

СПРАВОЧНИК

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*Справочник в 7 томах
под редакцией чл.-корр. РАН
В.В. КЛЮЕВА*

Том 5

В.П. Вавилов

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

Книга 1

**К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева,
Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Книга 2



МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2004

УДК [681.2+620](035)

ББК 30.82

Н 54

Н 54 **Не разрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева.**
Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. /В.П. Вавилов. Кн. 2: Электрический контроль. /К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужижский. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.: ил. и цветная вкладка 24 с.

В первой книге рассмотрены физические модели теплового контроля (ТК), теплопередача в дефектных и бездефектных структурах, теплофизические свойства материалов, оптимизация процедур ТК, тепловая дефектометрия, обработка данных в ТК, системы активного и пассивного ТК, элементы статистической оценки данных и принятия решений, области применения ТК, аттестация специалистов в области ТК, нормативные документы, типовая программа подготовки персонала по ТК и рекомендуемые вопросы общего экзамена по ТК.

Во второй книге рассмотрены основы электрического неразрушающего контроля, свойства электрических материалов, методы и средства измерения электрических величин и способы реализации электрического контакта, прежде всего с подвижными элементами объектов контроля; различные электропараметрические методы (электрорезистивные, электроемкостные, электропотенциальные, электростатические порошковые и др.) и генераторные методы (термоэлектрические, трибоэлектрические, электрофлюктуационные и др.) электрического НК. Для каждого из методов изложены: назначение, область применения, принцип контроля, сущность, разновидности и особенности технической реализации с примерами конкретных средств НК.

Для специалистов промышленности, работников служб контроля, эксплуатации и ремонта, а также для специалистов, обслуживающих медицинскую и таможенную технику, может быть полезен преподавателям и студентам вузов.

ISBN 5-217-03237-5(Т. 5. кн. 1, кн. 2)
ISBN 5-217-03185-9

© НИИИИ МНПО «Спектр», 2004
© Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Книга 1. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ (В.П. Вавилов) 9

ПРЕДИСЛОВИЕ 9

Глава	1. ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ..	12
	1.1. Терминология ТК	12
	1.2. Модели активного ТК ..	20
	1.3. Базовые процедуры ТК	24

Глава	2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В БЕЗДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ	26
	2.1. Механизмы теплопередачи	26
	2.2. Дифференциальное уравнение теплопроводности	28
	2.3. Теплофизические характеристики (ТФХ) материалов	30
	2.4. Классические решения теории теплопроводности	32
	2.5. Информативные параметры ТК	37
	2.6. Прямые и обратные задачи ТК	41
	2.7. Анализ классических решений теории теплопроводности	43

Глава	3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ	56
	3.1. Методы решения задач ТК	56
	3.2. Одномерные модели ТК ...	64
	3.3. Двухмерные модели ТК ...	79
	3.4. Простая трехмерная модель обнаружения поверхностной вертикальной трещины при нагреве полупространства движущимся тепловым источником	81

3.5. Трехмерная адиабатическая задача ТК	82
3.6. Обобщенная трехмерная модель ТК (трехслойная анизотропная неадиабатическая пластина с произвольными емкостными дефектами)	84
3.7. Условия обнаружения сигналов от внутренних дефектов	85
3.8. Основные функциональные зависимости температурных сигналов от параметров изделия и дефекта при импульсном ТК	86
3.9. Оптимальные параметры обнаружения. Примеры	104
3.10. Развитые модели ТК	109

Глава 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ (ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ)

4.1. Дефектометрия на основе анализа температурного отклика на передней поверхности пластины после импульсного нагрева	117
4.2. "Индивидуальные" функции инверсии	120
4.3. Обобщенные формулы инверсии	120
4.4. Упрощенные формулы инверсии	121
4.5. Тепловая дефектометрия резистивных дефектов в пространстве Лапласа	123
4.6. Тепловая дефектометрия путем минимизации функционала невязки (метод нелинейной фильтрации)	125
4.7. Определение поперечных размеров дефектов	127

Глава 5. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ

5.1. Метод оптимального наблюдения	133
--	-----

	5.2. Метод раннего наблюдения	133		7.2. Коммерческие системы ТК	199
	5.3. Метод динамической тепловой томографии (максиграммы и таймограммы)	134		7.3. Источники тепловой стимуляции объектов ТК	203
	5.4. Адаптивная тепловая томография	137		7.4. Системы построения изображений в ИК-диапазоне (тепловизоры)	209
	5.5. Метод импульсной фазовой термографии (Фурье-анализ температурной динамики) .	138		7.5. Приемники оптического излучения	210
	5.6. Метод вейвлет (волновых)-образов	143		7.6. Оптика тепловизоров	220
	5.7. Тепловая дефектометрия ..	145		7.7. Основные характеристики тепловизоров	222
	5.8. Количественная оценка скрытой коррозии	146		7.8. Современные тепловизоры	224
	5.9. ИК-термография на тепловых волнах	146		7.9. Линейные ИК-сканеры	243
	5.10. Аппроксимация и сглаживание динамических температурных функций	150		7.10. Инфракрасные термометры (пирометры)	245
	5.11. Нормализация динамических термограмм	157	Глава	7.11. Эталонные источники (модели АЧТ)	249
	5.12. Метод движущегося источника	160		7.12. Контактные датчики температуры	250
	5.13. Комбинирование ТК и других методов НК (синтез данных)	165		8. ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДАННЫХ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	257
	5.14. Анализ тепломеханических эффектов в твердых телах	168		8.1. Параметры обнаружения дефектов в ТК	257
	5.15. Элементы искусственного интеллекта в ТК (нейронные сети)	172		8.2. Статистические показатели принятия решений	257
	5.16. Метод анализа главных компонент	174		8.3. Карта дефектов	264
	5.17. Стандартная обработка ИК изображений	175	Глава	8.4. Распознавание образов в ТК	265
				8.5. Шумы в ТК	267
Глава	6. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	179		9. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ	272
	6.1. Краткий обзор развития ИК техники и тепловидения ...	179		9.1. Административные, производственные и жилые здания	279
	6.2. Базовые понятия теории теплового излучения	182		9.2. Активный ТК производства искусства	291
Глава	7. СИСТЕМЫ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ	199		9.3. Дымовые трубы	295
	7.1. Системный подход к проектированию устройств активного ТК	199		9.4. Электротехнические устройства	298
				9.5. Теплотехнические устройства	307
				9.6. Атомные станции	313
				9.7. Авиакосмическая техника	313
				9.8. Нефтехимическое производство	330
				9.9. Радиозлектроника	333
				9.10. Листовой металлопрокат	336

9.11. Сварные и паяные соединения	338	Книга 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	395
9.12. Прогнозирование срока службы режущего инструмента определением его интегральной температуропроводности ..	344	ВВЕДЕНИЕ (К.В. Подмастерьев)	395
9.13. Обнаружение коррозии в массивных металлических объектах	346	Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО (Ф.Р. Соснин).....	398
9.14. Автомобилестроение	347	1.1. Электростатика. Основные понятия	398
9.15. Целлюлозно-бумажное производство	348	1.2. Системы физических величин и единиц, их размерности	399
9.16. Судостроение (композиционные материалы)	348	1.3. Электростатические величины	400
9.17. Пищевая промышленность	348	1.4. Электрический ток. Основные понятия	405
9.18. Утечки газо- и нефтепродуктов из трубопроводов и резервуаров	349	1.5. Величины, характеризующие электрический ток	406
9.19. ИК-аэрозольная съемка	350	Глава 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА (Ф.Р. Соснин)	410
9.20. Обнаружение противолодочных и противотанковых мин	352	2.1. Электропроводность	410
9.21. Системы наблюдения и охраны	354	2.2. Проводниковые материалы	412
9.22. Военная техника	354	2.3. Диэлектрики	414
9.23. Медицина	355	Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН (С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногичева)	419
9.24. Прочие области	358	3.1. Измерение тока и напряжения	419
Глава 10. АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТК И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ	360	3.1.1. Электромеханические приборы	419
10.1. Порядок аттестации операторов-термографистов в России	360	3.1.2. Электронные вольтметры	423
10.2. Нормативная документация в области ТК	361	3.1.3. Цифровые приборы	428
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	365	3.1.4. Компенсационные приборы	429
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	374	3.2. Осциллографический метод	432
1. Типовая программа подготовки персонала неразрушающего контроля по тепловому методу (система экспертизы промышленной безопасности Ростехнадзора РФ)	375	3.2.1. Общие сведения	432
2. Рекомендуемые вопросы общего экзамена по тепловому контролю	382	3.2.2. Классификация и особенности применения электронных осциллографов	439
		3.2.3. Особенности современных электронных средств	441
		3.3. Мостовые методы измерения параметров электрических цепей	443
		3.3.1. Общие сведения и классификация	443
		3.3.2. Мосты переменного тока	447
		3.3.3. Трансформаторные мосты	450

	3.3.4. Фазочувствительные мосты	451		5.1.3. Области использования ..	501
	3.3.5. Специальные схемы мостов	455		5.1.4. Технические основы	502
	3.3.6. Цифровые мосты	457		5.2. Электроискровой метод	503
	3.4. Резонансные методы измерения	458		5.2.1. Физические основы	503
	3.4.1. Общие сведения	458		5.2.2. Технические основы	504
	3.4.2. Измерение емкости и индуктивности	459	Глава	6. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ (<i>К.В. Подмастерьев</i>)	508
	3.4.3. Измерение активных сопротивлений	462		6.1. Контроль металлических изделий	508
	3.4.4. Измерение частоты	462		6.2. Кондуктометрический контроль неметаллических материалов	510
	3.4.5. Куметры	463		6.2.1. Методы и средства анализа жидкостей и газов	511
Глава	4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ (<i>К.В. Подмастерьев</i>)	466		6.2.2. Методы и средства контроля содержания влаги в твердых, жидких и газообразных материалах	517
	4.1. Общие понятия и классификация	466		6.3. Контроль толщины смазочных пленок	521
	4.2. Скользящие контакты с граничным трением	468		6.4. Контроль трибосопряжений и трибодиагностика	523
	4.2.1. Параметры, характеристики и конструкции контактов	468		6.4.1. Общие сведения и физические основы	523
	4.2.2. Триботехнические аспекты электрических контактов	470		6.4.2. Контролируемые параметры и модели	525
	4.2.3. Материалы для скользящих контактов	472		6.4.3. Методы и средства дефектоскопии	530
	4.2.4. Пути повышения работоспособности слаботочных скользящих токосъемников	480		6.4.4. Методы и средства контроля отклонений формы поверхностей	538
	4.3. Жидкостные коммутирующие устройства	487		6.4.5. Методы и средства комплексного контроля подшипников и опор качения	540
	4.4. Бесконтактные коммутирующие устройства	490		6.4.6. Методы выделения информации о состоянии ОК в узле	544
	4.4.1. Устройства с индуктивным каналом связи	491		6.4.7. Вид и величина подводимого к ОК напряжения	548
	4.4.2. Устройства с емкостным каналом связи	494		6.5. Контроль температуры	551
	4.4.3. Устройства с оптическим каналом связи	497	Глава	7. ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ МЕТОДЫ (<i>Ф.Р. Соснин, Е.В. Пахолкин</i>) ..	556
Глава	5. ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ И ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ МЕТОДЫ (<i>Ф.Р. Соснин, К.В. Подмастерьев</i>)	498		7.1. Общая характеристика метода тензометрии и тензорезистивных преобразователей	556
	5.1. Электропотенциальный метод	498			
	5.1.1. Физические основы	498			
	5.1.2. Теоретические основы	499			

	7.2. Тензорезистивный эффект	559	9.2.4. Измерение абсолютных коэффициентов Пельтье	610
	7.3. Преобразование выходного сигнала тензорезистора	560	9.3. Измерение температуры термопарами	612
	7.4. Классификация и основные параметры тензорезисторов	561	9.3.1. Физические и теоретические основы	612
	7.5. Характеристика промышленных тензорезисторов	563	9.3.2. Основы технической реализации	627
	7.6. Особенности применения тензорезисторов	565	9.3.3. Средства измерения термоЭДС	631
	7.7. Измерения при разных видах нагружения	570	9.3.4. Специальные схемы включения термопар	633
	7.8. Тенденции развития тензорезистивных методов и средств НК	573	9.4. Использование естественных термопар при НК	634
Глава	8. ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ МЕТОДЫ (Л.А. Бондарева)	576	9.4.1. Общие положения	634
	8.1. Общие сведения и физические основы	576	9.4.2. Контроль температуры в зоне резания	635
	8.2. Области использования	578	9.4.3. Контроль скорости изнашивания режущего инструмента	635
	8.3. Теоретические основы	578	9.4.4. Контроль температуры при холодной прокатке материалов	636
	8.3.1. Параметры емкостного преобразователя	578	9.4.5. Контроль сплошности покрытия биметаллической проволоки	637
	8.3.2. Дизелькометрический метод	583	9.4.6. Контроль температуры в зоне трения	637
	8.3.3. Учет краевого эффекта обкладок конденсатора	587	9.5. Средства термоэлектрического НК	640
	8.4. Основы технической реализации	590	9.5.1. Общие принципы построения	640
	8.4.1. Схемы построения и конструкции преобразователей	590	9.5.2. Примеры конструктивных решений	644
	8.4.2. Измерительные цепи емкостных преобразователей	596	9.5.3. Промышленные средства термоэлектрического НК	644
Глава	9. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ (Т.И. Ногачева)	598	Глава	10. ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОРОШКОВЫЙ МЕТОДЫ И МЕТОД ЭКЗОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ (Ф.Р. Соснин, В.Ф. Мужацкий, Е.В. Пахолкин)
	9.1. Термоэлектрические явления	598		652
	9.2. Измерение термоэлектрических параметров материалов	604	10.1. Трибоэлектричество	652
	9.2.1. Общие положения	604	10.2. Трибоэлектрические методы контроля трибосопряжений	653
	9.2.2. Измерение коэффициента Томсона	605	10.2.1. Физические основы	653
	9.2.3. Измерение термоэлектрической способности материалов	607		

	10.2.2. Объекты и методы контроля	655	11.3. Генерационно-рекомбинационные методы	669
	10.2.3. Специфика технических средств	659	11.4. Флюктуации дробовые, фликкер и контактные	670
	10.3. Электростатический порошковый метод	660	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	672
	10.4. Методы экзоэлектронной эмиссии	661	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	673
Глава	11. ЭЛЕКТРОФЛЮКТУАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ (С.Ф. Коридорф)	664	1. Электрический контроль (ЭК). Типовая программа подготовки персонала неразрушающего контроля	674
	11.1. Физические основы и классификация методов	664	2. Электрический контроль (ЭК). Требования к продолжительности подготовки (обучения) персонала неразрушающего контроля	678
	11.2. Теплоэлектрофлюктуационные методы	665		

ПРЕДИСЛОВИЕ

Температура, как количественный показатель внутренней энергии тел, является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Анализ тепловых процессов (температурных полей, потерь тепла и т.п.) позволяет получить разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов в природе, энергетике, строительстве, промышленности и медицине.

