нагрев с периодом Δ (для этого нами применены щелевые маски с различным числом прорезей). Температуру интегрируют в пределах от $-Y$ до $+Y$, преобразование Фурье осуществляют по одной из координат, например по x , путем выбора целого числа периодов (при этом выбирают четную функцию нагрева с максимумом при $x = 0$):

$$\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) = \frac{1}{n\Delta} \frac{1}{2Y} \int_{x'=0}^{x'=n\Delta} \int_{y'=-Y}^{y'=+Y} T(x', y', z, \tau) \cos(\omega_x x') dy' dx'. \quad (4.11)$$

Для определения компоненты α_x используют следующее линейное уравнение:

$$\text{Ln}[\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau)] = \text{Ln}[\tilde{Q}(\omega_x, 0) / \tilde{Q}(0, 0)] - \alpha_x \omega_x^2 \tau. \quad (4.12)$$

Данное уравнение, в частности, справедливо для задней поверхности изделия при $z = 0$. Фурье-температуру анализируют на частоте $\omega_x = 2\pi / \Delta$, соответствующей несущей частоте маски нагрева. Температуропроводность α_x определяют непосредственно по углу наклона прямой регрессии $\text{Ln}[\tilde{T}(\omega_x, 0, 0, \tau) / \tilde{T}(0, 0, 0, \tau)]$. Соответственно, компоненту α_y определяют в повторном эксперименте после поворота маски нагрева на 90° .

Авторами данного метода показано, что при наличии температурных шумов точность определения температуропроводности возрастает с увеличением фактора

$$A = \frac{\Delta}{L} \sqrt{\frac{\alpha_z}{\alpha_x}}, \quad (4.13)$$

который фактически представляет собой квадратный корень из времен диффузии вдоль соответствующих координат (или Δ и L). Также установлено, что точность определения α перестает улучшаться для $A > 4-5$.

4.6.3 Теоретический анализ эффективности метода определения «поперечных» компонент теплопроводности (двухсторонняя процедура)

Поскольку в базовой статье J.-С. Krarez и др. приведена общая аналитическая теория, а на практике мы имеем дело с дискретными функциями (последовательностями ИК термограмм), мы теоретически исследовали влияние на точность измерений следующих параметров: 1) конечной длительности нагрева; 2) интервала времени, в течение которого осуществляется запись и анализ ИК термограмм; 3) отношения площади нагреваемой зоны к полной площади образца; 4) наличия шумов.

Использование полосовой маски при испытаниях образца из углепластика толщиной 5,4 мм иллюстрируется графиками на Рисунке 4.24. Пространственное распределение температуры показано на Рисунке 4.25а, несущая частота отчетливо проявляется в спектре Фурье (Рисунок 4.24б), изменение температуры во времени приведено на Рисунке 4.24в, логарифмические кривые показаны на Рисунке 4.24г, причем только прямая линия красного цвета, расположенная ниже нулевой оси (Рисунок 4.24г), позволяет определить истинную теплопроводность, поскольку именно эта линия построена для несущей частоты.

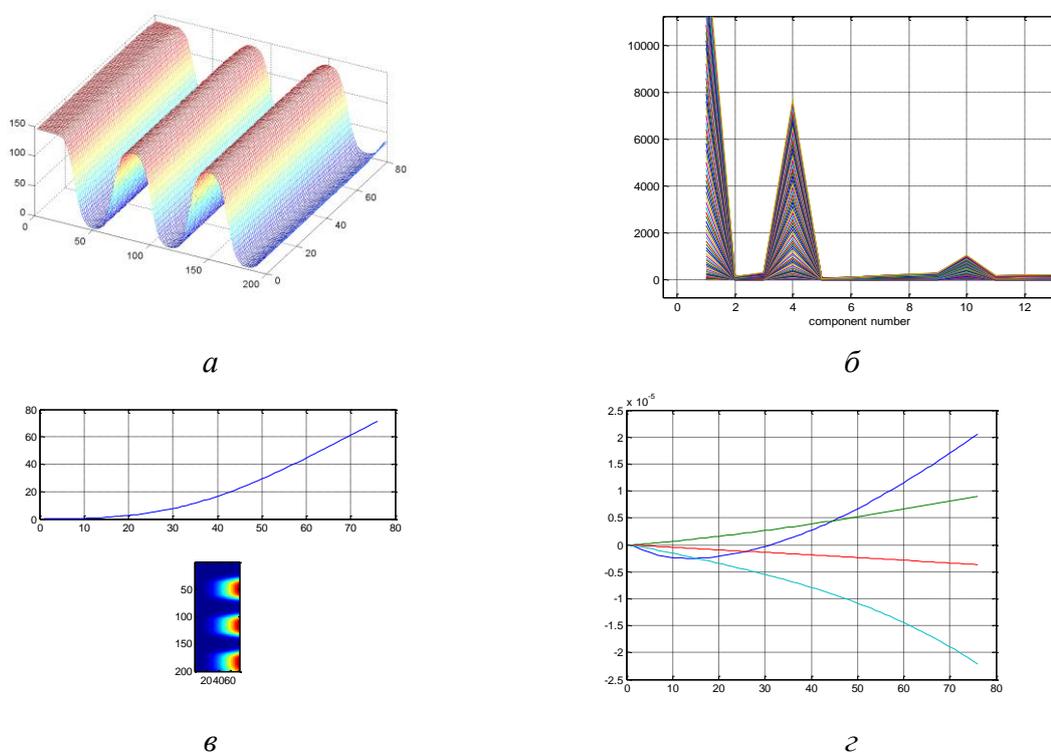


Рисунок 4.24 – Использование полосовой маски с 3-мя прорезями при длительности нагрева 3 с (алгоритм J.-С. Krarez и др.) для определения ТФХ углепластика толщиной 5,4 мм:

a - распределение температуры при 3 с;

δ - Фурье-спектр (частота 3, 4-я компонента спектра, что соответствует трем прорезам маски);

ϵ - изменение температуры во времени, $\tau_{out}=0,1$ с, изменение усредненной по строкам температуры во времени;

ζ - изменение во времени логарифма отношения (начиная с нулевого времени $\tau_{zero}=2.5$ с)

С помощью программы ThermoCalc-6L выполнены многочисленные расчеты различных масок нагрева. Обзор расчетных результатов сделан в Таблице 4.3, где наряду с полосовым нагревом рассмотрен нагрев в локальных зонах квадратной и круглой формы.

Таблица 4.3 – Определение анизотропной теплопроводности углепластика (задняя поверхность, ТФХ углепластика: $\lambda_x=0,43$ Вт/(мК)²⁾, $\lambda_y=1,79$ Вт/(мК), $\lambda_z=0,3$ Вт/(мК), $\alpha_x=4,598 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha_y=19,14 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha_z=3,208 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $Q_m=10^6$ Вт/м²³⁾, $L=5,4$ мм, $L_x \times L_y=100 \times 100$ мм, пятно нагрева в центре образца, за исключением особо оговоренных случаев $\Delta X = \Delta Y = 0,5$ мм⁴⁾, $\Delta \tau_{calc}$ ⁵⁾ = 0.1 с (если τ_h ⁶⁾ $\geq 0,1$ с) и 0.01 с (если $\tau_h=0,01$ с), $\Delta \tau_{out}$ ⁷⁾ = 0,1 с, за исключением особо оговоренных случаев, τ_{end} ⁸⁾ = 10 с, за исключением особо оговоренных случаев, τ_{zero} ⁹⁾ = 2,5 с, за исключением особо оговоренных случаев)

Описание модели нагрева	Оценка теплопроводности, 10^{-7} м ² /с	
	α_x (истинное значение $4.598 \cdot 10^{-7}$ м ² /с)	α_y (истинное значение $19.14 \cdot 10^{-7}$ м ² /с)
\square ¹⁰⁾ 2x2 мм $\tau_h=0.01$ с $\Delta \tau_{out}=0.01$ с, $\tau_{end}=5$ с	4.598 (#1) ¹¹⁾ 4.596 (#2) 4.594 (#3)	19.14 (#1) 19.13 (#2) 19.12 (#3)
\square 10x10 мм $\tau_h=0.1$ с	4.597 (#1) 4.595 (#2) 4.591 (#3)	19.13 (#1) 19.11 (#2) 19.06 (#3)
\square 10x10 мм $\tau_h=3$ с	3.927 (#1) 3.924 (#2) 3.918 (#3)	16.34 (#1) 16.29 (#2) 16.22 (#3)
\square 20x20 мм $\tau_h=0.1$ с	4.597 (#1) 4.595 (#2) 4.591 (#3)	19.13 (#1) 19.11 (#2) 19.06 (#3)
\circ ⁴⁾ $r_{ef}=1$ мм $\tau_h=0.01$ с	4.598 (#1) 4.596 (#2) 4.594 (#3)	19.14 (#1) 19.13 (#2) 19.12 (#3)
\circ $r_{ef}=10$ мм $\tau_h=0.1$ с	3.757 (#1) 3.835 (#2) 3.985 (#3)	11.88 (#1) 12.01 (#2) 12.23 (#3)
\equiv $P=50$ мм $\tau_h=3$ с	–	11.76 (#3)

$P=33.3$ мм $\tau_h=3$ с	4.868 (#3) 3.480 (#3, выбраны полосы в центре) 3.460 (#3, выбраны полосы в центре, узкая зона)	–
$P=33.3$ мм $\tau_h=3$ с $\tau_{end}=30$ с	4.923 (#3)	–
$P=33.3$ мм $\tau_h=3$ с $\tau_{end}=30$ с	3.613 (#3) Выбрана квадратная зона в центре	–
== $P=33.3$ мм $\tau_h=3$ с	–	13.24 (#3)
== $P=33.3$ мм $\tau_h=3$ с $\tau_{zero}=7$ с	–	14.05 (#3)
$P=33.3$ мм $\tau_h=0.1$ с	5.624 (#3)	–
$P=20$ мм $\tau_h=3$ с	3.758 (#5)	–
≡≡ $P=20$ мм $\tau_h=3$ с	–	12.51 (#5)
$P=10$ мм $\tau_h=3$ с	3.525 (#10)	–
≡≡≡ $P=10$ мм $\tau_h=3$ с	–	8.003 (#10)
$P=10$ мм $\tau_h=3$ с $T_{max\ end} \approx 7.2^\circ\text{C}$ $\sigma_n = 0.03^\circ\text{C}$	3.508 (#10)	–
$P=10$ мм $\tau_h=3$ с $T_{max\ end} \approx 7.2^\circ\text{C}$ $\sigma_n = 0.03^\circ\text{C}$ $\tau_{zero}=7$ с	3.693 (#10)	–