Идеи теплового контроля (ТК) восходят к началу XX века, хотя первые попытки дистанционного обнаружения животных и людей по их инфракрасному (ИК) излучению с помощью термопарных датчиков были сделаны еще в XIX веке [1]. В 1914 г. Р. Паркер получил патент на ИК-детектор айсбергов. В 1934 г. Г. Баркер предложил использовать ИК-датчики для обнаружения лесных пожаров. Одно из первых промышленных применений ИК техники было связано с анализом температурных полей горячекатаных металлических листов (Дж. Никольс, 1935). Современный анализ теплофизических свойств материалов восходит к работе П. Верно, опубликованной в 1937 г. [2]. Начиная с 60-х годов XX века, во многом благодаря появлению на рынке коммерческих тепловизоров шведской фирмы AGA (затем AGEMA Infrared Systems, в настоящее время американская фирма FLIR Systems), тепловидение стало широко использоваться при испытаниях электротехнических установок и радио-электронных компонент. По-видимому, одна из первых процедур динамического ТК была реализована в 1965 г. У. Беллером, который

предложил контролировать корпуса двигателей ракеты "Полярис" путем перемещения их из холодного помещения в теплое [3]. Д. Грин выполнил исследование по активному ТК тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, в котором решил проблему учета коэффициента излучения.

К концу 70-х годов XX века применения ИК-техники в НК оставались скорее качественными, что не позволило тепловому методу успешно конкурировать с другими методами НК. Новый уровень использования ТК стал возможным с внедрением достижений теории теплопроводности, основы которой изложены в известных монографиях Х. Карслоу и Д. Эгера [4] и А.В. Лыкова [5]. "Теплофизический" подход к ТК использовали в своих работах Д. Балажа, В.П. Вавилов и Р. Тейлор, П. Маклафлин и Х. Мирчандани, Ю.А. Попов и А.Е. Карпельсон и другие исследователи, которые ввели в рассмотрение одно-, двух- и трехмерные модели дефектов [6–9].

При анализе технологических процессов (близкий англоязычный термин: condition monitoring) и техническом обслуживании систем и установок (predictive maintenance) ИК-диагностику уже в течение длительного времени рассматривают как сложившийся практический метод, экономическая эффективность которого не подлежит сомнению. Однако при НК материалов развитие теплового метода долгое время сопровождалось поочередно сменявшимися оптимистическими и пессимистическими прогнозами. В последние годы новый интерес к ТК обусловлен как появлением на рынке тепловизоров нового типа, так и возросшими возможностями компьютерной обработки ИК-изобра-

жений, что позволяет реализовать на практике потенциальные преимущества ТК.

В настоящее время ИК-диагностика и методы теплового НК представляют высокотехнологичную область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК-технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных. Сохраняющийся интерес к ТК обусловлен его универсальным характером, высокой производительностью и безопасностью обслуживания ИК аппаратуры.

В области испытаний слоистых, композиционных и сотовых материалов ТК рассматривают скорее как *скрининговый*, т.е. обзорный, нежели самостоятельный, метод. В будущем положительные результаты возможны при комбинировании теплового и ряда других методов НК, в особенности, таких как ультразвукового и голографического (с этими методами тепловой объединяют ряд общих физических аспектов, а в ряде случаев общие элементы аппаратурной базы).

Цель издания – последовательное изложение основ метода ТД и НК, связанного с исследованием температурных (тепловых) полей объектов контроля. Тепловые методы контроля представляют собой комплексную научно-техническую дисциплину, включающую элементы материаловедения, теории теплопередачи, теории теплового излучения, проектирования оптоэлектронных устройств, обработки изображений, статистической обработки данных и теории принятия решений. Эти вопросы включены в справочник в том объеме, который, по мнению автора, необходим для получения законченного представления о современном состоянии и перспективах развития теплового контроля.

Выпуск справочника по тепловому контролю (ТК) отражает последовательные многолетние усилия Российского Общества Неразрушающего Контроля и Технической Диагностики (РОНКТД) по

созданию серии справочников по различным методам ТД и НК. Актуальность данного издания обусловлена следующими факторами.

Во-первых, на рынке появились портативные неохлаждаемые измерительные тепловизоры, что существенно расширило возможности ИК-съемок в задачах ТД.

Во-вторых, комбинация мощных импульсных нагревателей и компьютерных термографических систем, работающих в реальном времени, позволила исследовать тепловые процессы, которые развиваются в течение весьма коротких интервалов времени, что характерно для испытаний высокотеплопроводных металлов и тонких неметаллических покрытий. В течение коротких интервалов времени диффузия тепла не успевает сгладить температурные градиенты, возникающие в объеме контролируемого тела, поэтому качество ИК-термограмм приближается к изображениям, получаемым с помощью радиационных, ультразвуковых и других методов НК.

В третьих, на фоне прогресса компьютерной техники стало возможным разрабатывать и практически применять такие процедуры испытаний, которые требуют значительных вычислительных усилий; в частности, сюда относятся задачи *тепловой дефектometрии*, использующие решения *обратных задач математической физики*.

Материал справочника основан на анализе мировых достижений в области ТК за последние два десятилетия и на персональных результатах автора, многие из которых получены в процессе сотрудничества с ведущими мировыми специалистами: К. Малдагом (Канада), Э. Гринцато, П. Бизоном и С. Маринетти (Италия), Д. Берли, Р. Томасом и С. Фавро (США), Т. Кауппиненом (Финляндия), Й. Окамото и А. Камои (Япония). Использованы многочисленные обзорные и оригинальные публикации автора в зарубежных изданиях, включая соответствующие главы, включенные в справочник ASNT [11].

Автор определяет вид настоящего издания как "монографический справочник", что отражает попытку объединить материал справочного, т.е. устоявшегося характера с новыми направлениями исследований в области теплового метода НК. Список использованной литературы включает наиболее существенные мировые публикации как последних лет, так и более отдаленные, но рассматриваемые автором в качестве краеугольных. Справочник содержит английские оригиналы специфических терминов, принятых в англоязычной научно-технической литературе по ТК.

Автор глубоко благодарен жене Н.М. Вавиловой, В.А. Стороженко, сотрудникам Томского политехнического университета: В.В. Ширяеву, А.И. Иванову, С.Ю. Танасейчуку, М.А. Суханову, а также главному инженеру муниципального предприятия жилищного хозяйства г. Северска К.Д. Трофимову. Особую благодарность автор выражает А.Б. Упадышеву и В.В. Коннову (НПО "Молния"), чья поддержка в 80-е годы прошлого века помогла в становлении ТК в Томском НИИ интроскопии.

Раздел по применению теплового метода в теплотехнике написан по материалам, любезно предоставленным сотрудниками ЗАО "ПАНАТЕСТ" М.А. Вихровым

и С.А. Миловановым. Многие идеи, относящиеся к описанию тонкостей процедур теплового контроля, обсуждались с Г. Буссе (Германия), Д. Балажа (Франция) и С. Шепардом (США). Доброжелательная помощь президента компании "Пергам" А.Г. Климова, а также сотрудников фирмы FLIR Systems Т. Тенгесдаль и А. Томаса также ощущалась автором на протяжении многих лет исследований в области ИК-термографии.

В части ТД строительных сооружений, включая дымовые трубы, практические работы последних лет в России проводились в сотрудничестве с предприятием "Сибтехэнерго" (В.Г. Демин и В.Г. Гилевич), фирмами "Вемо" (О.Н. Будадин и Е.В. Абрамова) и "Оргрэс" (А.Н. Александров). На содержание книги оказали влияние беседы с разработчиками и потребителями ИК-технологий: А.В. Ковалевым, В.Г. Федчишиным, А.А. Кетковичем, П.А. Морозовым и С.П. Морозовой, Карлосом Велесом, В.В. Рейно, В.А. Воробьевым и многими другими, а также доброжелательное внимание к развитию теплового метода президента РОНКТД В.В. Клюева.

Замечания и предложения по справочнику автор примет с благодарностью (Россия, 634028, г. Томск, 28, ул. Савиных, 7, НИИ интроскопии).

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

1.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ ТК

Термин	Определение
Общие термины	
Стационарный (steady-state, stationary)	Температура не изменяется во времени
Нестационарный, динамический (transient, dynamic)	Температура изменяется во времени
Дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа (differential parabolic equation of heat conduction)	$a \nabla^2 T = \partial T / \partial \tau;$ a — температуропроводность
Дифференциальное уравнение теплопроводности гиперболического типа (differential hyperbolic equation of heat conduction)	$a \nabla^2 T = (\partial T / \partial \tau) + \tau_r (\partial^2 T / \partial \tau^2);$ τ_r — время релаксации
Термография (thermography)	Метод анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся, как правило, построением тепловых изображений (термограмм)
Инфракрасная термография (infrared thermography)	Термография, осуществляемая исследованием теплового излучения объектов
Тепловидение	<i>См. Инфракрасная термография</i>
Визуализация фононного излучения (phonon imaging)	Визуализация баллистических фононов, распространяющихся в чистых кристаллах при низких температурах (см. <i>Дифференциальное уравнение теплопроводности гиперболического типа</i>)
Тепловой неразрушающий контроль (thermal NDT)	Испытания материалов исследованием тепловых потоков (температурных полей). В отличие от механической диагностики термин относится к случаям, когда температура объекта контроля перед испытанием равна температуре окружающей среды, поэтому необходима тепловая стимуляция объекта
Инфракрасный неразрушающий контроль (infrared NDT)	Испытания материалов по их инфракрасному (тепловому) излучению: как правило, этот термин идентичен термину <i>Тепловой неразрушающий контроль</i>

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Общие термины	
Термографический неразрушающий контроль (thermographic NDT)	Испытания материалов с применением термографии (тепловидения); как правило, термин идентичен термину <i>Тепловой неразрушающий контроль</i>
Активный тепловой контроль (stimulated, forced, active, transient)	Испытания материалов с использованием дополнительного источника тепловой стимуляции
Пассивный тепловой контроль (passive)	Дополнительный источник тепловой стимуляции отсутствует
Тепловой НК "на отражение", односторонняя техника (reflection mode, front-surface or one-sided test)	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на одной и той же поверхности образца
Тепловой контроль "на просвет" (transmission mode, rear surface or two-sided test)	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на противоположных поверхностях образца
Прямая задача ТК (direct problem)	Для известной конфигурации объекта и дефектов (известных теплофизических характеристик ТФХ) рассчитывают изменения температуры во времени и пространстве
Обратная задача ТК (inverse problem)	По экспериментально регистрируемым изменениям температуры во времени и пространстве определяют конфигурацию и/или ТФХ объекта контроля и дефектов
Дефектометрия (defect characterization, identification)	Определение параметров дефекта по экспериментальным данным с использованием алгоритмов решения обратных задач
Тепловизионная квалиметрия	Совокупность методов проведения тепловизионных обследований различных технических объектов с целью количественной оценки параметров и характеристик, определяющих их качество
Планарный дефект (planar defect)	Дефект, расположенный параллельно стимулируемой плоскости и создающий максимальное тепловое сопротивление основному тепловому потоку
Функция точечного распределения (point-spread function)	Распределение (поверхностной) температуры для точечного заглубленного дефекта
Тепловой пакет (heat packet)	Пакет ("сгусток") тепловой энергии, распространяющийся в объекте

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Процедуры ТК	
Анализ в пространственной области (space-domain analysis)	Анализ амплитудных распределений
Анализ во временной области (time-domain analysis)	Анализ изменений сигналов во времени
Анализ в частотной области (frequency-domain analysis)	Анализ частотного спектра температурных сигналов
Фотоакустический метод (photoacoustic method)	Разновидность ультразвукового метода НК, при котором акустические сигналы возбуждаются с помощью оптического излучения (может рассматриваться как комбинация ультразвукового и теплового методов)
Фототермический (фототепловой) метод (photothermal, optothermal method)	Тепловую стимуляцию объекта производят с помощью оптического излучения (как правило, возбуждают тепловую волну в локальной зоне малого размера и производят сканирование объекта по точкам)
Метод "миража" ("mirage" method)	Разновидность фототермического метода, при котором объект стимулируют с помощью модулированного лазерного излучения, а температурные аномалии измеряют по отклонению зондирующего лазерного луча, пересекающего зону нагрева
Импульсный ТК (pulsed thermal NDT)	Объект стимулируют с помощью теплового импульса
Импульсный метод (flash technique)	Длительность тепловой стимуляции существенно меньше характерного времени наблюдения; нагрев производят с помощью импульсного лазера или импульсной лампы (см. <i>Импульсный ТК</i>)
Метод тепловых волн (thermal wave technique)	Тепловую стимуляцию объекта производят периодическим (гармоническим) нагревом, в результате чего в объекте возникают тепловые волны; температуру регистрируют в квазистационарном режиме
Фототермическая ИК-термография (photothermal infrared thermography)	Разновидность фототермического метода; нагревают значительный участок объекта контроля, а вместо ИК-радиометра используют тепловизор (см. <i>Фототермический метод</i>)

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Процедуры ТК	
Эхо-импульсный метод тепловых волн (pulse-echo thermal wave approach)	Температурные сигналы трактуют как результат суперпозиции тепловых волн, отраженных от границ разделов материалов с различными ТФХ (см. <i>Импульсный ТК</i>)
Видеотермография (videothermography)	Термография в реальном времени (в настоящее время термин не применяется)
Импульсная видеотермография (pulsed video thermography)	Видеотермография при равномерном импульсном нагреве больших зон (в настоящее время термин не применяется)
Дифференциальная термография (differential thermography)	Выделение динамических компонент в термограмме, зачастую, вычитанием эталонного изображения
Термография при вынужденной диффузии тепла (forced diffusion thermography)	Поток излучения распределенного нагревателя проецируют на объект контроля через маску решетчатой формы; объект контроля перемещают в поле зрения тепловизора
Синхронная ИК-термография (lock-in IR thermography)	Стимуляцию объекта производят тепловыми волнами сравнительно низкой частоты при синхронной регистрации термограмм с выделением фазовых характеристик
Импульсная фазовая термография (pulsed phase thermography)	Обработка термограмм в частотной области с построением "фазограмм" (преимущественно с использованием преобразования Фурье)
Синхронная ультразвуковая термография (ultrasonic lock-in thermography)	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия упругими периодическими УЗВ-волнами
Импульсная ультразвуковая термография, термозвуковой метод (ultrasonic burst excitation, sonic IR imaging, thermosonic method)	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия импульсными УЗВ-волнами
Вибротермография (vibrothermography)	ИК-термография при механическом (вибрационном) нагружении изделия
Радиотепловой метод	Анализ изделия по его СВЧ-излучению в диапазоне длин волн 1 ... 150 мм
Вихретокоотепловой метод	Разновидность ТК, включающая радиоимпульсное возбуждение металлов полем индуктора

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Процедуры ТК	
Теплоголография	Совместная регистрация термограмм и голографических интерферограмм изделия при нагреве (близкий западный термин: "shearography" - широгрaфия)
Метод вейвлет (волновых)-функций (wavelet transformation)	Разновидность импульсной фазовой термографии, использующая разложение функции оригинала по базисным вейвлет-функциям
Синхронная фазовая термография (phase-locked IR imaging)	Термин относится к термографии вращающихся объектов
Фазочувствительная модуляционная термография (phase-sensitive modulation thermography)	Термин относится к <i>синхронной термографии</i> (фазовые характеристики определяют в каждой точке изображения с построением <i>фазограммы</i>)
Тепловая (динамическая) томография (thermal tomography)	Послойное (томографическое) представление структуры объекта путем анализа температурных сигналов во временной области при одностороннем ТК
Инфракрасная томография (infrared tomography)	Послойное (томографическое) представление структуры полупрозрачных объектов (газов) с использованием принципов проективной компьютерной томографии
Полиномиальная аппроксимация (polynomial fitting)	Аппроксимация изменения температуры во времени с помощью полиномов с целью сглаживания шумов и замены длинных экспериментальных последовательностей <i>изображениями полиномиальных коэффициентов</i>
Синтетическая обработка сигнала (synthetic processing)	Метод разработан для одностороннего импульсного ТК и включает: 1) полиномиальную аппроксимацию экспериментальных данных в логарифмических координатах; 2) восстановление последовательности термограмм; 3) анализ первой и второй производной от температуры по времени
Адаптивная тепловая томография (adaptive thermal tomography)	Послойное (томографическое) представление структуры объекта пошаговым сближением экспериментальных и теоретических данных
Техника "летающего пятна" ("flying spot" technique)	ТК сканированием объекта тепловым стимулирующим пучком при синхронной регистрации температуры в локальной зоне на фиксированном расстоянии от точки нагрева (скорость сканирования относительно высока)

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Процедуры ТК	
Техника "ползущего пятна" ("crawling-spot" technique)	См. <i>Техника "летающего пятна"</i> (скорость сканирования относительно низка)
Метод термоупругих испытаний (thermoelastic inspection)	Обнаружение скрытых дефектов возбуждением в объекте термоупругих механических напряжений
Метод синхронной регистрации сигнала, метод "временных ворот" (synchronous, lock-in, box-car, time-gate, time-resolved technique)	Метод ТК, предусматривающий регистрацию сигнала в выбранном временном интервале при фиксированной задержке относительно нагрева
Метод векторной синхронизации (synchronous vector lock-in technique)	Усреднение во времени произведения гекущего и эталонного периодических сигналов, в результате чего осуществляют узкополосную фильтрацию сигнала (подавление некогерентного шума)
Инфракрасная радиометрия с временным разрешением (time-resolved infrared radiometry, TRIR)	Анализ временного развития сигнала (см. <i>Метод синхронной регистрации</i>)
Двухканальная термография (dual-band IR imaging)	Совместное применение коротко- и длинноволнового каналов, в результате чего возможно разделение информации о температуре и коэффициенте излучения
Профилирование глубины (depth profiling)	Восстановление структуры объекта по глубине (см. <i>Глубинограмма</i>)
Информативные параметры	
Информативный параметр (informative parameter)	Параметр, используемый для принятия решения о качестве изделия (см. <i>Анализ в пространственной, временной, частотной областях</i>)
Температурный сигнал (temperature signal)	$\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{ref}(x, y, \tau)$ – амплитудный информативный параметр; $T_{ref}(x, y, \tau)$ – эталонная температура
Текущий контраст температуры (running temperature contrast)	$C^{run}(x, y, \tau) = \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}$; $T_a(x, y)$ – начальная температура (температура окружающей среды)

Продолжение табл. 1.1

Термин	Определение
Информативные параметры	
Нормализованный температурный контраст (normalized temperature contrast)	$C^{(n)}(x, y, \tau) = \frac{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T^{(n)}(x, y, \tau^{(n)}) - T_a(x, y)} - \frac{T_{ref}(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T_{ref}^{(n)}(x, y, \tau^{(n)}) - T_a(x, y)};$ <p>$T^{(n)}(x, y, \tau^{(n)})$ – температура текущей точки в момент времени $\tau^{(n)}$, принятая в качестве нормализующего значения. Момент времени $\tau^{(n)}$ соответствует концу нагрева τ_h</p>
Контраст трехмерной фильтрации (3D filtering contrast)	$C^{3D}(x, y, \tau) = \frac{T^{exp}(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)};$ <p>$T^{exp}(x, y, \tau)$ – экспериментальная температурная функция; $T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)$ – теоретическая температурная функция, определенная для бездефектного изделия (температуры определены как избыточные относительно начальной температуры)</p>
Дифференцированный контраст (differentiated contrast)	$C^{dif}(x, y, \tau^{(n)}) = T(x, y, \tau) - \sqrt{\frac{\tau^{(n)}}{\tau}} T(x, y, \tau^{(n)});$ <p>$\tau^{(n)}$ – момент времени, относительно которого производят нормализацию (термин введен на основе классического решения для адиабатического нагрева полупространства)</p>
Характерное время теплопередачи (heat transit time)	Характерный момент τ^* во временном развитии температуры, используемый для обнаружения дефекта и дефектометрии (является временным информативным параметром)
Оптимальное время наблюдения (optimal observation time, thermal dwell time)	Момент времени τ_m , при котором обеспечивается оптимальное значение информативного параметра (максимальное значение отношения сигнал/шум)
Раннее время обнаружения (early detection time)	Момент времени, при котором температурный сигнал $\Delta T(\tau)$ начинает превышать уровень шума (как правило, значительно меньше времени τ_m)

Окончание табл. 1.1

Термин	Определение
Представление результатов ТК	
Термограмма, ИК-термограмма (thermogram)	Изображение на экране монитора, а также в виде твердой или электронной копии, отражающее распределение интенсивности теплового излучения (температуры) объекта
Хронологическая термограмма (chronological thermogram)	Изменение температуры в отдельной точке во времени
Тепловая томограмма (thermal tomogram)	Изображение структуры ТФХ объекта в пределах выделенного по глубине слоя
Изображение термоупругих напряжений (thermoelastic stress analysis image)	Распределения термоупругих напряжений, построенные на основе анализа динамических термограмм в процессе механического нагружения
Максиграмма (maxigram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит максимальное наблюдавшееся значение информативного параметра (температурного сигнала) независимо от времени его появления
Таймограмма (timegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующее значение <i>характерного времени теплопередачи</i>
Фазограмма (phasegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующее значение фазы (сдвига фаз) на определенной частоте
Модулограмма (modulegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение модуля Фурье-образа на определенной частоте
Таймограмма по сечению (cross-sectional timegram)	Изображение, которое отражает изменение сигнала вдоль выбранной линии (строки) на поверхности объекта во времени
Глубинограмма (depthgram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение глубины залегания дефекта
Изображение теплового сопротивления (дефекта) (thermal resistance image)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение теплового сопротивления дефекта
Толщинограмма (thicknessgram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение толщины (раскрытия) дефекта
Изображение полиномиального коэффициента (image of polynomial coefficient)	При использовании <i>полиномиальной аппроксимации</i> в каждом пикселе исходной последовательности определяют набор полиномиальных коэффициентов и строят соответствующие изображения

1.2. МОДЕЛИ АКТИВНОГО ТК

В пассивном ТК схема испытаний определяется, главным образом, возможностью доступа к той поверхности объекта контроля, на которой искомые дефекты проявляются оптимальным образом.

Модели активного ТК можно классифицировать:

1) по типу источника тепловой стимуляции (рис. 1.1);

2) взаимному расположению устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры (рис. 1.2);

3) форме и размерам зоны тепловой стимуляции и регистрации температуры (рис. 1.3).

Тепловую стимуляцию (нагружение) объекта контроля можно производить нагревом или охлаждением, что с теплотехнической точки зрения является равноценным при одинаковой мощности теплового потока. Однако, учитывая достижимые плотности тепловых потоков, фактор технологичности и возможные помехи, практически всегда применяют *нагрев* с помощью полей излучения или потоков газа и твердых частиц.

Наибольшую мощность в зоне стимуляции обеспечивает нагрев оптическим излучением, генерируемым лампами различного типа и лазерами (рис. 1.1, а). Наиболее просто можно нагреть поверхность объекта контроля с помощью электрических ламп накаливания. Плотность нагрева может составлять до нескольких кВт/м² в зоне диаметром до 1 м при произвольной длительности нагрева. Такие лампы являются гибким и практичным средством "мягкого" нагрева неметаллов. Для стимуляции металлов применяют галогенные и ксеноновые лампы, которые создают плотность мощности до 100 кВт/м² в течение времени от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

Лазеры способны обеспечить сверхвысокую плотность энергии, однако низкий КПД, большие габариты и высокая

стоимость ограничивают их применение в ТК лабораторными исследованиями.

Лазеры также используют в технике "летающего пятна" для быстрого локального нагрева изделий, однако в этом случае снижается плотность поглощенной энергии. Поэтому при контроле металлов наиболее эффективны мощные ксеноновые лампы-вспышки (flash tubes), используемые в фотографической технике.

Металлические изделия можно нагревать индукторами. Плотность поглощенной мощности при этом ниже чем в случае оптического нагрева, однако индукционный нагрев не создает помех за счет отраженного излучения и позволяет нагревать металл через внешние слои из неметаллов (рис. 1.1, б).

В ряде случаев металлы нагревают, пропуская через них электрический ток (рис. 1.1, в). Этот способ также не создает оптической помехи и эффективен при обнаружении трещин, расположенных перпендикулярно направлению линий тока. Применение такого вида нагрева создает проблему ввода в изделие мощных токов.

Нагрев СВЧ-излучением рекомендуется при обнаружении зон повышенной влажности в пористых неметаллах (рис. 1.1, г) в сочетании с тепловизионной регистрацией температуры.

Конвекционный нагрев можно производить с помощью жидкости или газа (рис. 1.1, д, е). Известен способ контроля внутренних каналов турбинных лопаток пропусканием через них горячей (холодной) воды (рис. 1.1, д). Односторонний нагрев возможен потоком горячего воздуха (рис. 1.1, е), направляемого на изделие с помощью фена ("воздушной пушки"). Оригинальной разновидностью этого способа является быстрое охлаждение поверхности объекта контроля парами жидкого азота. Нагрев газом в односторонней процедуре ТК во многих случаях не хуже оптического нагрева благодаря более низкому уровню помехи, обусловленной отраженным излучением.