- 1) Во всех случаях использовано быстрое преобразование Фурье
- 2) $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - компоненты теплопроводности
- 3) Q_m - максимальная плотность мощности нагрева (в центре пятна)
- 4) ΔX и ΔY - шаги численной сетки
- 5) $\Delta \tau_{calc}$ - шаг расчета по времени
- 6) τ_h - время нагрева
- 7) τ_{out} - шаг выдачи результатов во времени
- 8) τ_{end} - конечное время процесса
- 9) τ_{zero} - начальное время, когда начинаются вычисления согласно алгоритму
- 10) □ - обозначает квадратную маску
- 11) (#) - обозначает частоту Фурье
- 12) $T_{end\ max}$ - максимальная температура задней поверхности (для сравнения с амплитудой шума)
- 13) σ_n - стандартное отклонение шума
- 14) ○ - обозначает гауссовский нагрев, где r_{ef} - эффективный радиус пятна нагрева, на котором мощность нагрева уменьшается в 10 раз; формула нагрева: $Q = Q_m e^{-\beta_x(x-x_0)^2 - \beta_y(y-y_0)^2}$,
 $\beta = 2,303 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}$ для $r_{ef} = 1$ мм, $\beta = 2,303 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ для $r_{ef} = 10$ мм,
 $\beta = 921,2 \text{ м}^{-2}$ для $r_{ef} = 50$ мм, $\beta = 409,42 \text{ м}^{-2}$ для $r_{ef} = 75$ мм,
- 15) || - обозначает полосовую маску с периодом P

Из Таблицы 4.3 следуют важные выводы. В отсутствие шумов наилучшие результаты достигаются при использовании импульсного сфокусированного (дираковского по

пространству и времени) теплового потока, который должен нагревать поверхность образца таким образом, чтобы не нагревались края образца. В этом случае, одинаково точные результаты получаются на всех трех частотах при весьма незначительном преимуществе 1-й частоты. Очевидно, что пространственное распределение энергии в таком потоке нагрева не играет существенной роли. Данный вывод представляется очевидным, поскольку дираковский по пространству и времени поток нагрева в наибольшей степени соответствует вышеописанной теории.

Следующим выводом является то, что более важно обеспечить импульсный характер во времени, а не в пространстве. Это требование должно рассматриваться вместе с требованием надлежащего выбора времени, в течение которого должно быть выполнено преобразование Фурье. Выбор этого периода весьма важен для обеспечения точных оценок. В частности, при анализе температуры на задней поверхности следует исключить из рассмотрения начальный период времени (τ_{zero}), когда избыточная температура равна нулю (в теоретических данных) или близка к нулю (в экспериментальных данных, когда обычно из всех зарегистрированных ИК термограмм вычитают термограмму при начальной температуре, чтобы в последующем обрабатывать только избыточную температуру изделия). Далее, рекомендуется начинать Фурье-обработку данных с момента времени, который значительно больше, чем время нагрева τ_h для того, чтобы приблизить модель к дираковской по времени.

Преимущество использования полосовой маски состоит в том, что благодаря наличию основной несущей частоты нет проблемы с выбором оптимальной частоты для определения температуропроводности. Однако в этом случае для определения обеих компонент α_x, α_y необходимо выполнить два эксперимента с поворотом маски на 90° . При этом размер полосовой маски должен быть выбран в соответствии с рекомендацией предыдущего раздела. Интересно отметить, что в случае полосовой маски более короткие импульсы нагрева могут приводить к худшим результатам (см. Таблицу 4.3) пока по не совсем ясным причинам.

4.6.4 Экспериментальные результаты

Исследовали образцы из углепластика, как плоские, так и в виде сегмента и отрезка трубы (цилиндра), см. Рисунок 4.8. Варианты аппаратурной реализации одно- и двухстороннего метода определения анизотропных ТФХ показаны на Рисунке 4.25. В экспериментах применен 30 кВт галогеновый нагреватель площадочного типа (Рисунок 3.13в). При испытаниях цилиндрического образца из-за трудностей нагрева и

размещения маски была использована только двухсторонняя процедура с применением одиночной галогеновой лампы (Рисунок 3.14*в*), размещаемой внутри образца.

Образец располагался на расстоянии 10 см от плоскости ламп, длительность нагрева 3 с, температуру задней поверхности регистрировали тепловизором NEC TH-9100 с интервалом 0,5 с. Пространственное разрешение равнялось 0.435 мм/пиксель. Всего анализировали 117 изображений.

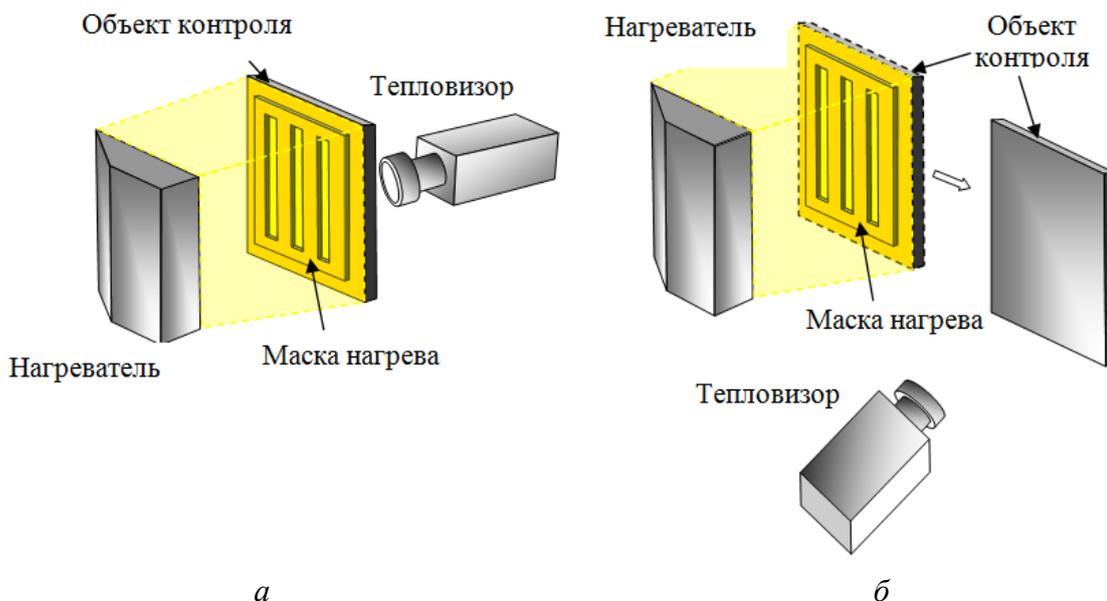


Рисунок 4.25 – Схема двухсторонней (а) и односторонней процедур (б) определения ТФХ

Маска нагрева с шириной прорези 10 мм отчетливо проявляется на задней поверхности изделия при расположении прорезей вдоль волокон, при этом анализируется теплопроводность поперек волокон (Рисунок 4.26 а, б, в). Профиль температуры на задней поверхности – вполне классический с учетом поверхностной теплоотдачи, однако в начале кривой отчетливо виден сигнал, связанный с отраженным излучением нагрева. Очевидно, что при анализе этой частью кривой нагрева следует пренебречь. Максимальная избыточная температура нагрева около 9°C (Рисунок 4.26 г), время половинного сигнала – 16 с, что приводит к значению $\alpha_z = 2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Обработка данных Рисунок 4.26 по вышеописанной методике позволила определить $\alpha_y = 2,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (это значение близко к «сквозной» теплопроводности α_z).

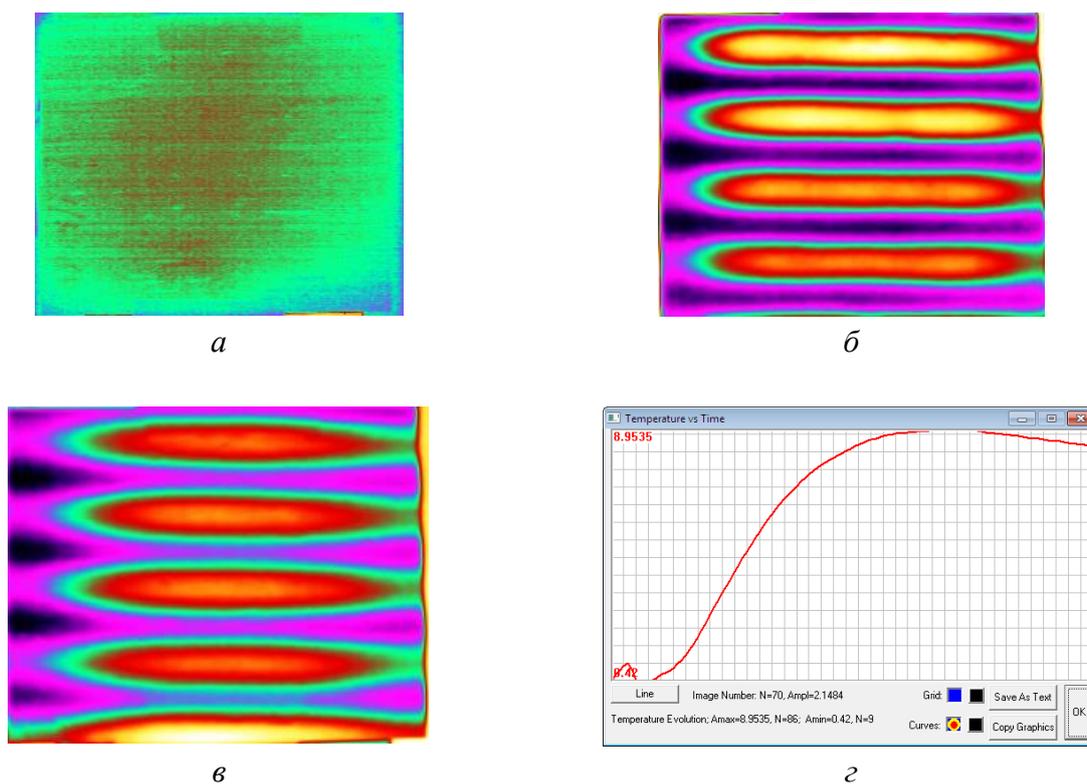


Рисунок 4.26 – Результаты двухстороннего контроля углепластикового образца (Рисунок 4.8 *a*) при полосовой маске нагрева с шириной полосы 10 мм (компонента α_x):

a – момент включения нагревателя;