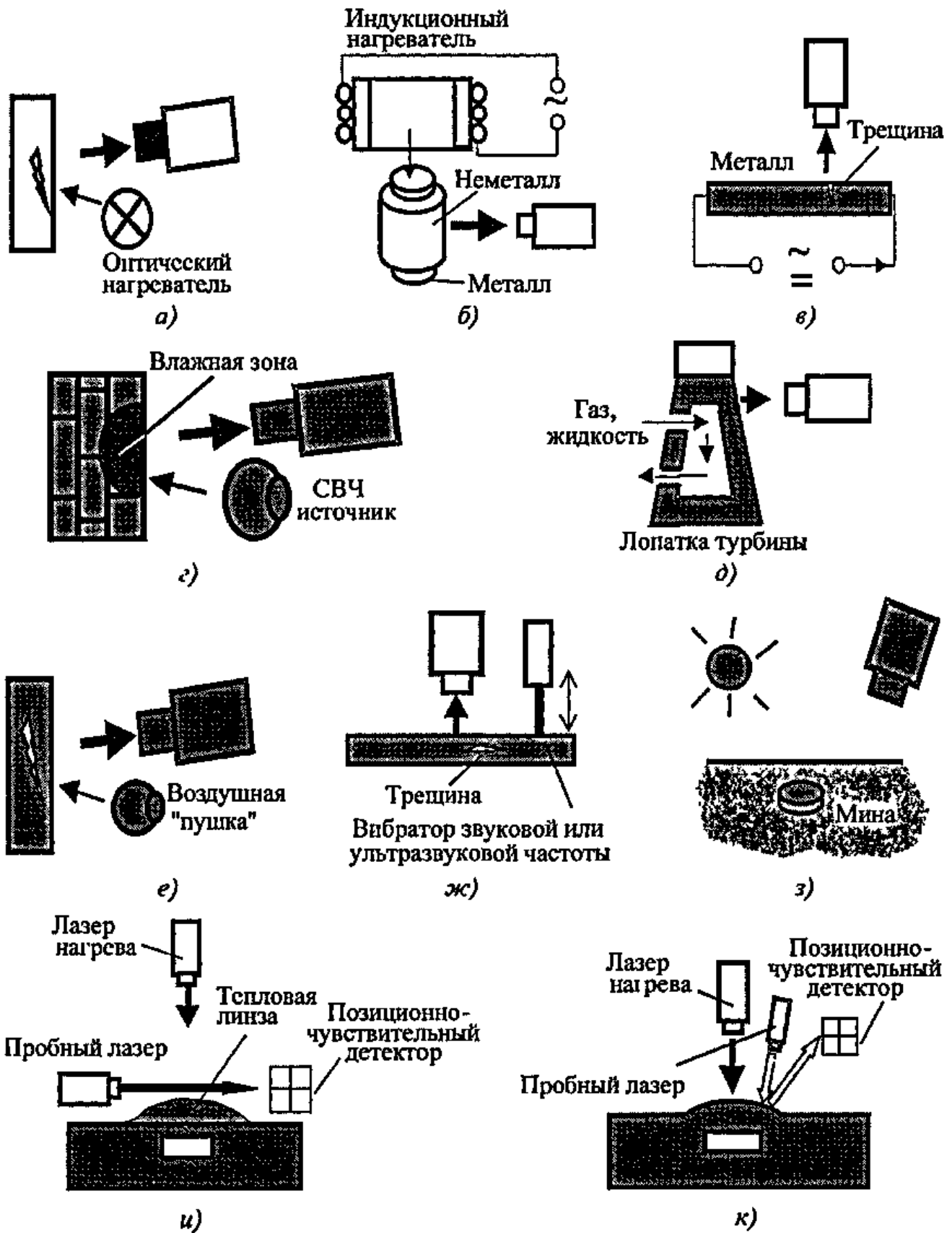


Рис. 1.1. Процедуры ТК в зависимости от типа источника тепловой стимуляции

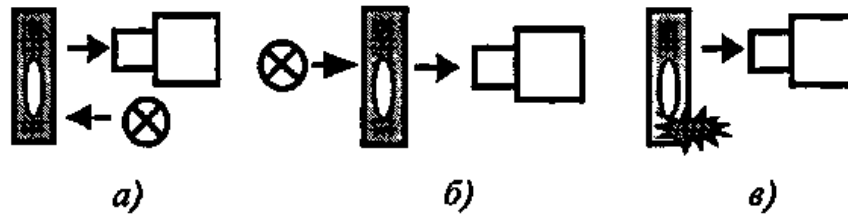


Рис. 1.2. Процедуры ТК в зависимости от взаимного расположения устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры

Преимуществом механического нагружения изделий за счет вибраций (дозированной циклической нагрузки) или ультразвука является отсутствие оптической помехи, а также то, что температурные аномалии возникают только в дефектных областях за счет трения стенок трещин, образования зон пластической деформации и других механических эффектов (рис. 1.1, ж). Этот способ хорошо зарекомендовал себя при испытаниях композиционных изделий, возбуждаемых стандартными пьезоэлектрическими вибраторами.

Способы тепловой стимуляции, изображенные на рис. 1.1, а-ж, требуют использования разнообразных технологических устройств. В ряде случаев, например, при обнаружении скрытых в грунте противопехотных мин, диагностике фасадных покрытий строительных сооружений и т.п., возможно использовать нагрев солнечным излучением, плотность мощности которого в средних широтах составляет около 1 кВт/м^2 в безоблачный день (рис. 1.1, з). Данный способ нагрева идентичен изображенному на рис. 1.1, а.

В лабораторных исследованиях иногда используют специфические способы тепловой стимуляции и регистрации температуры. Высоким температурным разрешением обладает техника "миража", которая предусматривает нагрев и регистрацию температуры с помощью лазера (рис. 1.1, и). Над дефектом создается область повышенной температуры прилегающего воздуха, при прохождении через которую пробный луч лазера претерпевает отклонения, пропорциональные темпера-

туре и регистрируемые позиционно-чувствительным фотодетектором. Другой пример комбинирования техники НК показан на рис. 1.1, к: при нагреве лазером слоя материала, расположенные над дефектом, испытывают аномальные деформации, которые фиксируют с помощью луча второго (пробного) лазера и позиционно-чувствительного фотодетектора.

Взаимное расположение источника тепловой стимуляции и устройства регистрации температуры влияет на выявляемость дефектов, что важно с точки зрения практической реализации. Преимущества активного НК наиболее полно проявляются в односторонней процедуре (рис. 1.2, а). Ее аналогом является ультразвуковой эхо-метод НК, в англоязычной литературе иногда используют термин "контроль на отражение" (reflection procedure). Двусторонняя процедура, иногда называемая "контролем на прохождение" (transmission procedure), требует прогрева всего изделия и не может быть применена к толстым образцам (рис. 1.2, б). В случае внутреннего нагрева, например, электрическим током через металл, устройство регистрации температуры целесообразно размещать там, где внутренние дефекты создают максимальные температурные контрасты (рис. 1.2, в).

Третий тип моделей активного ТК, (рис. 1.3) определяется сочетанием устройств нагрева и регистрации температуры. При поточечном сканировании изделие нагревают в малой зоне, а температуру регистрируют с некоторым запаздыванием, величина которого зависит от глубины залегания дефектов (рис. 1.3, а). На

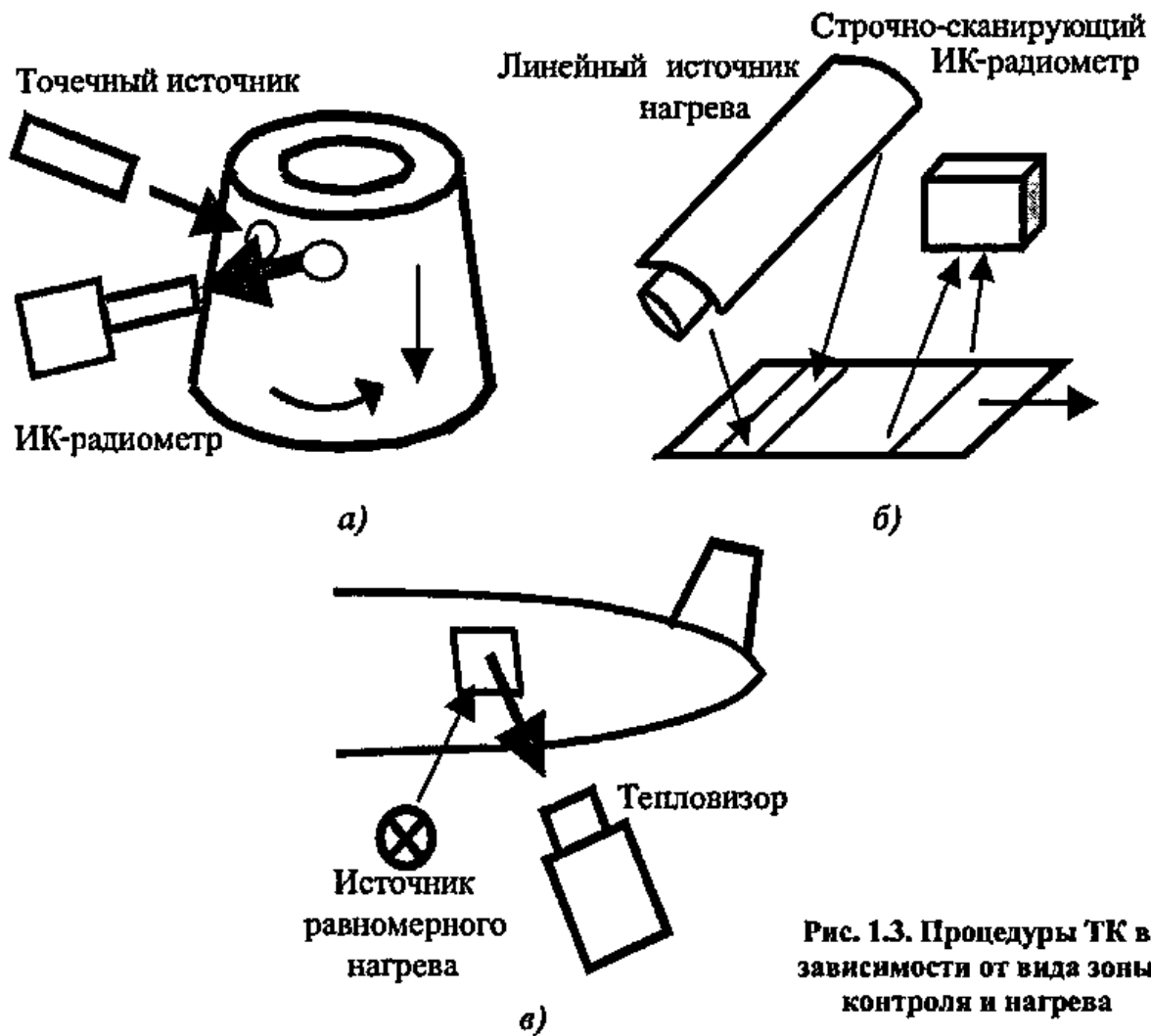


Рис. 1.3. Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева

раннем этапе развития активного ТК, в силу малого распространения тепловизоров, этот способ разрабатывался достаточно интенсивно. В последующие годы он был незаслуженно забыт и затем снова возрожден в виде техники "летающего (ползущего) пятна".

Поточечное сканирование обеспечивает максимальные температурные контрасты над внутренними дефектами при внешнем нагреве и пригодно для обнаружения трещин, расположенных перпендикулярно поверхности изделия. Основным недостатком данного способа является низкая производительность испытаний.

Компромиссным вариантом между поточечным сканированием и тепловизионным способом ТК является строчное сканирование: изделие нагревают в узкой длинной полосе, а температуру регистри-

руют строчно-сканирующим пирометром (рис. 1.3, б). Проблема равномерности нагрева решается проще, чем при распределенном нагреве, а производительность испытаний выше, чем при поточечном сканировании, приблизительно в N раз, где N – число элементов в строке. В этом случае зона нагрева перемещается по поверхности изделия, поэтому строчное сканирование пригодно для обнаружения вертикальных трещин. Тепловизионный способ ТК предусматривает распределенный нагрев изделия (от одной зоны к другой) при регистрации температуры тепловизором (рис. 1.3, в). В последние годы этот способ наиболее популярен благодаря появлению на рынке нового поколения тепловизоров, внедрению мощных импульсных нагревателей и разработке эффективных алгоритмов обработки тепловых изображений.

1.3. БАЗОВЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ТК

Отметим, что видимое разнообразие процедур активного ТК в значительной степени является субъективным, связанным скорее с терминологическими предпочтениями отдельных исследовательских групп, нежели с физикой контроля. Большинство существующих процедур могут быть классифицированы как разновидности импульсного ТК (pulsed thermal NDT), который предусматривает нагрев изделия импульсом тепловой энергии определенной длительности и регистрацию температуры на передней, задней или боковой поверхностях изделия в течение действия импульса (на стадии нагрева) или после его окончания (на стадии охлаждения). При таком определении активного ТК большинство процедур, описанных в табл. 1.1, связаны либо с физической реализацией нагрева, либо с особенностями обработки температурной информации, причем специфика процедур ТК связана с тем, как количественная или качественная информация о скрытых дефектах извлекается из базовой температурной функции $T(x, y, \tau)$, описывающей изменение избыточной температуры изделия во времени для каждой точки изделия (x, y) . В процедурах тепловизионного ТК эта функция определена для последовательности записанных термограмм (рис. 1.4, а) и привязана к элементам изображения (пикселям): $T(i, j, \tau)$.

Типичный вид функций $T(i, j, \tau)$ показан на рис. 1.4, б для дефектной (д) и бездефектной (бд) области. На передней поверхности в ходе нагрева избыточная температура изделия T растет от нулевого значения и достигает максимума в конце теплового импульса длительностью τ_h . На задней поверхности максимум избыточной температуры наблюдается со сдвигом относительно конца нагрева. Величина этого сдвига увеличивается с увеличением толщины изделия и снижением его теплопроводности. На стадии охлажде-

ния вследствие теплообмена с окружающей средой температура спадает до нуля, т.е. до температуры среды.

Фундаментальным понятием ТК является температурный сигнал (перепад), определяемый как разность температур в исследуемой точке и в зоне, принятой за бездефектную (эталонную): $\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{бд}(x, y, \tau)$ (в англоязычной литературе для обозначения ΔT часто используют некорректный термин "температурный контраст"). При таком определении, $\Delta T > 0$ на передней поверхности изделия для дефектов, теплопроводность которых ниже, чем теплопроводность основного материала; на задней поверхности такие дефекты создают $\Delta T < 0$. Соответственно, дефекты, более теплопроводные, чем основной материал, создают температурные сигналы обратного знака: $\Delta T < 0$ на передней поверхности и $\Delta T > 0$ на задней поверхности. Отметим, что в ряде случаев, вследствие различных теплоемкостей дефектной и бездефектной зон, на стадии охлаждения возможна инверсия знака ΔT , однако амплитуда соответствующих сигналов, как правило, мала для их уверенной регистрации.