б – 16 с (момент $\tau_{1/2}$);

в – 86 с (максимальная температура изделия);

г – временной профиль температуры в центре полосы нагрева (после фильтрации в программе ThermoFit Pro)

Процедура оценки другой компоненты «поперечной» теплопроводности проиллюстрирована на Рисунке 4.27. В момент включения нагревателя на галогеновых лампах температурное поле - равномерное (Рисунок 4.27*a*). Кривая изменения усредненной температуры задней поверхности во времени (Рисунок 4.27*б*) носит классический характер, что позволяет определять «сквозную» теплопроводность ($\alpha_z = 2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для углепластика) по методу Паркера. Температурные поля в два момента времени (так называемое время половинного сигнала, используемое в формуле Паркера, и время максимальной температуры), показанные на Рисунке 4.27*в,г* отчетливо проявляют структуру полосового нагрева. Рисунок 4.27*д* показывает пошажно процедуру определения компоненты α_x : проинтегрированный по координате Y профиль «Фурье-температуры», спектр Фурье с отчетливой несущей частотой, обусловленной полосовой

маской, и изменение логарифма «Фурье-температуры» во времени. В частности, для углепластикового цилиндра определено $\alpha_x = 10,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

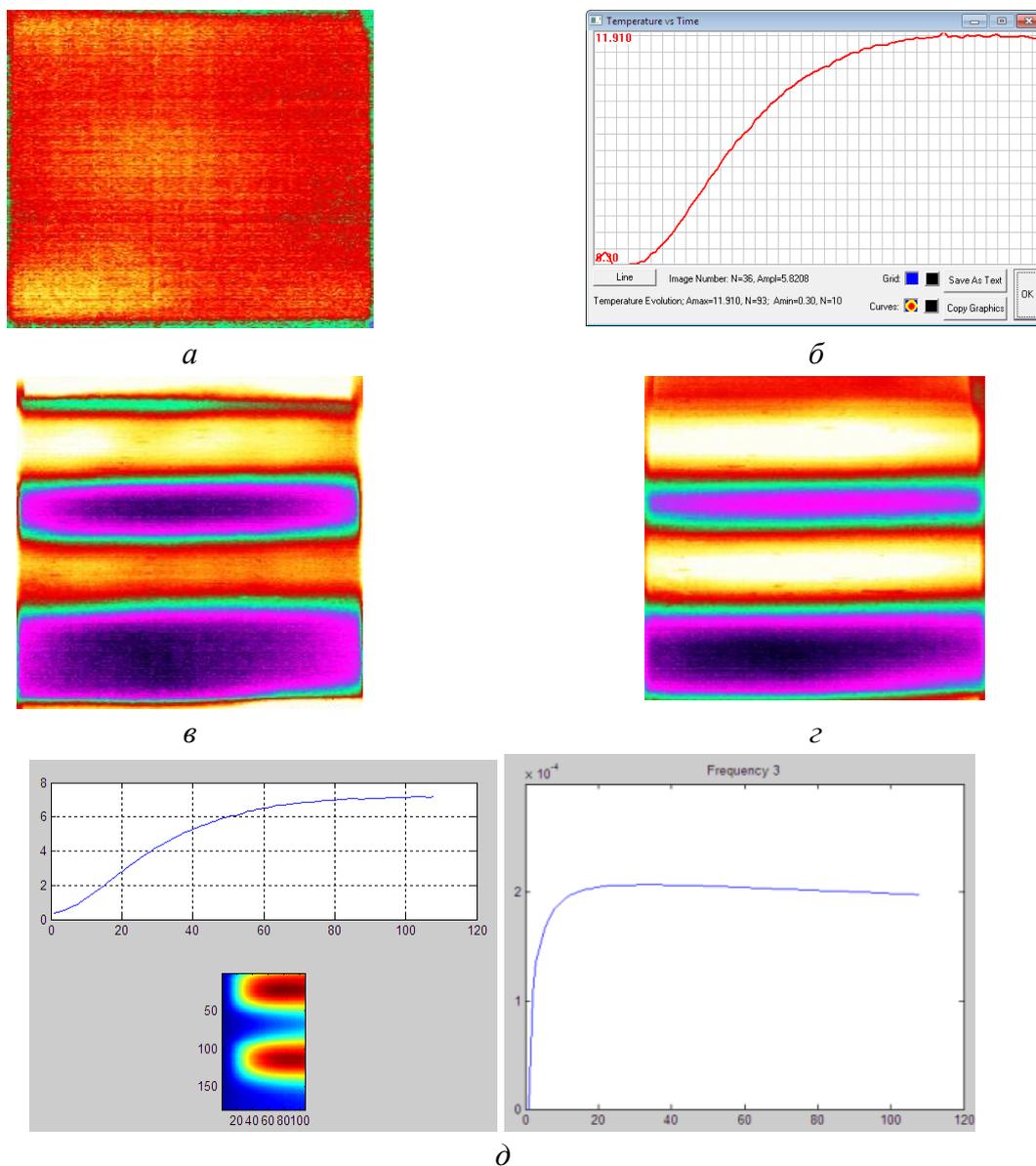


Рисунок 4.27 - Результаты двухстороннего контроля углепластикового образца (Рисунок 4.8) при полосовой маске нагрева с шириной полосы 20 мм (компонента α_x):

a – момент включения нагревателя;

б – профиль температуры в центре полосы нагрева (после фильтрации в программе ThermoFit Pro);

в – 18 с ($\tau_{1/2}$);

г – максимальная температура изделия;

д – иллюстрации работы программы XY_Diffusivity2013 (слева направо: проинтегрированный профиль как функция времени, спектр Фурье, логарифм отношения как функция времени)

4.7 Выводы по Главе 4

- Обобщены процедуры активного ТК изделий из углепластикового композита цилиндрической формы, включая оптическую, конвективную и ультразвуковую стимуляцию.

- Экспериментально определены параметры тепловых шумов при ТК углепластика а также получены результаты сравнительного анализа различных алгоритмов обработки экспериментальных результатов с использованием отношения сигнал-шум в качестве критерия оптимизации. Типовой феноменологический подход к оценке шумов состоит в оценке стандартного отклонения динамического температурного сигнала в бездефектных зонах $\sigma_n(\tau)$, °С, и текущего контраста шума C_n . Для строго мультипликативной помехи, определяемой только источником нагрева, шумовой контраст не должен изменяться во времени. На практике, в силу действия различных факторов, в том числе, влияния аддитивных шумов, контраст шума изменяется во времени при нагреве/охлаждении изделия. Тем не менее, во многих случаях относительный шум поверхности можно

считать постоянным во времени и выражать его в терминах контраста шума $C_n = \frac{\sigma_n(\tau)}{T(\tau)}$, усредненного по времени и пространству. Тогда величина C_n будет характеризовать конкретный материал и ограничивать выявление скрытых дефектов, создающих

«полезный» температурный контраст $C = \frac{\Delta T(\tau)}{T(\tau)}$.

- Установлено, что наружная поверхность цилиндрических углепластиковых изделий, характеризуется контрастом шума на уровне 4–8% независимо от процедуры испытаний. При определении порога чувствительности в настоящем исследовании шум углепластика принят равным 5%. Это значение следует понимать следующим образом: если выбрать мощность источника нагрева таким образом, что избыточная температура поверхности объекта контроля составит 50 °С, то шумовые сигналы достигнут 2,5 °С. Очевидно, что в данных рассуждениях не рассматриваются особенности расшифровки дефектных вопросов оператором-термографистом, что может привести и к более высокой эффективности ТК. В ТК эти вопросы исследованы слабо.

- Наибольший объем экспериментальных исследований пришелся на испытания цилиндрических образцов из углепластика, в основном, с использованием оптических источников нагрева. Исследован равномерный нагрев при двухстороннем и одностороннем контроле образцов, полосовой нагрев изнутри и снаружи образцов, а также точечный нагрев снаружи. В стандартных образцах при использовании

двухсторонней процедуры обнаруживались все 9 дефектов в каждом образце на глубинах 1,64; 4,0 и 4,7 мм, причем как поперечные размеры, так и глубина залегания, дефектов слабо влияли на их обнаружение (в соответствии с теорией ТК). В односторонней процедуре обнаруживались дефекты только на глубине 1,64 мм, что также соответствует предсказанию теории с учетом собственного шума углепластика. Оптимальным видом нагрева был оптический с помощью источника на галогенных лампах мощностью 30 кВт. Показано, что для получения развертки цилиндрического образца необходимо «сшивать» 6 изображений, полученных при повороте образцов на 60° .

- Важным выводом является то, что надежность выявления дефектов по исходным термограммам достаточно низка. С использования программы ThermoFit Pro исследовали несколько известных алгоритмов обработки термограмм, включая нормализацию, Фурье-анализ и вейвлет-анализ. Установлено, что наилучшие результаты обеспечивает применение статистического метода анализа главных компонент (АГК): в этом случае отношение сигнал/шум повысилось в 3 раза по сравнению с исходными изображениями.

- Теория ИК термографического определения трех компонент температуропроводности с помощью щелевой маски, предложенная J.-C. Krapez и др., исследована путем численного моделирования трехмерной задачи ТК, в результате чего сделаны практически важные выводы по оптимизации практической процедуры испытаний композитов, в особенности, углепластика.