В процессе динамического нагрева/охлаждения температурный сигнал от внутреннего дефекта достигает максимального значения ΔT_m в момент времени τ_m . Используя функции $T(x, y, \tau)$ и $\Delta T(x, y, \tau)$, ниже идентифицированы некоторые популярные процедуры активного ТК (см. также табл. 1.1). В деталях эти процедуры будут описаны в главе 5.

Наибольшая статистическая достоверность НК обеспечивается при максимально возможном отношении сигнал/шум. В динамических испытаниях это достигается в оптимальный момент наблюдения (optimal observation time). В первом приближении будем считать, что $\tau_m(\Delta T_m)$ и есть оптимальный момент наблюдения, хотя далее будет показано, что максимум отношения сигнал/шум не всегда

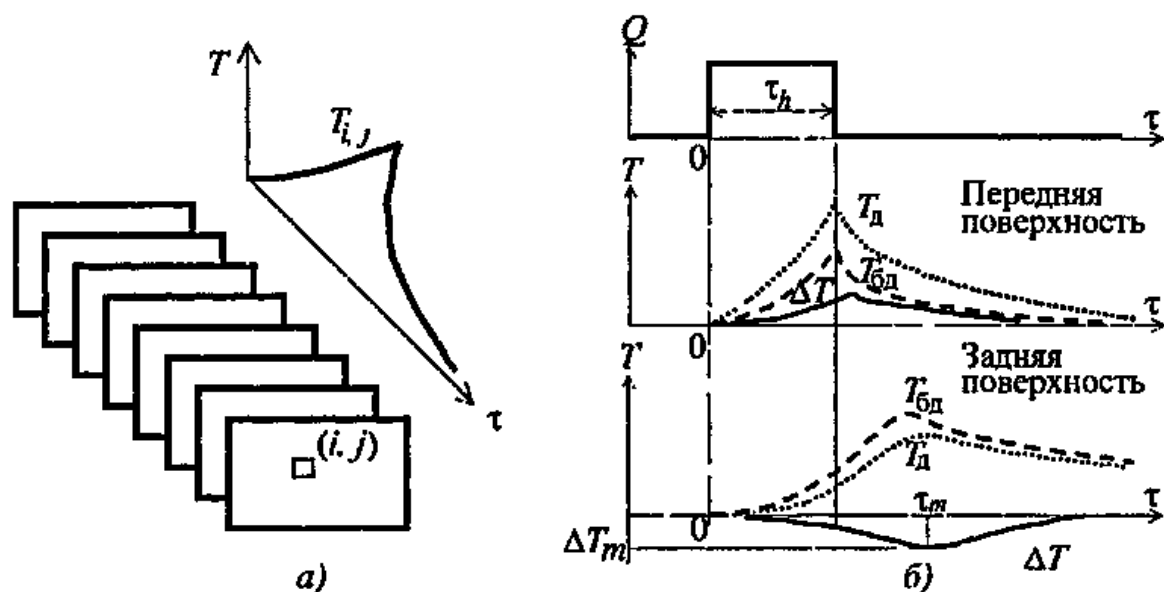


Рис. 1.4. Базовые температурные функции активного теплового контроля:
 а – формирование последовательности термограмм и функции $T(i, j, \tau)$;
 б – импульс нагрева и формирование температурного сигнала ΔT

соответствует максимальному сигналу ΔT_m .

Из вышеприведенного следует, что вместо записи последовательности термограмм можно фиксировать одну термограмму в момент τ_m , к чему и сводятся большинство процедур активного ТК. Нагрев можно осуществлять коротким импульсом с регистрацией температуры в процессе охлаждения изделия, что получило название собственно "импульсного ТК" (pulsed thermal NDT). При достаточно длинном нагреве оптимальный момент регистрации может наступить в ходе нагрева, что используется в методе ИК-радиометрии с временным разрешением (Temperature-Resolved Infrared Radiometry, TRIR).

На первый взгляд парадоксально выглядит метод раннего обнаружения сигнала (early detection), согласно которому температурный сигнал регистрируют на ранних стадиях теплового процесса, т.е. при $\tau < \tau_m$. Очевидно, что при этом отношение сигнал/шум невелико и возможно обнаружение только относительно боль-

ших дефектов. Тем не менее, преимуществом метода раннего обнаружения является низкий уровень диффузии тепла в поперечных направлениях, в результате чего обеспечивают высокое качество воспроизведения границ скрытых дефектов.

Иногда используют усреднение N термограмм в течение времени, центрированного относительно τ_m , в результате чего случайные шумы снижаются в \sqrt{N} раз (averaging technique). В последние годы обработку сигналов в амплитудной области (amplitude domain) замещают или дополняют обработкой во временной (фазовой) области (time domain, phase domain), что повышает отношение сигнал/шум. Разновидностями такого подхода являются метод динамической тепловой томографии (dynamic thermal tomography), основанный на использовании пары параметров ΔT_m и τ_m , а также методы импульсной фазовой термографии (pulse phase thermography) с применением преобразования Фурье или вейвлет-функций (wavelet functions).

Глава 2

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В БЕЗДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

2.1. МЕХАНИЗМЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Тепловая энергия передается в средах при наличии температурных градиентов тремя способами (рис. 2.1):

теплопроводностью (преимущественно, в твердых телах);

конвекцией (в жидких и газообразных средах);

излучением (в газообразных средах и вакууме).

Плотность теплового потока Q_{cd} в твердом теле между точками с различной температурой T_1 и T_2 подчиняется *закону Фурье*:

в интегральном выражении

$$Q_{cd} = -\lambda(T_2 - T_1) / \Delta x;$$

в дифференциальном выражении

$$Q_{cd} = -\lambda(\partial T / \partial x). \quad (2.1)$$

Следовательно, *коэффициент теплопроводности* λ , выраженный в Вт/(м·К), определяет плотность теплового потока в твердом теле при градиенте температуры, равном единице, и характеризует режим стационарного теплообмена, поскольку в размерности величины отсутствует время.

Конвекция означает перемешивание теплых и холодных слоев газа или жидкости. Охлаждение (или нагрев) поверхности тела газом или жидкостью описывается *законом Ньютона*:

$$Q_{cv} = \alpha_{cv}(T_s - T_{amb}), \quad (2.2)$$

где α_{cv} – коэффициент конвективной теплоотдачи, называемый в общем случае коэффициентом теплообмена; T_s и T_{amb} – соответственно температуры поверхности тела и среды (жидкой или газообразной).

На рис. 2.1 эти температуры обозначены через T_n и T_c . Определение α_{cv} не является столь строгим как в случае λ , так как этот параметр описывает не столько материал, сколько взаимодействие двух разнородных сред (геометрию). Отсутствие такого взаимодействия ($\alpha_{cv} = 0$) означает *адиабатические* граничные условия. В ТК адиабатические условия возникают при испытаниях металлов и тонких неметаллов, в особенности, при малом времени контроля.

Излучение есть поток квантов электромагнитного излучения, которое испускается всеми физическими телами с температурой выше абсолютного нуля (0 К).



Рис. 2.1. Механизмы теплопередачи

В интегральном выражении плотность радиационного излучения описывается законом Стефана-Больцмана, который для теплообмена между двумя телами с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) имеет следующий вид:

$$Q_{rd} = \sigma F_g F_c (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.3)$$

где Q_{rd} – плотность результирующего теплового потока; σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м·К⁴); F_g – геометрический фактор; F_c – приведенный коэффициент излучения.

Теплообмен между теплым объектом T_s и холодной окружающей средой T_{amb} происходит путем конвекции и излучения:

$$Q = Q_{cv} + Q_{rd} = \alpha_{cv}(T_s - T_{amb}) + \sigma G(\varepsilon T_s^4 - \varepsilon_{amb} T_{amb}^4) \quad (2.4)$$

В ТК разница температур $T_s - T_{amb}$ обычно мала, а объекты имеют высокий коэффициент излучения ($\varepsilon \cong 1$). Поэтому

$$\begin{aligned} \sigma G(\varepsilon T_s^4 - \varepsilon_{amb} T_{amb}^4) &\approx 4\sigma G \left(\frac{T_s + T_{amb}}{2}\right)^3 \times \\ &\times (T_s - T_{amb}) = \alpha_{rd} (T_s - T_{amb}), \end{aligned} \quad (2.5)$$

где α_{rd} – коэффициент теплообмена, обусловленный излучением.

Для вертикально ориентированных поверхностей в помещении коэффициент α_{cv} можно определить по формуле

$$\alpha_{cv} = 1,7(T_s - T_{amb})^{1/3}. \quad (2.6)$$

На открытом воздухе, например, при обследовании зданий, дымовых труб и подобных объектов, конвективный теплообмен зависит от скорости ветра V (высоты на уровне земли H). Для теплотехнического расчета дымовых труб рекомендуют эмпирическую формулу

$$\alpha_{cv} = 6,3(KV)^{0,66}. \quad (2.7)$$

Значения коэффициента K в зависимости от высоты H даны ниже:

$H, \text{ м}$	25	50	100	150	200	>350
K	1,2	1,6	2,1	2,3	2,6	3,1

Формулы (2.2) и (2.4) становятся идентичными, если ввести *комбинированный коэффициент теплообмена* с окружающей средой:

$$\alpha = \alpha_{cv} + \alpha_{rd}.$$

Значение α зависит от формы объекта и его ориентации в пространстве, а также от разницы температур $T_s - T_{amb}$. Рекомендуемые значения α для помещений даны в табл. 2.1.

Неадиабатический теплообмен включает все три механизма, описанные выше. Наиболее трудно поддается оценке конвективная компонента теплообмена со средой, поэтому решение обратных задач тепловизионной диагностики затруднительно при интерпретации данных, полу-

ченных съемкой в трудноконтролируемых условиях внешней среды. В активных процедурах ТК мощность потока нагрева может значительно превышать мощность встречного потока теплоотдачи за счет конвекции и излучения. В этом случае теплообмен становится адиабатическим, и соответствующие решения теории теплопроводности имеют наиболее простой вид.

Многие типичные дефекты, являющиеся объектами ТК, могут рассматриваться как тонкие газовые промежутки. Тепловой поток в таких дефектах, возникающий за счет чистой теплопроводности из-за различных температур на поверхностях дефектов T_1 и T_2 , описывается (2.1). В теории теплообмена известно, что конвекцией можно пренебречь, если произведе-

2.1. Рекомендуемые значения комбинированного коэффициента теплообмена
($\varepsilon = 0,9$; $T_{amb} = 20$ °C; α_{cv} определен по формуле (2.6); α_{rd} – по (2.5))

$T_1 - T_{amb},$ °C	α_{cv}	α_{rd}	α
	Вт/(м ² · К)		
1	1,7	5,2	6,9
5	2,9	5,3	8,2
10	3,7	5,4	9,1
20	4,6	5,7	10,3
30	5,3	6,0	11,3
40	5,8	6,3	12,1
50	6,3	6,6	12,9
60	6,7	6,9	13,6
70	7,0	7,3	14,3
80	7,3	7,6	14,9
90	7,6	8,0	15,6
100	7,9	8,4	16,3

ние критериев Грасгофа и Прандтля удовлетворяет условию

$$Gr Pr < 1000. \quad (2.8)$$

Проверка условия (2.8) для разницы температур $T_1 - T_2 < 100$ °C приводит к следующему условию для максимальной толщины дефекта d :

$$d < 6 \text{ мм}, \quad (2.9)$$

которое обычно выполняется при ТК конструкционных материалов.

Радиационный поток в тонких дефектах приближенно описывается выражением

$$Q_{rd} \approx 4\sigma T^3(T_1 - T_2), \quad (2.10)$$

где $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$.

Отношение тепловых потоков, обусловленных теплопроводностью и излучением,

$$\frac{Q_{cd}}{Q_{rd}} \approx \frac{\lambda}{4d\sigma T^3}. \quad (2.11)$$

Для воздушных дефектов:

$\lambda = 0,07$ Вт/(м · К); $T = 330$ К (57 °C);
 $Q_{cd}/Q_{rd} > 17$ для $d < 0,5$ мм. Таким обра-

зом, можно считать, что теплопередача в тонких газовых дефектах осуществляется чистой теплопроводностью.

В первом приближении (при малых разностях температуры ΔT между двумя средами, обменивающимися тепловой энергией) для всех трех механизмов теплопередачи плотность теплового потока пропорциональна разности температур ($Q \sim \Delta T$).

2.2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

2.2.1. Параболическое уравнение теплопроводности в декартовых координатах. Нестационарное распределение температуры в анизотропном твердом теле с внутренними источниками тепла описывается дифференциальным уравнением параболического типа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w(x, y, z) = C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.12)$$

где $w(x, y, z)$ - удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м³; C и ρ - соответственно теплоемкость, Дж/(кг · К), и плотность, кг/м³ материала.

Уравнение (2.12) отражает принцип сохранения энергии в среде, где тепло генерируется и распространяется диффузией.

Анизотропный характер диффузии тепла в уравнении (2.12) выражен коэффициентами теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$.

В случае изотропного материала

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.13)$$

где $a = \lambda / (C\rho)$ - коэффициент температуропроводности, м²/с.

В большинстве задач активного ТК внутренние источники тепла отсутствуют ($w = 0$), что приводит к общеизвестной форме уравнения (2.13):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.14)$$

В стационарном режиме при наличии внутренних источников тепла

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = 0. \quad (2.15)$$

Стационарный режим без внутренних источников тепла описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2.16)$$

На поверхности адиабатического (абсолютно теплоизолированного) тела в стационарном режиме сигналы от скрытых дефектов полностью нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела. На практике эти сигналы сохраняются благодаря теплообмену тела с окружающей средой, но их амплитуда может быть в десятки раз меньше максимальной амплитуды соответствующих нестационарных сигналов, возникающих в опти-

мальные моменты наблюдения. Поэтому, для обнаружения скрытых дефектов в большинстве случаев используют процедуры активного (нестационарного, динамического) ТК. Соответственно, в теории ТК чаще всего анализируют уравнения типа (2.12-2.14).

2.2.2. Параболическое уравнение теплопроводности в цилиндрических и сферических координатах. Уравнение (2.14) приведено в декартовой системе координат. Общей формой записи уравнения (2.14) является

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.17)$$

В цилиндрических координатах (r, φ, z)

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (2.18)$$

В сферических координатах (r, Θ, φ)

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \mu} [(1 - \mu^2) \frac{\partial T}{\partial \mu}] + \frac{1}{r^2 (1 - \mu^2)} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}, \quad (2.19)$$

где $\mu = \cos \Theta$.

2.2.3. Гиперболическое уравнение теплопроводности в декартовых координатах. Закон Фурье (2.1) исключает причинно-следственную связь между градиентом температуры и обусловленным им тепловым потоком. Иными словами, все уравнения п. 2.2.2. описывающие передачу энергии теплопроводностью, подразумевают бесконечную скорость распространения тепла. Физически теплопроводность есть феномен переноса, связанный с обменом энергией между частицами тела (в неметаллах тепловая энергия передается через колебания кристаллической решетки, в металлах энергию переносят свободные электроны). Для передачи

энергии и движения частиц необходимо определенное время. Для описания конечной скорости распространения тепла вводят понятие *времени релаксации теплового потока* τ_r , с учетом которого параболическое уравнение (2.17) заменяют *гиперболическим*:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\tau_r}{a} \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2}. \quad (2.20)$$

Скорость распространения теплового потока

$$V_i = \sqrt{\lambda / (C \rho \tau_r)}. \quad (2.21)$$

Время релаксации весьма мало; для металлов $\tau_r \sim 10^{-11}$ с, поэтому, например, в алюминии $V_i \approx 3$ км/с. Область применения гиперболического уравнения (2.20) определяется толщиной материала [17]:

$$L_{\min} < 2\pi a / V_i. \quad (2.22)$$

Для металлов $L_{\min} \sim 10^{-6}$ м, для неметаллов $L_{\min} \sim 10^{-4} \dots 10^{-3}$ м.

2.2. Теплофизические характеристики материалов (в порядке возрастания коэффициента теплопроводности) *

Материал	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг · К)	λ , Вт/(м · К)	a , 10 ⁻⁶ м ² /с	$\frac{e_1}{\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}}$ (м ² · К)
Воздух (в тонких прослойках)	1,2	1005	0,07	58,0	9,19
Плиты минералватные на синтетической связке	200	754		0,46	—
Плиты минералватные на битумной связке	400	754	0,12	0,39	—
Резина (мягкая)	1100	2010	0,130	0,0588	536
Полиизопрен	913	1905	0,134	0,0770	483
Поливинилхлорид	—	—	0,140	0,11	422
Полиарамид	1330	1047	0,142 (I)	0,102(I)**	445 (I)
			1,69 (II)	0,121(II)	485 (II)
Сосна (параллельно волокон)	550	2512	0,174	0,126	490

Дифференциальное уравнение (2.20) представляет главным образом академический интерес при исследовании процессов *фононной* теплопроводности в чистых кристаллах при сверхнизких температурах, а также процессов взрывного характера. Расширяющееся применение сверхтонких пленок и стремительное улучшение быстродействия современных ИК-камер (разработаны тепловизоры с частотой кадров до нескольких кГц) могут перевести интерес к сверхбыстрым тепловым процессам в практическую плоскость.

2.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ТФХ) МАТЕРИАЛОВ

Основными ТФХ материалов являются коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость C и плотность ρ (табл. 2.2). Коэффициент теплопроводности определяет величину теплового потока, распространяющегося в теле при стационарном теплообмене.

Продолжение табл. 2.2

Материал**	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг · К)	λ , Вт/(м · К)	a , 10 ⁻⁶ м ² /с	e , Вт · с ^{1/2} (м ² · К)
Эпоксидная смола	–	–	0,200	0,09	667
Стеклопластик	–	–	0,3 (⊥) 0,38 ()	0,13 (⊥) 0,17 ()	832 (⊥) 922 ()
Штукатурка	1100	1005	0,233	0,211	507
Вода	1000	4193	0,586	0,140	1570
Тринитротолуол	–	–	0,23	0,0925	–
Песок речной сухой	1520	800	0,34	0,28	643
Капрон-В	–	–	0,37	0,21	–
Углепластик	–	–	0,64 (⊥) 1,28 ()	0,52 (⊥) 1,04 ()	888 (⊥) 1260 ()
Кирпич (красный)	1700	879	0,755	0,505	1060
Стекло	2442	837	0,879	0,430	1340
Песок речной влажный	1650	2090	1,13	0,328	1974
Бетон	2400	837	1,51	0,752	1740
Почва	–	–	2,6	0,5	–
Никелевый сплав	8300	440	9,5	2,60	5890
Сталь (марки AISI 316)	8240	468	13,4	3,47	7190
Нитрид кремния*	2400	691	16,0	9,65	5150
Титан	4500	522	21,9	9,32	7170
Цирконий	6570	278	22,7	12,4	6440
Оксид алюминия	3970	765	46,0	15,2	11 800
Бронза	8800	420	52,0	14,1	13 900
Сталь (марки AISI 1010)	7830	434	63,9	18,8	14 700
Графит	2300	670	116	75,3	13 400
Кремний	2330	712	148	89,2	15 700
Вольфрам	19300	132	174	68,3	21 100
Дюралюминий 2024-T6	2770	875	177	73,0	20 700
Золото	19450	134	313	120	28 600
Медь	9000	406	365	100	36 500
Карбид кремния	3160	675	490	230,0	32 300
Алмаз	3516	502	660	374	34 100

* Ориентировочные значения зависят от изготовителя и технологического процесса.

** (⊥) – перпендикулярно волокон; (||) – параллельно волокон.

Обозначения: ρ – плотность; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; e – тепловая инерция.

Динамическими ТФХ являются коэффициент температуропроводности (thermal diffusivity) $a = \lambda / C\rho$ и коэффициент тепловой активности, или тепловая инерция (thermal effusivity) $e = \sqrt{\lambda C\rho}$.

Коэффициент температуропроводности является показателем диффузии внутренней энергии в материале; его величина пропорциональна скорости распространения изотермической поверхности. Более теплопроводные материалы характеризуются большими значениями a . Тепловая инерция характеризует тепловое согласование двух сред (1 и 2) и определяет, например, коэффициент отражения тепловой волны Γ :

$$\Gamma = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}, \quad (2.23)$$

$\Gamma = 0$ означает отсутствие теплового контакта, $\Gamma = 1$, когда второй материал является абсолютным проводником тепла, $\Gamma = -1$, если второй материал является абсолютным теплоизолятором.

Динамическая характеристика теплопроводности в твердом теле - длина тепловой диффузии μ выражается в мс^{1/2}рах:

$$\mu = \sqrt{a / \pi f}, \quad (2.24)$$

связана с частотой гармонического потока нагрева f (Гц). Этот параметр подтверждает тот факт, что низкочастотные волны проникают в твердое тело до больших глубин (т.е. тепловая волна фиксированной частоты проникает глубже в материал большей теплопроводности). В ТК длина тепловой диффузии является оценкой глубины обнаружения дефектов в односторонней процедуре при стимуляции объекта тепловыми волнами различной частоты.

2.4. КЛАССИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

В фундаментальных монографиях Х. Карслоу и Д. Эгера [4], а также А.В. Лыкова [5] можно найти большое

число аналитических решений одномерных задач нагрева (охлаждения) тел, которые могут быть использованы при расчетах температуры в бездефектных областях. Такие решения, широко используемые на практике, систематизированы в табл. 2.3 и 2.4 соответственно для поверхности полуограниченного тела и пластины. Решения приведены в виде

$$T = Q' \theta, \quad (2.25)$$

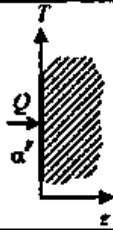
где T - избыточная температура поверхности; Q' (или W') - комплекс, характеризующий эффективность нагрева; θ - комплекс, описывающий нормализованную избыточную температуру поверхности.

В дальнейшем θ будет использоваться с соответствующими индексами, например, θ_{SP}^R означает нормализованную температуру на обратной поверхности (rear - R) пластины, нагреваемой квадратным импульсом (square pulse - SP).

Приближенные расчеты нагрева тел цилиндрической и сферической формы во многих случаях могут быть выполнены в плоской геометрии, с использованием решений в табл. 2.3 и 2.4. Анализ классических решений с точки зрения их применимости в ТК описан в п. 2.7. Три классических решения задач нагрева тел гармоническими тепловыми волнами приведены в табл. 2.5.

В табл. 2.6 содержатся решения трехмерных задач нагрева полубесконечного тела точечным и гауссовским движущимся источником тепла. В классической теории теплопроводности решения такого рода разработаны для моделирования процесса сварки материалов. В ТК время от времени возобновляется интерес к обнаружению скрытых дефектов сканированием поверхности изделий локализованными источниками тепла (см. также технику летающего пятна и технику ползущего пятна в табл. 1.1), поскольку наилучшая чувствительность ТК достигается при нагреве изделий тепловыми потоками, которые описываются функцией Дирака в

2.3. Классические решения теории теплопроводности для поверхности полуограниченного тела, нагреваемого тепловым потоком*

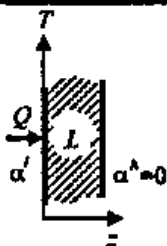


Объект – полубесконечное тело

Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Решение для нагреваемой поверхности
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T}{Q/\lambda} = 2 \left(\frac{\alpha\tau}{\pi} \right)^{1/2}$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T}{Q/\alpha} = 1 - e^{H^2\alpha\tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{\alpha\tau}); H = \alpha/\lambda$
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T}{Q/\lambda} = 2 \left(\frac{\alpha\tau}{\pi} \right)^{1/2} - 2 \left[\frac{\alpha(\tau - \tau_h)}{\pi} \right]^{1/2}$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T}{Q/\alpha} = e^{H^2\alpha(\tau - \tau_h)} \operatorname{erfc}[H\sqrt{\alpha(\tau - \tau_h)}] - e^{H^2\alpha\tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{\alpha\tau})$
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T}{W} = \frac{1}{e\sqrt{\pi\tau}}; e = \sqrt{C\rho\lambda}$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T}{W} = \frac{1}{e\sqrt{\pi\tau}} - \frac{\alpha}{e^2} \left[e^{H^2\alpha\tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{\alpha\tau}) \right]$

*Решение для прямоугольного импульса дано для $\tau \geq \tau_h$.

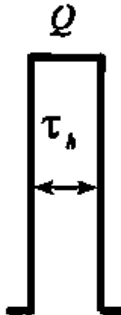

2.4. Классические решения теории теплопроводности для поверхности пластины, нагреваемой тепловым потоком



Объект – пластина

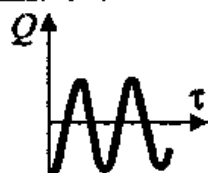
Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Передняя нагреваемая поверхность	Задняя нагреваемая поверхность
	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = Fo + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2\pi^2 Fo} = \theta_{ST}^F(Fo);$ $Q' = QL/\lambda; Fo = \alpha\tau/L^2$	$\frac{T}{Q'} = Fo - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1^n}{n^2} \times e^{-n^2\pi^2 Fo} = \theta_{ST}^R(Fo)$

Продолжение табл. 2.4

Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Передняя нагреваемая поверхность	Задняя нагреваемая поверхность
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} =$ $= \theta_{ST}^R(Bi, Fo);$ $Q' = Q/\alpha; \quad Bi = \alpha L/\lambda$ <p>μ_n – положительные корни трансцендентного уравнения:</p> $\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = Bi$	$\frac{T}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi}{\cos \mu_n Bi(Bi+1)} e^{-\mu_n^2 Fo} =$ $= \theta_{ST}^R(Bi, Fo);$
	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1);$ $Q' = QL/\lambda; \quad Fo_h = \alpha \tau_h / L^2$	$\frac{T}{Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-1}{n^2} \times$ $\times e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1)$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} \times$ $\times e^{-\mu_n^2 Fo} (e^{\mu_n^2 Fo_h} - 1)$ $Q' = Q/\alpha$	$\frac{T}{Q'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \times$ $\times \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} \times$ $\times e^{-\mu_n^2 Fo} (e^{\mu_n^2 Fo_h} - 1);$ $Q' = Q/\alpha$
	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{W'} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo}; \quad W' = \frac{Wa}{\lambda L}$	$\frac{T}{W'} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo}$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{W'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$ $W' = \frac{Wa}{\lambda L}$	$\frac{T}{W'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{2\mu_n^2}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} \times$ $\times e^{-\mu_n^2 Fo}$

*Решение для прямоугольного импульса дано для $\tau \geq \tau_h$


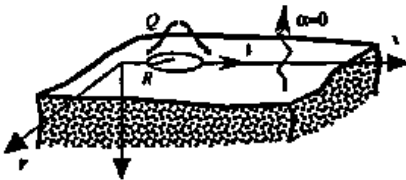
2.5. Классические решения теории теплопроводности для тепловых волн