Глава 5. Обнаружение скрытой воды в сотовых конструкциях методом терагерцовой ИК термографии

5.1. Дистанционное обнаружение воды

Обшивка фюзеляжа, крыльев, рулей высоты и др. элементов большинства современных самолетов выполнена с применением сотовых конструкций, которые состоят из двух обшивок (несущих слоев), соединённых сотовым наполнителем и окантованных по периметру элементами каркаса. Накопление воды в ячейках сот в ходе эксплуатации летательных аппаратов может привести к деградации и последующему разрушению их ответственных элементов. Известны как пассивный, так и активный методы инфракрасной (ИК) термографии, используемые ведущими авиастроительными фирмами для обнаружения сконденсированной влаги в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов по поверхностным тепловым аномалиям, которые возникают в процессе нестационарного теплообмена и обусловлены высокой теплоемкостью воды [112, 113]. В России базовые исследования в этом направлении, включая диссертационные исследования Д.А. Нестерука, были проведены в последнее десятилетие в Томском политехническом университете.

Рост интереса к использованию электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона связан с особенностями его взаимодействия с веществом. При этом структурные неоднородности материалов обнаруживают и визуализируют путем поточечного сканирования [81, 114–117]. Для осуществления терагерцового «видения» возможно применение ИК тепловизоров в комбинации с так называемыми термоконверторами, например, выполненными на базе тонких мишеней, хорошо поглощающих ТГц излучение («карбоновой» бумаги) [81, 117]. Такая техника применена в настоящей работе для обнаружения воды в стеклопластиковых сотовых панелях.

Исследования по обнаружению оптического излучения терагерцового диапазона находятся в стороне от основного направления настоящих диссертационных исследований, тем не менее, ряд результатов приведен в данной главе, поскольку при этом использован метод ИК термографии для визуализации распределения в пространстве интенсивности терагерцового излучения. Результаты, описанные в данной главе, получены совместно с исследователями из Университета г. Бордо, Франция: проф. J.-C. Batsale и C. Pradere.

5.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, изображенная на Рисунке 5.1, включала источник ТГц излучения, изготовленный на базе диода Ганна мощностью 40 мВт (производство фирмы Virginia Diodes) с фиксированной частотой 110 ГГц и длиной волны 2.8 мм; использована схема контроля «на просвет». Для коллимирования ТГц пучка была применена система линз из полиэтилена высокой плотности (HDPE), что обеспечивало площадь контроля, равную 1600 мм², на расстоянии 350 мм (расстояние от ТГц источника до объекта контроля составило 250 мм). Для модуляции ТГц пучка применили механический затвор фирмы Uniblitz с периодом работы 2 секунды. Для визуализации пространственного распределения мощности ТГц излучения, проходящего через исследуемый объект, ТГц объектив фирмы ALPhANOV был закреплен на объективе ИК тепловизора FLIR SC7000 (ИК матрица 256x320 элементов, спектральный диапазон 7-14 мкм) вместе с термоконвертором производства фирмы NeTHIS.

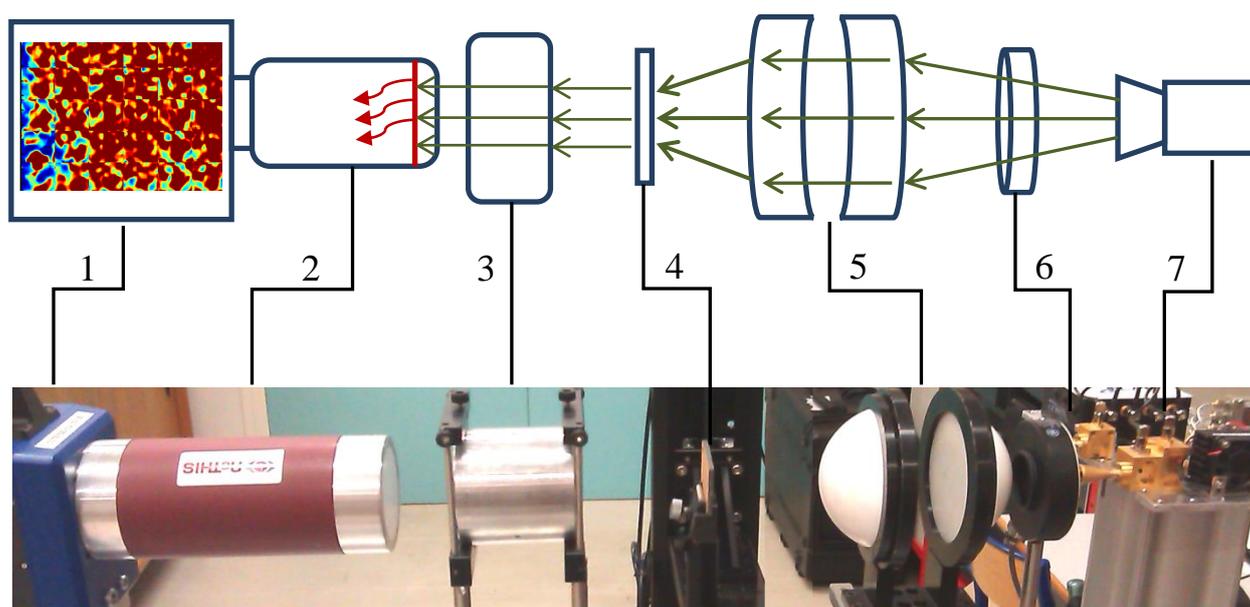


Рисунок 5.1 — Схема экспериментальной установки (1-ИК камера, 2-термоконвертор, 3-терагерцовый объектив, 4 - контролируемый объект, 5 -система линз, 6 -механический затвор, 7 – ТГц источник)

5.3. Объект контроля

В качестве объекта исследования была выбрана прозрачная для ТГц излучения стеклопластиковая сотовая конструкция (Рисунок 5.2) размером 170x180x25 мм; толщина передней и задней обшивок составляла соответственно 2 и 3 мм, объем ячейки - 700 мм³.

Ячейки сотовой конструкции заполняли водой с помощью шприца без нарушения целостности панелей, вводя иглу в торцевые части изделия. Общая площадь двух участков, заполненных водой, составила 25,2 см². Для контроля пропускания ТГц излучения на объект контроля были размещены маркеры из алюминиевой фольги размерами 40x40 и 15x30 мм, непрозрачные для терагерцового излучения. Кроме того, в образце присутствовал технологический участок без сот, в котором вследствие «сплавления» соседних ячеек имело место утолщение композита

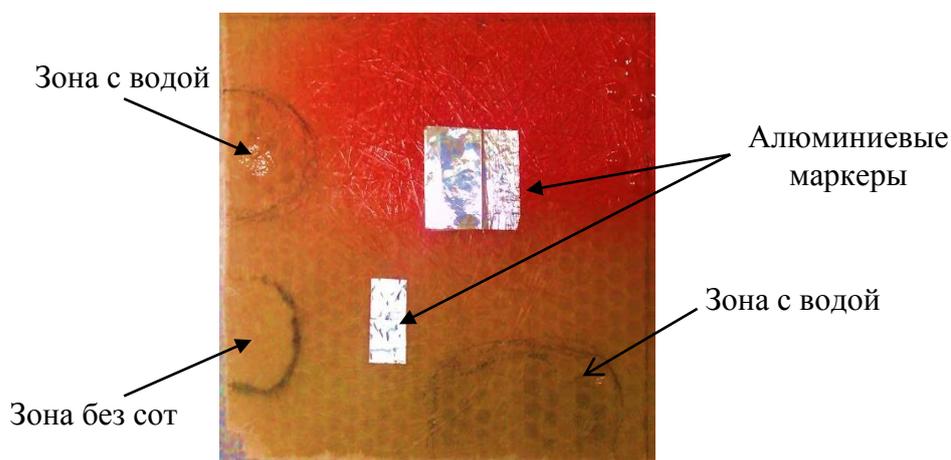


Рисунок 5.2 — Стеклопластиковая сотовая конструкция

5.4. Экспериментальные результаты

Для осуществления сканирования по двум координатам с шагом 40 мм объект контроля размещали на управляемом моторизованном стенде ZABER. В каждой позиции изделие контролировали в течение 2 секунд (время переходного процесса в мишени Тера-термоконвертора) при площади сечения ТГц луча в плоскости образца 1600 мм². Полное изображение изделия было «склеено» из 30-ти отдельных термограмм с применением метода анализа главных компонент [81]. Алюминиевые маркеры (Рисунок 5.3а) и скрытая вода (Рисунок 5.3б) практически полностью поглощали ТГц излучение, в то время как сам композит обнаружил существенную прозрачность.

Размытые границы ТГц изображений алюминиевых маркеров и неоднородная картина бездефектных участков обусловлены дифракцией миллиметровых ТГц волн. Видимые очертания технологического участка вызваны некоторым поглощением ТГц излучения на границах ячеек вследствие «спаивания» композита.

Для идентификации ячеек, заполненных водой, и сравнения с «непрозрачными» зонами, где происходит затухание ТГц излучения на границах раздела ячеек, анализировали 4 последовательности ИК изображений, относящихся соответственно к бездефектной зоне, участку с повышенной плотностью за счет спаивания ячеек, алюминиевым маркерам и ячейкам, наполненным водой (соответственно зоны 1,2,3,4 на Рисунок 5.3).

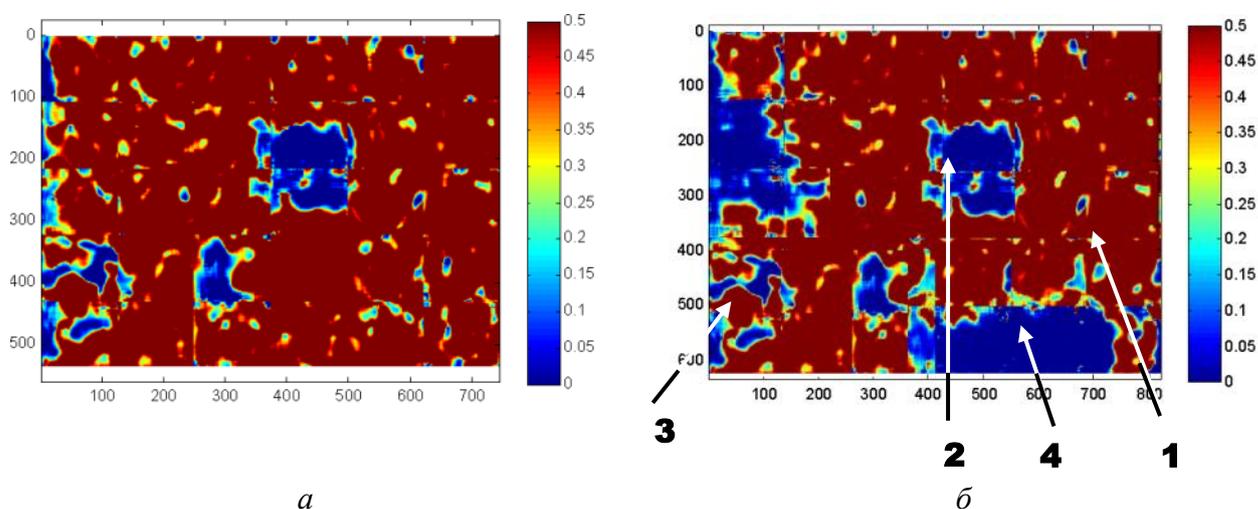


Рисунок 5.3 — «Склеенное» ТГц изображение стеклопластиковой сотовой конструкции:
а – сотовая конструкция без воды;
б – сотовая конструкция с водой

Графически изменение ТГц сигналов в отдельных участках контролируемого объекта представлено на Рисунке 5.4. Сигнал отсутствует в зоне маркеров и в участках с водой, в то время как в прозрачных зонах он нарастает до насыщения в течение нескольких секунд накопления вследствие нагрева мишени. Таким образом, ячейки сот, содержащие воду, эффективно обнаруживаются при накоплении сигнала в течение нескольких секунд.

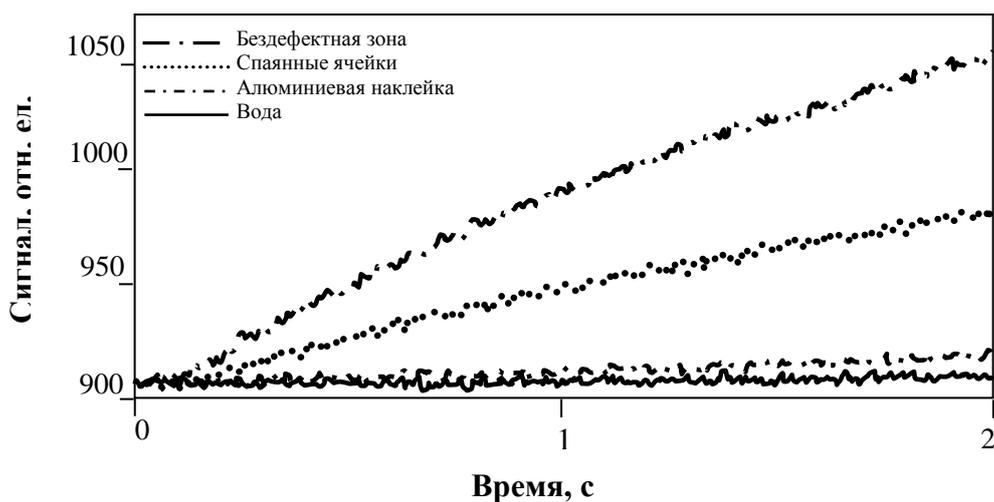


Рисунок 5.4 — Изменение ТГц сигнала в различных областях объекта контроля

Сравнительные испытания были проведены на том же образце с использованием стандартного метода активной ИК термографии. Нагрев производили двумя ксеноновыми импульсными лампами с общей энергией до 6 кДж. «Классическая» термограмма (Рисунок 5.5) полностью соответствовала ТГц изображению, однако характеризовалось более высоким пространственным разрешением вследствие использования полноформатного матричного ИК детектора.

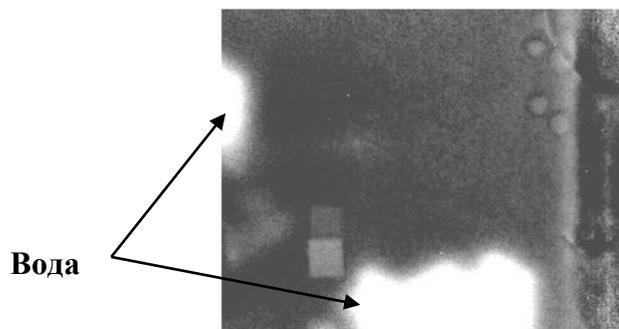


Рисунок 5.5 — ИК термограмма стеклопластиковой панели с двумя участками скрытой воды (метод односторонней активной ИК термографии)

5.5. Выводы по Главе 5

Электромагнитное излучение ТГц диапазона, которое является неионизирующим и легко проходит сквозь композиционные материалы, не содержащие углеродные волокна, может быть эффективно использовано для обнаружения воды в сотовых конструкциях, используемых в авиастроении. Скорость испытаний достигающая около $1 \text{ м}^2/\text{ч}$, позволяет осуществлять 100 %-й контроль объектов большой площади, однако необходимость двухстороннего доступа, трудоемкость наладки сканирующего оборудования и необходимость соблюдения определенных правил техники безопасности делают ТГц неразрушающий контроль скорее лабораторным, нежели практическим, способом испытаний, требующим дальнейших исследований.

Общие выводы

- Настоящие диссертационные исследования базируются на тезисе о том, что ранее полученные теоретические и практические результаты по ТК металлов и композиционных материалов и изделий целесообразно подвергнуть дальнейшей проработке с учетом новой аппаратной базы и методов компьютерной обработки изображений, ставя целью создание отечественного прототипа теплового дефектоскопа универсального применения. Следует признать, что в экспериментальном плане речь идет о выходе на мировой уровень, в то время как работы по созданию теории и технологии контроля находятся на уровне передовых зарубежных исследований и по ряду аспектов превосходят их.

- В диссертации решены следующие научно-технические задачи: 1) разработана методика активного ТК скрытой коррозии в металлических изделиях толщиной до 6 мм с количественным определением степени уноса материала в зонах с поперечным размером более 10 мм²; 2) разработана методика определения «поперечных» компонент анизотропных теплофизических характеристик (ТФХ) композиционных материалов на основе анализа изменения логарифмической Фурье-температуры объектов контроля во времени с использованием пространственной щелевой маски, задающей несущую пространственную частоту; 3) разработана методика проведения ТК металлических и композиционных материалов и изделий с применением источников нагрева и ИК тепловизоров различных типов, а также с использованием моделирующих программ и современных алгоритмов обработки «временных» последовательностей ИК изображений; 4) выполнен статистический анализ эффективности различных алгоритмов обработки нестационарных ИК термограмм (с применением корреляционного анализа, анализа главных компонент, Фурье- и вейвлет-преобразований); 5) разработан прототип экспериментального ИК теплового дефектоскопа с универсальным спектром применения для реализации вышеупомянутых способов ТК; 6) исследована возможность применения метода терагерцовой ИК термографии для контроля воды в композиционных сотовых конструкциях.

- В диссертации акцент сделан на получение практических рекомендаций по контролю коррозии задней стенки в металлических конструкциях, а также несплошностей и расслоений в композиционных материалах, в особенности, в углепластике, который является одним из основных конструкционных материалов при производстве самолетов

(в последнее время этот материал становится популярным в строительстве, энергетике и автомобилестроении).

- Число решений обратных задач активного ТК, используемых для дефектометрии, значительно меньше числа решений прямых задач. Это объясняется как чисто математическими трудностями решения некорректно поставленных задач, так и сравнительно низким уровнем применения количественного ТК в промышленности, где роль данного метода в большинстве случаев сводится к “чистой” дефектоскопии. В настоящем исследовании определены границы применимости ранее предложенной методики оценки степени уноса материала металлической стенки путем определения температурного контраста.

- Базируясь на опыте исследований ТПУ, обобщены алгоритмы обработки ИК изображений, включая тривиальную фильтрацию, полиномиальную аппроксимацию, Фурье- и вейвлет- преобразование, метод анализа главных компонент, корреляционный и статистический анализ. В качестве стандартного критерия эффективности вышеупомянутых алгоритмов в настоящих диссертационных исследованиях принято отношение сигнал/шум. Недостатком данного критерия является то, что он включает анализ пиксельных амплитуд без учета текстуры изображения, что в принципе может приводить к недооценке возможностей теплового метода, например, когда оператор идентифицирует дефектные отметки на фоне амплитудных шумов, но благодаря их специфическим геометрическим сигнатурам. Тем не менее, данный метод остается наиболее употребляемым в практике ТК.

- Выполнено теоретическое трехмерное моделирование задач ТК коррозии с помощью модифицированной программы ThermoCalc-3D. Разработан подход к определению предельных возможностей ТК коррозии на основе сравнения расчетных данных и экспериментальных значений шумового контраста C_n , который характеризует любой контролируемый материал. Например, при реалистическом значении $C_n \sim 5\%$ в стали толщиной 1 мм возможно обнаружение уноса материала до 3 %, а в стали толщиной 10 мм предельная обнаруживаемая коррозия составляет около 9 %.

- Проведены экспериментальные исследования стальных оболочек, включая исследование отдельных функциональных, эксплуатационных, технических характеристик лабораторной системы теплового контроля (определение требуемых пространственного разрешения и температурной чувствительности системы, необходимых для обнаружения коррозионных дефектов).

- Обобщены процедуры активного ТК изделий из углепластикового композита цилиндрической формы, включая оптическую, конвективную и ультразвуковую стимуляцию.
- Экспериментально определены параметры тепловых шумов при ТК углепластика. Установлено, что наружная поверхность цилиндрических углепластиковых изделий характеризуется шумом на уровне 4–8% независимо от процедуры испытаний.
- В стандартных образцах из углепластика при использовании двухсторонней процедуры обнаруживались все 9 дефектов в каждом образце на глубинах 1,64; 4,0 и 4,7 мм, причем как поперечные размеры, так и глубина залегания, дефектов слабо влияли на их обнаружение. В односторонней процедуре обнаруживались дефекты только на глубине 1,64 мм, что также соответствует предсказанию теории с учетом собственного шума углепластика. Оптимальным видом нагрева был оптический с помощью источника на галогенных лампах мощностью 30 кВт.
- Экспериментально определены поперечные компоненты температуропроводности углепластикового цилиндра с использованием щелевой маски. В частности, для углепластиковых цилиндров компоненты температуропроводности определены в следующем виде: $\alpha_x = 10,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (вдоль волокон намотки цилиндров) и $\alpha_y = 2,88 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (поперек волокон намотки цилиндров).
- Электромагнитное излучение ТГц диапазона, которое является неионизирующим и легко проходит сквозь композиционные материалы, не содержащие углеродные волокна, может быть эффективно использовано для обнаружения воды в сотовых конструкциях, используемых в авиастроении. Скорость испытаний достигающая около 1 м²/ч, позволяет осуществлять 100 %-й контроль объектов большой площади, однако необходимость двухстороннего доступа, трудоемкость наладки сканирующего оборудования и необходимость соблюдения определенных правил техники безопасности делают ТГц неразрушающий контроль скорее лабораторным, нежели практическим, способом испытаний, требующим дальнейших исследований.
- По результатам диссертационных исследований опубликовано 18 работ, в том числе 10 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (1 статья – в журнале с импакт-фактором более 2), и 3 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК. Получен 1 патент на изобретение и 2 патента на полезные модели. Результаты работы используются в Новоуральском научно-конструкторском центре (ООО «ННКЦ»), ФГУП ГосНИИ ГА, а также в учебном процессе в Томском политехническом университете.