Функция нагрева $Q = Q_m \cos(\omega\tau)$

Объект	Тип теплоотдачи на поверхности	Общее решение	Передняя нагреваемая поверхность
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T(z, \tau)}{Q_m} = \frac{1}{\lambda\sqrt{\omega/a}} e^{-z\sqrt{\omega/2a}} \times \cos\left[\omega\tau - \left(z\sqrt{\omega/2a}\right) - \Theta\right]; \quad \Theta = 45^\circ;$	$\frac{T(z=0, \tau)}{Q_m} = \frac{1}{\lambda\sqrt{\omega/a}} \cos[\omega\tau - \Theta]$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T(z, \tau)}{Q_m/\alpha} = A_0 e^{-z\sqrt{\omega/2a}} \times \cos\left[\omega\tau - \left(z\sqrt{\omega/2a}\right) - \Omega\right];$ $A_0 = \left(1 + 2\sqrt{\omega/2a} / H + \omega/aH^2\right)^{1/2};$ $\Omega = \arctg\left(1 + H\sqrt{2a/\omega}\right)^{-1}; \quad H = \alpha/\lambda.$	$\frac{T(z=0, \tau)}{Q_m/\alpha} = A_0 \cos\left[\omega\tau - \left(z\sqrt{\omega/2a}\right) - \Omega\right];$ $A_0 = \left(1 + 2\sqrt{\omega/2a} / H + \omega/aH^2\right)^{-1/2};$ $\Omega = \arctg\left(1 + H\sqrt{2a/\omega}\right)^{-1}; \quad H = \alpha/\lambda.$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T(Z, \tau)}{Q_m/\alpha} = A_0 \cos(PdFo - \Psi); \quad Z = z/L;$ $A_0 = (N_+ N_-)^{-1/2};$ $\Psi = \arctg\left(i \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}\right);$ $N_+ = \frac{ch\sqrt{iPd} (1-Z)}{ch\sqrt{iPd} + (1/Bi)\sqrt{iPd} sh\sqrt{iPd}};$ $N_- = \frac{ch\sqrt{-iPd} (1-Z)}{ch\sqrt{-iPd} + (1/Bi)\sqrt{-iPd} sh\sqrt{-iPd}};$ $Bi = \alpha L/\lambda; \quad Pd = \omega L^2/a$	$\frac{T(z=0, \tau)}{Q_m/\alpha} = A_0 \cos(PdFo - \Psi);$ $A_0 = (N_+ N_-)^{-1/2};$ $\Psi = \arctg\left(i \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}\right);$ $N_+ = \frac{ch\sqrt{iPd}}{ch\sqrt{iPd} + (1/Bi)} \times \frac{1}{\sqrt{iPd} sh\sqrt{iPd}};$ $N_- = \frac{ch\sqrt{-iPd}}{ch\sqrt{-iPd} + (1/Bi)} \times \frac{1}{\sqrt{-iPd} sh\sqrt{-iPd}};$ $Bi = \alpha L/\lambda; \quad Pd = \omega L^2/a$

2.6. Классические решения задач нагрева полубесконечного тела движущимся источником тепла

Объект	Общее решение	Решение для линии, пересекающей источник тепла
<p>Полубесконечное тело. Точечный источник тепла</p> 	$T = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{vz}{2a}}}{R} \times$ $\times \int_0^{\infty} e^{-\mu^2 \frac{v^2 R^2}{16a^2 \mu^2}} d\mu;$ $\frac{R}{2\sqrt{a}}$ $R = x^2 + y^2 + z^2;$ <p style="text-align: center;">Q в Вт</p>	$T = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{vz}{2a}}}{x^2} \times$ $\times \int_0^{\infty} e^{-\mu^2 \frac{v^2 x^2}{16a^2 \mu^2}} d\mu$ $\frac{x^2}{2\sqrt{a}}$
<p>Полубесконечное тело. Гауссовский источник тепла*</p> 	$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, Fo) = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{1}{R} \times$ $\times \int_0^{Fo} \frac{\exp\left[-\frac{(\tilde{x} - \tilde{v}Fo')^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}{1 + 4(Fo - Fo')}\right]}{\sqrt{Fo - Fo'} [1 + 4(Fo - Fo')]^3} dFo';$ $Fo = \frac{a\tau}{R^2}; \quad \tilde{v} = \frac{vR}{a};$ $\tilde{x} = x/R; \quad \tilde{y} = y/R; \quad \tilde{z} = z/R;$ <p style="text-align: center;">распределение энергии в пучке:</p> $F(x, y, z = 0) = \frac{Qa}{Cp} \frac{1}{\pi R^2} \times$ $\times \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right];$ <p style="text-align: center;">Q в Вт</p>	$T(\tilde{x}, Fo) = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{1}{R} \times$ $\times \int_0^{Fo} \frac{\exp\left[-\frac{(\tilde{x} - \tilde{v}Fo')^2}{1 + 4(Fo - Fo')}\right]}{\sqrt{Fo - Fo'} [1 + 4(Fo - Fo')]^3} \times$ $\times dFo'$

*См. решение в статье Bison P.G., Bragiotti A., Bressan C., Grinzato E., Marinetti S., Mazzoldi A., Vavilov V. Crawling spot thermal NDT for plaster inspection and comparison with dynamic thermography with extended heating. -Proc. SPIE "Thermosense-XVII", V. 2473, 1995. P. 53-63.

пространстве и во времени. Метод движущегося пятна наиболее пригоден для обнаружения дефектов (трещин), расположенных перпендикулярно основным поверхностям изделия.

В монографии французских исследователей (Д. Мелье с соавторами [18]) обобщен метод "термического четырехполюсника" применительно к решениям одно- и двухмерных задач нагрева одно- и двухслойных тел. Книга снабжена большим количеством примеров, непосредственно относящихся к проблематике ТК, и содержит программы расчета температурных полей, созданные для среды MatLab.

С математической точки зрения метод "термического четырехполюсника" принадлежит к классу аналитических методов решения линейных дифференциальных уравнений в простых геометриях. Он использует такие аналитические инструменты как интегральное преобразование Лапласа (во времени) и пространственные интегральные преобразования Фурье и Ханкеля, связанные с методом разделения переменных. Уравнения теплопроводности выражают в виде линейных матричных связей между трансформированными векторами температуры и тепловых потоков на границах многослойной системы. Это позволяет получать решения, общий вид которых не зависит от граничных условий.

Решение дифференциальных уравнений с помощью интегральных преобразований известно давно [5]. В настоящее время этот метод дополнен современными математическими приемами, реализующими, например, обратные преобразования Лапласа и Фурье с помощью специальных компьютерных алгоритмов. Это дало рождение гибриду аналитических и численных методов.

Метод "термического четырехполюсника" позволяет получать решения задач нагрева многослойных тел в области Лапласа в алгебраической форме. Поэтому анализ искомых зависимостей, например, между параметрами дефекта и "лапласов-

ской температурой" можно выполнять в пространстве Лапласа, а в случае необходимости возвращаться к реальным температурам, используя численные приемы.

Для решения многослойных задач ТК данный метод представляет особый интерес.

2.5. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТК

Под *информативными параметрами* ТК будем понимать *количественные характеристики динамической теплопередачи* в дефектных структурах, которые используются для принятия решения о качестве изделий. При анализе поверхностной температурной функции $T(x, y, \tau)$ различают *амплитудные* и *временные* информативные характеристики. При использовании одномерного преобразования Фурье $F[T(x, y, \tau)]$ по времени информативными параметрами служат *мощностные* и *фазовые* характеристики, которые являются функцией частоты.

Соответствующие информативные параметры имеют место при других преобразованиях сигнала, например, при использовании вейвлет-функций (wavelet functions). Определение информативных параметров ТК дано в табл. 1.1. Параметры, которые непосредственно генерируются либо аппаратурой ТК, либо соответствующими компьютерными программами обработки данных называют *параметрами обнаружения* скрытых дефектов. *Оптимальные параметры обнаружения* соответствуют *максимальному отношению сигнал/шум*.

2.5.1. Амплитудные и временные информативные параметры.

Динамическое температурное поле поверхности объекта контроля описывается функцией $T(x, y, \tau)$. В первом приближении можно считать, что в бездефектных зонах в любой момент времени температура является величиной постоянной или изменяющейся известным образом. При этом вводят не-

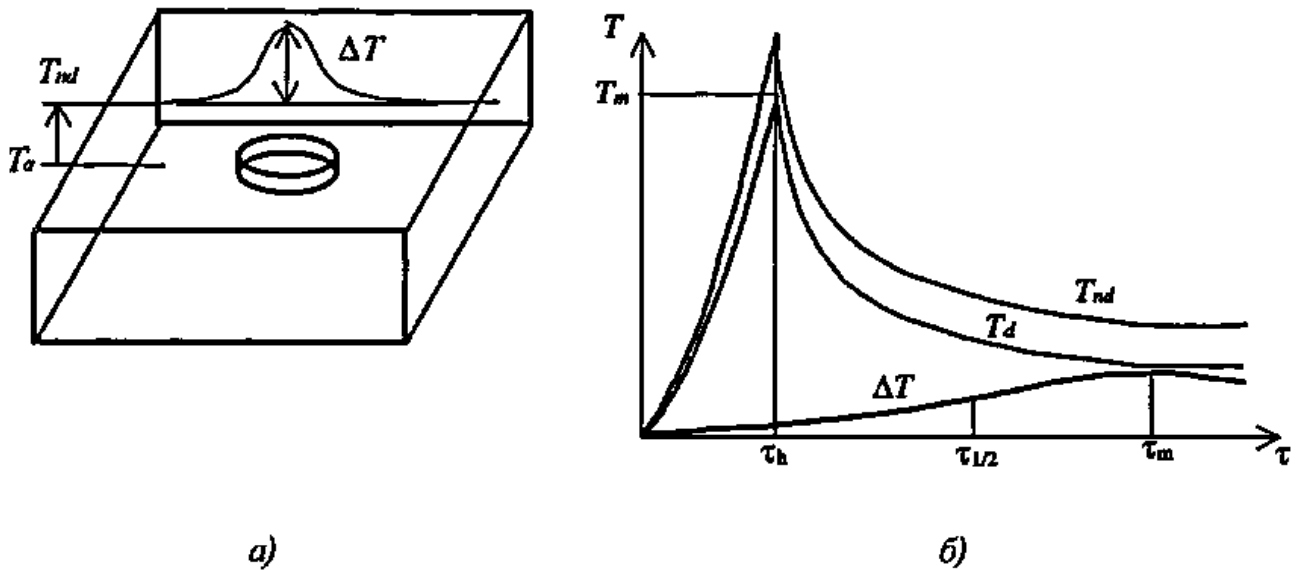


Рис. 2.2. Пространственный и временной профили $\Delta T(x, y, \tau)$ при импульсном ТК

которое эталонное значение температуры, принятое за бездефектное значение

$$T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau) = T_{nd}(\tau).$$

В активном ТК, как правило, используют избыточные значения температуры, то есть превышения температуры над начальной температурой, которая во многих случаях равна температуре окружающей среды T_{amb} . В зоне дефекта регулярный характер температурного поля нарушается, и возникают локальные температурные сигналы (перепады):

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_d(x, y, \tau) - T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau). \quad (2.26)$$

При одностороннем ТК форма пространственного профиля сигнала над малыми слаботеплопроводными дефектами близка к гауссоиду (рис. 2.2, а). При этом под температурным сигналом обычно понимают максимальное значение $\Delta T_m(x, y, \tau) = \Delta T_m(\tau)$.

Параметры, выражаемые в единицах температуры, т.е. избыточные температуры $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau)$, $T_d(x, y, \tau)$ и сигнал $\Delta T(x, y, \tau)$, прямо пропорциональны поглощенной плотности мощности нагрева Q в силу линейного характера процесса

теплопередачи. В качестве безразмерного информативного параметра, не зависящего от Q , вводят *текущий температурный контраст* (running temperature contrast):

$$C^{run}(x, y, \tau) = \Delta T(x, y, \tau) / T_{nd}(\tau), \quad (2.27)$$

который является естественной характеристикой конкретной процедуры обнаружения данного типа дефекта в данном материале.

Нормирование на поглощенную энергию в виде (2.27) эффективно, если величина Q постоянна во всех точках. На практике имеют место существенные флуктуации поглощенной энергии и в бездефектных зонах, прежде всего, вследствие флуктуаций коэффициента поглощения. В этом случае эффективна фильтрация температурных данных с помощью так называемого *нормализованного температурного контраста* (normalized temperature contrast), для введения которого рассмотрим временные профили температуры $T(\tau)$ и сигнала $\Delta T(x, y, \tau)$ на рис. 2.2, б.

В течение времени нагрева τ_h температура возрастает от начального (условно-нулевого) уровня до максимального значения $T_m(\tau_h)$, после чего спадает. Раз-

ность температур между дефектной и бездефектной областями достигает максимального значения ΔT_m в момент времени τ_m . Поскольку в бездефектных точках температура определяется поглощенной энергией, которая обычно пропорциональна падающей энергии, то все бездефектные кривые $T(x_i, y_i, \tau)$ подобны друг другу и в первом приближении отличаются постоянным множителем.

В дефектной области вследствие присутствия дефекта на некоторой глубине вид температурной функции изменяется, что позволяет ввести в рассмотрение сигнал $\Delta T(x_i, y_i)$. Нормализованный температурный контраст вводят в следующем виде:

$$C^{norm} = \frac{T(x_i, y_i, \tau)}{T_m(x_i, y_i, \tau_h)} - \frac{T(x_{nd}, y_{nd}, \tau)}{T_m(x_{nd}, y_{nd}, \tau_h)}. \quad (2.28)$$

Таким образом, каждая точка контролируемой поверхности нормируется сама на себя, что обеспечивает достаточно эффективное подавление неоднородностей нагрева. Формирование нормализованного температурного контраста является необходимым шагом многих процедур обработки температурной информации в активном ТК. Нормализацию можно производить не только по значениям температуры в момент τ_h , но и в другие моменты времени, из которых представляют интерес как начало, так и конец динамического процесса теплопередачи.