Публикации автора

1. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Plesovskih A.B., **Chulkov A.O.** A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts - Composites: Part B: Engineering, 2015, Vol. 68, - 375-384 p.
2. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** Comparing thermal stimulation techniques in infrared thermographic inspection of corrosion in steel. - IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 2015, Vol. 81, -1-9 p.
3. **Chulkov A.O.**, Vavilov V.P., L. Gaverina, C. Pradere, J.-C. Batsale. Detecting hidden water in honeycomb composite structures by using Terahertz thermography - Russian Journal of Nondestructive Testing, 2015, №8. (принята к печати).
4. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Derusova D.A. Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity. - WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2014, Vol. 9, Issue 1, -251-260 p.
5. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** Thermal NDT of Composites in the Aero Space Industry: A Quantitative Approach - Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing. 2014, Brno, -1-10 p.
6. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Shiryayev V.V., **Chulkov A.O.** An apparatus for the active thermal testing of corrosion in steel cylindrical containers and test results. - Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, Vol. 49, №. 11, 619-624 p.
7. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Derusova D.A. 'Classical' Thermal NDT of Hidden Defects: Passing from Defection to Defect Characterization - Latest Trends in Applied and Theoretical Mechanics: Proceedings of the 10th International conference on applied and theoretical mechanics (MECHANICS '14), 2014, Italy, -206-212 p.
8. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation - Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2014, Vol. 9105, № 91050, -1-7p.
9. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** Detecting corrosion in thick metals by applying active IR thermography - Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012, Vol. 8354, -1-12 p.
10. Vavilov V.P., **Chulkov A.O.**, Derusova D.A. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University, Russia - Proceedings 1st Asia QIRT, 2015, India, - 9 p. (avail. on CD).
11. Sojasi S., Maldague X., Vavilov V.P., **Chulkov A.O.** et.al. Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto Criterion – Proceedings of NDT in Canada 2015 Conference, 2015, - 8p.
12. Чулков А.О., Вавилов В.П., Л. Гаверина, К. Прадере, Ж.-К. Батсаль. Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии. - Дефектоскопия, 2015, №8, -72-76 с.
13. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., **Чулков А.О.** Установка и результаты активного теплового контроля коррозии в стальных цилиндрических контейнерах. - Дефектоскопия, 2013, № 11, -15-20 с.
14. Вавилов В.П., Швидерски В., **Чулков А.О.**, Дерусова Д.А. Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения. - «В мире неразрушающего контроля» №2(64) 2014, - 47-54 с.

15. Вавилов В.П., **Чулков А.О.** Анализ влияния "черного"покрытия на обнаружение коррозии в алюминии методом активной инфракрасной термографии. - Вестник науки Сибири, 2014, №.2(12), -40-45 с. Электронный ресурс, Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/992>.
16. Дерусова Д.А., **Чулков А.О.** Неразрушающий контроль ударных повреждений в углерод-углеродном композите методом ультразвуковой ИК термографии. - Международный научно-исследовательский журнал. 2014, №. 1(20), -45-48 с.
17. **Чулков А.О.** Экспериментальное определение коррозии в стальных изделиях методом активной инфракрасной термографии. - Международный научно-исследовательский журнал. 2014, №. 1(20), -48-51 с.
18. **Чулков А.О.** Энергоэффективный тепловой дефектоскоп на базе светодиодного источника нагрева для определения теплофизических характеристик и оценки коррозии металлических конструкций, используемых в атомной энергетике. - Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума. 2014, Т.1, -11-15 с.
19. Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.** Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий - Патент на полезную модель № 142185(13) U1, дата приоритета 03.12.2013, Опубликовано: 20.06.2014. Бюл. № 17.
20. Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.** Тепловой дефектоскоп - Патент на полезную модель № 144096(13) U1, дата приоритета 12.03.2014, Опубликовано: 10.08.2014. Бюл. № 22.
21. Вавилов В.П., Ширяев В.В., **Чулков А.О.** Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел - Патент на изобретение № 2549549(13) С1, дата приоритета 26.03.2014, Опубликовано: 27.04.2015. Бюл. № 12.

Список использованных источников

1. Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. - М., Радио и связь, 1984 - 162 с.
2. Попов Ю.А., Карпельсон, Строков В.А. и др. Тепловой контроль качества многослойных изделий. - Дефектоскопия, 1976, №3. - 76-81 с.
3. Вавилов В.П., Горбунов В.И., Кузнецов В.Б. Теоретическое исследование одной из задач теплового контроля точечных сварных швов. - Дефектоскопия, 1973, №1, - 21-27 с.
4. Данилин Н.С., Бакланов О.Д., Загоровский Ю.И. Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем. - М.: Изд. МО СССР, 1974, - 164 с.
5. Бекешко Н.А., Попов Ю.А. Контроль диаметра литой зоны точечных сварных соединений с помощью визуализации тепловых полей. - Дефектоскопия, 1972, №6, - 86-90 с.
6. Бекешко Н.А., Попов Ю.А. Контроль диаметра литой зоны точечных сварных соединений с помощью визуализации тепловых полей. - Дефектоскопия, 1972, №6, - 86-90 с.
7. Вавилов В.П., Горбунов В.И., Кузнецов В.Б. Теоретическое исследование одной из задач теплового контроля точечных сварных швов. - Дефектоскопия, 1973, №1, - 21-27 с.
8. Брагина Л.А., Вавилов В.П., Иванов А.И. и др. Контроль дефектов диффузионной сварки выпрямительных элементов активным тепловым методом. - Дефектоскопия, 1983, №5, 69-70 с.
9. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Танасейчук С.Ю. Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений. - Дефектоскопия, 1978, № 10, - 63-67 с.
10. Куц Д.В., Рапопорт Д.А., Будадин О.Н. Обратная задача автоматизированного теплового контроля. - Дефектоскопия, 1988, № 5, - 64-68 с.
11. Вавилов В.П., Ширяев В.В.. Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле. - Дефектоскопия, 1979, № 11, - 63-65 с.
12. Бекешко Н.А., Попов Ю.А. Контроль качества точечных сварных соединений термографическим методом. // Дефектоскопия, 1971. №3. С. 123-127.
13. Вавилов В.П., Горбунов В.И., Епифанцев Б.Н. Двумерная задача тепловой дефектоскопии при конвективном теплообмене изделия с окружающей средой. - Дефектоскопия, 1974, № 2, - 41-47 с.
14. Синеглазов В.М., Кеткович А.А. Активная тепловая интроскопия. - Техника, Киев, 1990, -110 с.
15. Тиванов Г.Г. Анализ математических моделей, используемых при тепловом контроле качества композиционных материалов - Дефектоскопия, 1987, № 5, - 83-85 с.
16. Vavilov V., Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures. - "Res. Techn. in NDT", ed. by R. Sharpe. 5, 1982, Academic Press, London, U.K., - 239-280 p.
17. Вавилов В.П., Иванов А.И. Импульсный тепловой контроль многослойных изделий - Дефектоскопия, 1984, № 6, - 39-47 с.
18. Вавилов В.П., Касаткин М.А. Тепловой контроль поверхностных усталостных трещин в жаропрочных сплавах. - Дефектоскопия, 1988, № 3, - 32-38 с.
19. Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. - Киев, Техника, 1988, - 128 с.
20. Ранцевич В.Б. Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость. - Дефектоскопия, 1977, №5, - 102-108 с.

21. Вавилов В.П., Касаткин М.А. Тепловой контроль жаропрочных никелевых сплавов. - Дефектоскопия, 1990, № 4, 51-54 с.
22. Стороженко В.Щ., Мельник С.И., Орел Р.П. Новый алгоритм теплової томографії. - Методи та прилади контролю якості, 1999, №4, - 26-30 с.
23. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е. Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. - М.: Наука, 2002, - 476 с.
24. Будадин О.Н. Тепловой метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, изделий и конструкций. - Докторская диссертация по специальности 05.02.11 - Методы контроля и диагностика в машиностроении, Санкт-Петербург, СЗПИ, 2001, - 564 с.
25. Бажанов С.А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств. Библиотечка электротехника. - Прилож. журн. «Энергетик», М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2000, -76 с.
26. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применения. - М.: Интел универсал, 2002, - 88 с.
27. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. Библиотечка электротехника - Прилож. журн. «Энергетик», М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2002, - 82 с.
28. Вавилов В.П. Тепловой контроль - Справочник «Неразрушающий контроль», том 5, М.: Машиностроение, 2004, -361-9 с.
29. Вавилов В.П., Маринетти С., Чернуски Ф., Роба Д. Тепловой неразрушающий контроль теплозащитных покрытий турбинных лопаток. - Дефектоскопия, 2005, №7, - 74-83 с.
30. Абрамова Е.В. Оптимизация диагностических систем теплового контроля. Докторская диссертация по специальности 05.11.13-Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, Москва МНПО «Спектр», 2011, - 220 с.
31. Торгунаков В.Г. Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей. - Докторская диссертация по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, Томский политехнический университете, г. Томск, 2006, - 409 с.
32. Захаренко В.Г. Инфракрасные и световые средства теплового контроля: разработка, исследование, метрологическое обеспечение и внедрение. - Докторская диссертация по специальности 05.11.13-Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, Омский технический университете, г. Омск, 2012, - 375 с.
33. Будадин О.Н. Тепловой метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, изделий и конструкций. - Докторская диссертация по специальности 05.02.11 - Методы контроля и диагностика в машиностроении, Северо-западный государственный заочный технический университет, г. Санкт-Петербург, 2001, - 361 с.
34. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и неразрушающий контроль. - М.: Спектр, 2013, - 547 с.
35. Епифанцев Б.Н. Дистанционная диагностика подземных трубопроводов по тепловому излучению. - Дефектоскопия, 2014, № 5, - 9-13 с.
36. Вавилов В.П., Швидерски В., Чулков А.О., Дерусова Д.А. Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения. - «В мире неразрушающего контроля» №2(64) 2014, - 47-54 с.
37. Alcott J. An investigation of nondestructive inspection equipment: Detecting hidden corrosion on USAF aircraft. - Mater. Evaluation, 1994, № 5, - 64-73 p.
38. Burleigh D. A portable, combined thermography/shearography NDT system for inspecting large composite structures. - Proc. SPIE "Thermosense-XXIV", 2002, Vol.4710, -578-587 p.
39. Vavilov V.P., Burleigh D.D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. - NDT & E International, 73 (2015), - 28-52 p.

40. DelGrande N.K., Durbin P.F. Dual-band IR imaging to defect corrosion damage within airframes and concrete structures. - Proc. SPIE "Thermosense XVI", 1994, Vol. 2245, -202-209 p.
41. Mohammed Abuhamad. Spektrale information in der thermographie. - Universitat des Saarlandes, Deutschland, 2011, - 140 p.
42. Cramer K.E., Jacobstein R., Reilly T. Boiler tube corrosion characterization with a scanning thermal line - Proc. SPIE "Thermosense XXIII". - Orlando, 2001, Vol. 4360, - 594-605 p.
43. Maldague X. Pipe inspection by IR thermography: NDT solution. - Mater. Evaluation, 1999, Vol. 57, № 9, - 899-902 p.
44. Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. - Киев, Техника, 1988, - 128 с.
45. Денисов С.С., Волков Я.А., Стороженко В.А., Рапопорт Д.А. Сканирующая оптическая головка для активного неразрушающего контроля. - Дефектоскопия, 1975, №6, - 116-118 с.
46. <http://www.thermalwave.com>
47. <http://www.automatica-munich.com>
48. <http://www.automationtechnology.de>
49. <http://www.edevis.com>
50. <http://www.infratec.de>
51. Balageas D.L., Krapez J.-C, Cielo P. Pulsed photo-thermal modeling of layered materials. - J. Appl. Physics, 1986, Vol. 59, № 2, 348-357 с.
52. Vavilov V., Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures. - "Res. Techn.in NDT", ed. by R.Sharpe, 1982, Vol. 5, - 239-280 p.
53. Vavilov V.P. Modeling thermal NDT problems. - International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, Vol. 72, - 75-86 p.
54. Vavilov V.P. Modeling and characterizing impact damage in carbon fiber composites by thermal/infrared non-destructive testing. - Composites Part B: Engineering, 2014, Vol. 6, - 1-10 p.
55. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Plesovskih A.B., Chulkov A.O. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts - Composites: Part B: Engineering, 2015, Vol. 68, - 375-384 p.
56. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, Wiley series in microwave and optical engineering. - New York: John Wiley & Sons, 2001, -682 p.
57. Vavilov VP. Pulsed thermal NDT of materials: back to basics. - Nondestructive Testing and Evaluation, 2007, №22(23), - 177-97 p.
58. Vavilov V. Thermal/infrared nondestructive testing. - NDT handbook series. Moscow. Spektrum, 2009, Vol. 5, - 467 p.
59. Nondestructive testing handbook. «Infrared and thermal testing», Bellingham, USA, 2001, Vol. 3, - 714 p.
60. Vavilov V, Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures. - Research techniques in NDT In: Sharpe R, editor., 1982, Vol. 5, London: Academic Press, -239-80 p.
61. Shepard S. Advances in pulsed thermography. Proceedings of SPIE "Thermosense-XXIII" 2001, V. 4360, - 511-5 p.
62. Degiovanni A, Lamine A-S, Houlbert A-S, Maillet D. Identification of subsurface defects using a sensibility analysis. - Proceedings of the 4th European Conference on Composite Materials, Stuttgart, Germany, 1990, - 691-695 p.
63. Krapez J-C, Balageas DL. Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography. - Proceedings of the Quantitative Infrared Thermography, Sorrento, Italy, 23-26 August, 1994, -260-266 p.

64. Mailliet D, Andre S, Batsale J-C, et al. Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms. - England: John Wiley & Sons Publisher, 2000, -360 p.
65. Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. - *Appling Physic*, 1996, Vol. 79, -2694-8 p.
66. Galmiche F, Vallerand S, Maldague X. Wavelet transform applied to pulsed phase thermography. In: Grinzato E, Bison P, Mazzoldi A, editors. - *Proceedings of the V-th Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications*. Venice, Italy: CNR, 1999, - 22-117 p.
67. Rajic N. Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures. - *Composite Structure*, 2002, Vol. 58(4), -521-8 p.
68. Shepard S. Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences. - U.S. Patent № 6516084, 2003.
69. Grinzato E, Bison PG, Marinetti S, Vavilov V. Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography. - *Research in NDE*, 5, New York: Springer-Verlag, 1994, -251-71 p.
70. Balageas D, Roche J-M. Common tools for quantitative time resolved pulse and step-heating thermography part I: theoretical basis. - *Proceedings of the Quantitative Infrared Thermography*, 2014, №11 (1), -10-28 p.
71. ThermoFit Pro operation manual. Tomsk, Russia, Innovation, 2002, -87 p.
72. Vavilov V. Dynamic thermal tomography: recent improvements and applications. - *NDT E Int*, 2015, №71, -23-32 p.
73. Vavilov V.P., Jin H., Thomas R., Favro L. Experimental thermal tomography of solids by using pulsed one-sided heating. - *Defectoscopiya (Rus J NDT)*, 1990, № 12, -8-122 p.
74. Bajorek M, Nowakowski A. Analysis of the possibility of defect determination using cold excitation in thermal tomography. - *Proceedings of the 10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Québec, Canada, 2010, - 18 p. [available on CD].
75. Ringermacher H.I., Howard D.R., Knight B. Thermal imaging NDT at General Electric – *Proceedings of 18th WCNDT*, Durban, South Africa, 2012, - 14 p. [available on CD].
76. Ibarra-Castanedo C, Gonzalez D, Galmiche F, Maldague XP, Bendada A. Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data. - *Proceedings of SPIE “Thermosense-XXVIII”*, 2006, Vol. 6205 -112-17 p.
77. Gonzales D, Ibarra-Castanedo C, Madruga F, Maldague XP. Analysis of pulsed thermographic sequences based on Radon transform. - *Proceedings of SPIE “Thermosense-XXVIII”*, 2006, Vol. 6205, - 1-17 p.
78. Ciliberto A, Cavaccini G, Salvetti O, et al. - Porosity detection in composite aeronautical structures. *Infrared Physic Technology*, 2002, №43, - 43-139 p.
79. Shark L.K., Matuszewski B.J., Smith J.P., Varley M.R. Automatic feature-based fusion of ultrasonic, radiographic and shearographic images for aerospace NDT. – *Insight*, 2001, №43(9), -607-15 p.
80. Vavilov V.P., Chulkov A.O. Detecting corrosion in thick metals by applying active IR thermography - *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, Vol. 8354, -1-12 p.
81. Чулков А.О., Вавилов В.П., Л. Гаверина, К. Прадере, Ж.-К. Батсаль. Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии. - *Дефектоскопия*, 2015, №8, -72-76 с.
82. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Чулков А.О. Установка и результаты активного теплового контроля коррозии в стальных цилиндрических контейнерах. – *Дефектоскопия*, 2013, № 11, -15-20 с.
83. Vavilov V.P., Chulkov A.O. Thermal NDT of Composites in the Aero Space Industry: A Quantitative Approach - *Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing*. 2014, Brno, -1-10 p.

84. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University, Russia - Proceedings 1st Asia QIRT, 2015, India, - 9 p. (avail. on CD).
85. Sojasi S., Maldague X., Vavilov V.P., **Chulkov A.O** et.al. Infrared Testing of CFRP Components: Comparisons of Approaches using the Tanimoto Criterion – Proceedings of NDT in Canada 2015 Conference, 2015, - 8 p.
86. Zalameda J.N., Winfree W.P. Improved sampling of thermal transients using Focal Plane Array infrared imagers. - Proc. SPIE “Thermosense-XXVI”, 2004, Vol. 5405, -374-381 p.
87. Winfree W.P., J.N. Zalameda J.N. Single sided thermal diffusivity imaging in composites with a shuttered thermographic inspection system. – Proceedings of SPIE “Thermosense-XXIV”, 2002, Vol. 4710, -536-544 p.
88. Вавилов В.П., С. Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье. – Дефектоскопия, 1999, №2, -58-72 с.
89. Almond D., Patel P. Photothermal science and techniques. - Chapman & Hall, London, 1996, -242 p.
90. Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Bales M. Inversion for Hidden Corrosion Characterization: Theory and Applications. - Intern. J. Heat & Mass Transfer, 1996, Vol. 39, -355-371 p.
91. Grinzato E., Vavilov V. Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling. - Rev. Generale Termique, 1998, Vol.37, No.8, -669-679 p.
92. Vavilov V.P., Vavilova E.V., Popov D.N., Statistical Analysis of Human Body Asymmetry as the Basis for Detecting Pathologies by means of IR Thermography. - Proceedings SPIE “Thermosense-XXIII”, 2001, Vol. 4360, -482-491 p.
93. Vavilov V. Evaluating the efficiency of data processing algorithms in transient thermal NDT. - Proceedings SPIE “Thermosense XXVI”, 2004, Vol. 5405, -336-347 p.
94. Vavilov V.P., Chulkov A.O. Comparing thermal stimulation techniques in infrared thermographic inspection of corrosion in steel. - IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 2015, Vol. 81, -1-9 p.
95. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity. - WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2014, Vol. 9, Issue 1, -251-260 p.
96. Vavilov V.P., Chulkov A.O. Thermal NDT of composites in the Aero Space industry: A quantitative approach - The e-Journal of Nondestructive Testing. 2014, Vol.19, N.12, -1-10 p.
97. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Shiryayev V.V., Chulkov A.O. An apparatus for the active thermal testing of corrosion in steel cylindrical containers and test results. - Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, Vol. 49, №. 11, 619-624 p.
98. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. 'Classical' Thermal NDT of Hidden Defects: Passing from Defection to Defect Characterization - Latest Trends in Applied and Theoretical Mechanics: Proceedings of the 10th International conference on applied and theoretical mechanics (MECHANICS '14), 2014, Italy, -206-212 p.
99. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation - Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2014, Vol. 9105, № 91050, -1-7p.
100. Вавилов В.П., Чулков А.О. Анализ влияния "черного" покрытия на обнаружение коррозии в алюминии методом активной инфракрасной термографии. - Вестник науки Сибири, 2014, №.2(12), -40-45 с. Электронный ресурс, Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/992>.
101. Дерусова Д.А., Чулков А.О. Неразрушающий контроль ударных повреждений в углерод-углеродном композите методом ультразвуковой ИК термографии. - Международный научно-исследовательский журнал. 2014, №. 1(20), -45-48 с.

102. Чулков А.О. Экспериментальное определение коррозии в стальных изделиях методом активной инфракрасной термографии. - *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014, №. 1(20), -48-51 с.
103. Чулков А.О. Энергоэффективный тепловой дефектоскоп на базе светодиодного источника нагрева для определения теплофизических характеристик и оценки коррозии металлических конструкций, используемых в атомной энергетике. - *Интеллектуальные энергосистемы: материалы II Международного молодежного форума*. 2014, Т.1, -11-15 с.
104. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О. Тепловой дефектоскоп для неразрушающего контроля цилиндрических металлических изделий. - Патент на полезную модель № 142185(13) U1, дата приоритета 03.12.2013, Опубликовано: 20.06.2014. Бюл. № 17.
105. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О. Тепловой дефектоскоп. - Патент на полезную модель № 144096(13) U1, дата приоритета 12.03.2014, Опубликовано: 10.08.2014. Бюл. № 22.
106. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Чулков А.О. Устройство для бесконтактного определения коэффициента температуропроводности твердых тел. - Патент на изобретение № 2549549(13) C1, дата приоритета 26.03.2014, Опубликовано: 27.04.2015. Бюл. № 12.
107. Vavilov V.P. Pulsed thermal NDT of materials: Back to basics. - *Nondestr. Testing & Evaluation*, Taylor & Fransis, Great Britain, 2007, Vol. 22, №. 2-3, ISSN 1058-9759, -177-198 p.
108. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. - *J. Appl. Physics*, 1961, Vol. 32, -1679-1684 p.
109. Krapez J.-C., Spagnolo L., Frieß M. Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography. - *Intern. J. of Thermal Sciences*, 2004, Vol. 43, -967-977 p.
110. Philippi I., Batsale J.-C., Maillet D., Degiovanni A. Measurements of thermal diffusivities through processing of infrared images. - *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, Vol. 66(1), -223-229 p.
111. Bison P.G., Grinzato E., Marinetti S. Local thermal diffusivity measurement. - *J. Quant. Infr. Thermogr.*, 2004, Vol. 1, № 2, -241-250 p.
112. Вавилов В.П., Нестерук Д.А. Способ тепловизионного контроля воды в авиационных сотовых панелях эксплуатируемых самолетов. - Патент на способ, № 2284515 C1, дата приоритета 30.03.2005, Опубликовано: 27.09.2006. Бюл. № 27.
113. Д.А. Нестерук. Тепловизионный контроль воды в сотовых конструкцияях самолетов. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbruecken , Germany, 2012.-188 С.
114. Hu B. B., Nuss M. C., and Hu B. B. Imaging with terahertz waves. - *Opt. Lett*, 1995, №20 (16), -1716-1718 p.
115. Jepsen P. U., Cooke D. G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging - modern techniques and applications. - *Laser & Photon*, 2011, № 5(1), - 124-166 p.
116. Kulipanov G. N., Gavrilov N. G., Knyazev B. A. et al. Research highlights from the Novosibirsk 400 W average power THz FEL. - *Terahertz Sci. Technology.*, 2008, № 1(2), - 107-125 p.
117. Pradere C., Caumes J.P., Balageas D., Salort S., Abraham E., Chassagne B, Batsale J.C.. Photothermal converters for quantitative 2D and 3D real-time TeraHertz imaging. - *Quantitative InfraRed Thermography*, 2010, Vol. 7, № 2, ISSN: 1768-6733, -217-235 p.

Акты использования результатов диссертационных исследований

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной деятельности

Боровиков Ю.С.

08

2015 г.

СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы А.О. Чулкова «РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ», представленной по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», в учебном процессе в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Диссертационные исследования А.О. Чулкова связаны с: 1) разработкой универсальной аппаратуры активного теплового неразрушающего контроля изделий из металлов и композитов; 2) испытаниями цилиндрических изделий из стали и углепластика; 3) разработкой методик проведения испытаний тепловым методом.

На кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» Национального исследовательского Томского политехнического университета материалы вышеуказанной диссертации использованы при подготовке и проведении курса «Тепловой контроль» в рамках бакалаврской программы обучения, включая лекционные материалы раздела «Теплопередача и моделирование задач теплопроводности» и лабораторные работы «Измерение теплопроводности материалов», «Обработка данных активного теплового контроля», «Коэффициент теплового излучения твердого тела» и «Численное моделирование тепловых процессов», вошедшие в учебное пособие «Тепловой контроль и диагностика. Сборник лабораторных работ».

Заведующий кафедрой «Физические методы и приборы контроля качества»,
д.ф.-м.н., профессор

А.П. Суржигов



Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Общество с ограниченной ответственностью
«НОВОУРАЛЬСКИЙ НАУЧНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ЦЕНТР»
(ООО «ННКЦ»)

ул. Дзержинского, д. 2, г. Новоуральск, Свердловская обл., Россия, 624130
ОГРН-1076629000700, ИНН/КПП 6629020806/662901001
код по ОКПО 81772823, код по ОКВЭД 73.10
р/с 40702810928050005063 в филиале ОАО Банк ВТБ г. Екатеринбург
кор/счет 3010181040000000952 № БИК 046577952, ИНН банка - 7702070139
Телетайп: 348811, КОНДОР, Факс: (34370) 98268, e-mail: nrdc@nrdc.ru

УТВЕРЖДАЮ

И.О. генерального директора ООО «ННКЦ»

М.Ю. Мурашкин

2015 г.



СПРАВКА №

27/01/2990-Вк от 03.07.2015
об использовании результатов диссертационной работы А.О. Чулкова
«РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО
КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ИЗДЕЛИЙ»,

выполненной в Национальном исследовательском Томском политехническом
университете и представленной по специальности 05.11.13 «Приборы и методы
контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Диссертационная работа А.О. Чулкова посвящена исследованиям, направленным на дальнейшую разработку и совершенствование метода и аппаратуры активного теплового контроля композитных материалов и металлов.

Научные результаты диссертации в части испытаний композиционных материалов, применяемых в ядерной энергетике, а именно, методика контроля скрытых дефектов в цилиндрических изделиях из углепластика и экспрессного определения анизотропных теплофизических характеристик, а также рекомендации по выбору узлов системы теплового (инфракрасного) контроля вышеуказанных дефектов в составе тепловизора, источников нагрева и алгоритма обработки информации, использованы в ООО "Новоуральский научно-конструкторский центр" при внедрении системы и методики теплового контроля ответственных изделий, разрабатываемых нашим предприятием.

Начальник лаборатории ФМИ ООО "ННКЦ"

Б.Д. Маранц

Ведущий специалист ЛФМИ ООО "ННКЦ"

А.В. Плесовских

Исп. Плесовских А.В.
+7 (34370) 28-171



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНТРАНС РОССИИ)
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
(ФГУП ГосНИИ ГА)

ул. Михалковская, д.67, корп.1, г. Москва
Российская Федерация, 125438
тел. 8 (495) 450-26-15, 8 (495) 601-46-31, тел./факс 8 (495) 450-62-06
e-mail: gosniiga@gosniiga.ru, www.gosniiga.ru

24.08.2015 № 137-07-1025

На № _____ от _____

Ученому секретарю
диссертационного совета
Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО
НИ ТПУ «Национальный ис-
следовательский Томский по-
литехнический университет»

Васендиной Е.А.

634028, г. Томск, ул. Савиных, 7.

[по вопросу использования результатов работы]
Чулкова А.О.

В диссертационной работе Чулкова А.О. «РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АППАРАТУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ», выполненной в Национальном исследовательском Томском политехническом университете и представленной по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» приведены результаты разработки аппаратуры и технологии теплового неразрушающего контроля изделий из металлов и неметаллов. Значительная часть исследований посвящена испытаниям композиционных материалов, используемых в конструкциях современных гражданских воздушных судов (ВС).

Научное сотрудничество между ГосНИИ гражданской авиации и Национальным исследовательским Томским политехническим университетом существует в течение многих лет, в частности, в области разработки методики обнаружения скрытой воды в сотовых конструкциях эксплуатируемых самолетов Ту-204, Ту-214, Ил-96-300, RRJ-95B.

В диссертации А.О. Чулкова проведены научные исследования особенностей теплового контроля анизотропных композиционных материалов, предложена обобщенная методика испытаний, основанная на применении нагревателей и тепловизоров различного типа, а также проведены сравнительные испытания алгоритмов обработки тепловизионных изображений, что является важным при разработке технологий теплового контроля.

В ГосНИИ ГА при исследовании композиционных агрегатов самолета RRJ-95B «Суперджет» таких как, панели крыла, элеронов, закрылков, рулей высоты и направления использованы конкретные результаты контроля монолитных и сотовых панелей из композитов с дефектами типа расслоений и непроклеев, а также углепластиковых панелей с дефектами типа ударных повреждений.

Рекомендации по комплектации портативной установки теплового контроля использованы в ГосНИИ ГА при разработке ТЗ на создание новой экспериментальной аппаратуры теплового контроля, которая в дальнейшем может быть внедрена в процессы технического обслуживания.

Заместитель генерального
директор НЦ ПЛП
К.Т.Н.

Исп. Миколайчук Ю.А.
Т. (495) 450-66-51



М.С. Громов