Основным недостатком использования информативных параметров (2.26 ... 2.28) является необходимость выбора бездефектной точки (x_{nd}, y_{nd}) , что относительно легко делает оператор, но затруднительно в автоматических устройствах контроля. На основе факта, что внутренние дефекты начинают влиять на поверхностную температуру с некоторого момента времени, до которого соответствующий участок изделия ведет себя как бездефектный, К. Малдаг и другие пред-

ложили дифференцированный температурный контраст (differentiated contrast):

$$C^{dif}(x, y, \tau^{(n)}) = T(x, y, \tau) - \sqrt{\frac{\tau^{(n)}}{\tau}} T(x, y, \tau^{(n)}), \quad (2.29)$$

где $\tau^{(n)}$ – момент времени, соответствующий бездефектному поведению анализируемой точки (величина C^{dif} имеет размерность температуры, поэтому использование термина "контраст" не является корректным). Выражение (2.29) получено из решения задачи нагрева адиабатического полубесконечного тела импульсом Дирака и означает нормализацию каждой точки самой на себя.

Определение контрастов в виде (2.27 ... 2.29) можно рассматривать как одномерную фильтрацию сигнала, поскольку они не учитывают эффекты диффузии тепла, в особенности, в поперечном направлении. В теплопроводных материалах эффекты трехмерной диффузии могут существенно изменять пространственные профили температуры и затруднять выделение слабых сигналов от малых дефектов.

Для учета пространственной диффузии тепла автором был предложен алгоритм трехмерной фильтрации (3D filtering), сущность которого в том, что экспериментальную температурную функцию T^{exp} нормализуют на эталонную температурную функцию T_{nd}^{theor} , которую получают из решения соответствующей трехмерной задачи ТК:

$$C^{3D} = \frac{T^{exp}(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)} = \frac{T_{nd}^{exp}(x, y, \tau) + \Delta T(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)}. \quad (2.30)$$

При идентичности экспериментальной и теоретической температурной функций в бездефектных зонах величина соответствующего трехмерного контраста

$$C^{3D} = 1 + \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)} \quad (2.31)$$

отличается от единицы (или другого постоянного значения) только в дефектных участках.

Введение временных информативных критериев связано с тем фактом, что, при прочих равных условиях, во временной области можно обеспечить более высокое значение отношения сигнал/шум, чем в области амплитуд. По графику $\Delta T(\tau)$ на рис. 2.2, б можно измерить величину оптимального времени контроля τ_m с большей точностью, нежели саму величину максимального температурного сигнала ΔT_m . Таким образом, величина τ_m является временным информативным критерием.

Ниже увидим, что в односторонней процедуре ТК более глубокие дефекты характеризуются большими значениями τ_m . Из этого положения следует принцип динамической тепловой томографии, согласно которому дефекты, создающие близкие значения τ_m , должны находиться в пределах некоторого локализованного слоя внутри объекта контроля.

Помимо параметра τ_m в ТК используют время $\tau_{1/2}$, когда сигнал $\Delta T(\tau)$ достигает половины своего максимального значения $\Delta T_m / 2$ (см. рис. 2.2, б), а также время максимума первой производной от температурного сигнала по времени $\tau_{m,d}$. В методе раннего обнаружения (early detection) используют очень короткие времена динамического теплового процесса τ_{early} , когда сигнал $\Delta T(\tau)$ мал, но и трехмерная диффузия тепла незначительна.

Преимущество использования временных критериев дефектности легко понять, если вспомнить, что форма кривых $T(\tau)$ не зависит от поглощенной энергии. Следовательно, все они должны характеризоваться одними и теми же значениями

временных информативных параметров. Отметим, что наличие шумов и теплоотдачи в окружающую среду приводит к разбросу и временных параметров, поэтому в ТК часто комбинируют амплитудные и временные критерии.

С понятиями амплитудных и временных информативных критериев связаны предложенные В.В. Ширяевым термины *максиграмма* и *таймограмма* (см. табл. 1.1). Максиграмма есть искусственное (синтезированное) изображение, которое получают обработкой последовательности термограмм $T(i, j, \tau)$, в результате которой в каждом пикселе изображения формируют величину максимального температурного сигнала $\Delta T_m(i, j)$ относительно выбранной эталонной точки (в максиграмме значения $\Delta T_m(i, j)$ могут соответствовать различным временам теплового процесса). Таймограмма есть изображение, каждый пиксель которого содержит соответствующее значение $\tau_m(i, j)$.

2.5.2. Мощностные и фазовые информативные параметры. Если к температурной функции $T(\tau)$ применить некоторое интегральное преобразование, в частности, преобразование Фурье, амплитудные информативные характеристики перейдут в мощностные, а временные – в частотные или фазовые. Для функции T на рис. 2.2 амплитудный спектр преобразования Фурье (модуль преобразования M) показан на рис. 2.3, а, а спектр фаз Φ приведен на рис. 2.3, б. Параметры преобразования Фурье анализируют на некоторой частоте f_i .

С помощью преобразования Фурье можно исследовать глубины проникновения температурных волн различной частоты в твердое тело. Известно, что слой материала выступает в качестве низкочастотного фильтра. Иными словами глубина проникновения температурных волн возрастает с понижением частоты. Поэтому

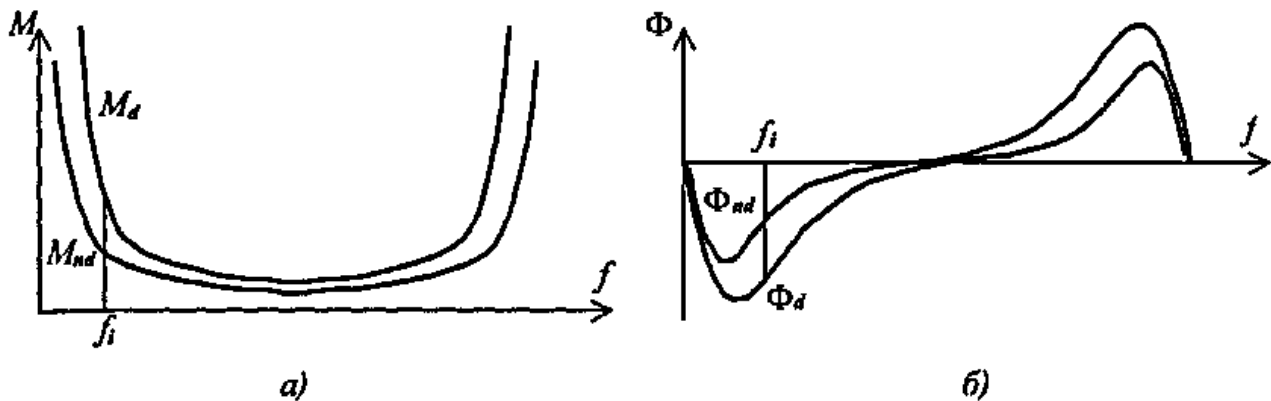


Рис. 2.3. Мощностные и фазовые информативные параметры (преобразование Фурье) при импульсном ТК

анализ высокочастотной части спектра обеспечивает информацию о поверхностном и приповерхностном слоях, тогда как низкочастотная часть спектра ответственна за температурные отклики от глубоких дефектов. В последние годы популярна процедура импульсной фазовой термографии, в которой дефектные области обнаруживают по аномальным значениям фазы. Основная идея аналогична использованию временных информативных параметров: на данной частоте f_i бездефектные зоны характеризуются постоянным значением фазы, которая изменяется в местах внутренних дефектов.

Разновидностью информативных параметров, возникающих при использовании преобразования Фурье по времени, являются амплитуда и фаза поверхностного температурного отклика, который создается гармонической температурной волной, распространяющейся от нагреваемой поверхности вглубь изделия. Подобные задачи возникают в методе тепловых волн или синхронной ИК-термографии (thermal waves, lock-in IR thermography).

2.6. ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТК

Теоретический анализ задач технической диагностики с использованием любого физического метода связан с решением так называемых *прямых* и *обратных* задач математической физики. Понятие прямых

и обратных задач можно трактовать в широком смысле как решение уравнений, описывающих процесс какого-либо испытания, относительно выбранных неизвестных функций. В отличие от прямых задач, решения обратных задач являются приближенными, и среди множества возможных решений следует выбирать оптимальное.

Рассмотрим общую схему ТК (рис. 2.4): объект контроля с неизвестными параметрами ("черный ящик") подвергается тепловой стимуляции на поверхности (или в объеме). В ходе нестационарного процесса теплопередачи регистрируют температурные отклики на основных поверхностях объекта (передней и задней).

В функциональном виде выходной сигнал устройства контроля можно записать как

$$U(x, y, \tau) = E(x, y, \tau)T(x, y, \tau, [L], [D], [Q]) + N_s(x, y, \tau) + N_d, \tag{2.32}$$

где $E(x, y, \tau)$ – функционал, характеризующий излучательные (шумовые) свойства объекта контроля; $T(x, y, \tau, [L], [D], [Q])$ – температура поверхности, зависящая от геометрии объекта $[L]$, параметров дефектов $[D]$ и источника нагрева $[Q]$; $N_s(x, y, \tau)$ – функционал аддитивных помех, возникающих вследствие отражений радиационного потока источ-

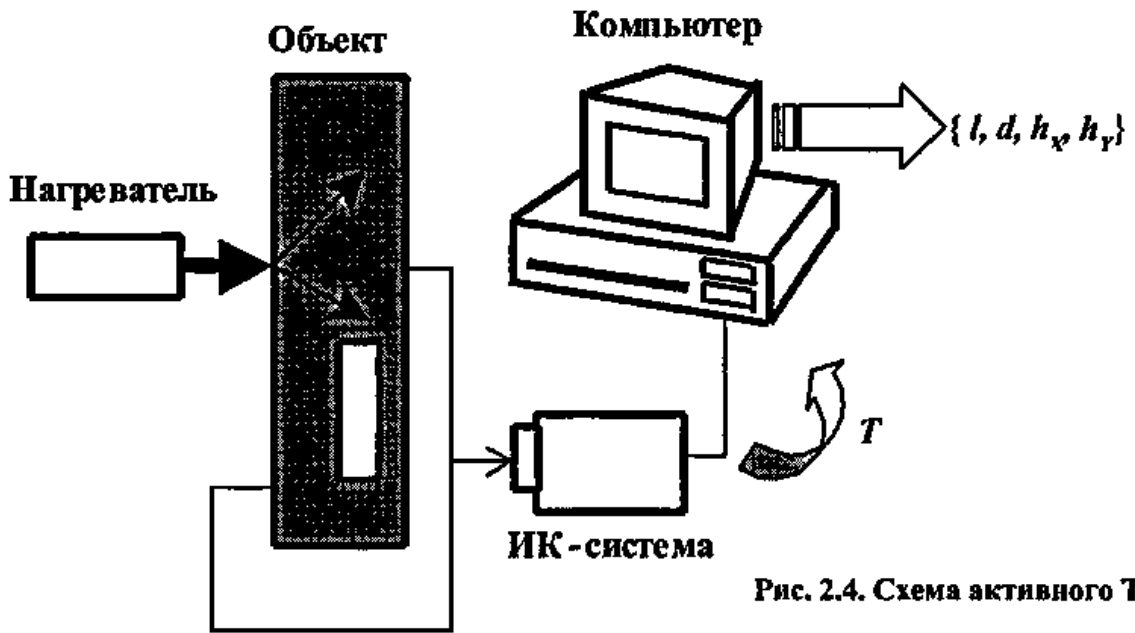


Рис. 2.4. Схема активного ТК

ника нагрева и окружающей среды от поверхности объекта контроля; N_d – функционал шума, вносимого детектором излучения и электронной схемой.

Членом N_d , который определяет температурное разрешение ИК-системы, можно пренебречь. Тогда уравнение (2.32)

будет выражать известный факт, что поток излучения, регистрируемый ИК-системой, складывается из собственного излучения объекта контроля и отраженного излучения посторонних объектов. Структура (2.32) иллюстрирует многопараметрический характер процедур ТК, в которых чис-

2.7. Сравнительная характеристика прямых и обратных задач ТК

Прямые задачи	Обратные задачи
<p>Теоретические входные данные</p> <ul style="list-style-type: none"> • Материал объекта контроля • Параметры теплообмена (нагрева или охлаждения) • Поперечные размеры дефекта • Глубина залегания дефекта • Толщина дефекта 	<p>Экспериментальные входные данные</p> <ul style="list-style-type: none"> • Материал объекта контроля • Пространственное распределение температуры • Динамика температуры
<p>Выходные параметры</p> <ul style="list-style-type: none"> • Пространственное распределение температуры • Динамика температуры • Температурный сигнал над дефектом • Оптимальное время регистрации 	<p>Выходные параметры</p> <ul style="list-style-type: none"> • Поперечные размеры дефекта • Глубина залегания дефекта • Толщина дефекта
<p>Характеристика</p> <ul style="list-style-type: none"> • Корректное и точное решение 	<p>Характеристика</p> <ul style="list-style-type: none"> • Некорректно поставленная задача, решение которой сводится к выбору оптимального варианта из множества возможных

то температурный сигнал, несущий информацию о дефектах, сопровождается для всех трех механизмов теплопередачи излучательно-поглощательными помехами.

Параметры внутренних дефектов определяют решением обратной задачи, т.е. инверсией уравнения (2.32):

$$\{D\} = \{l, d, h_x, h_y\} = \{U(x, y, \tau)\}^{-1}. \quad (2.33)$$

В отличие от обратных задач технической диагностики, связанных с интерпретацией экспериментальных данных, с помощью прямых задач производят математическое моделирование процедур НК. С ростом возможностей компьютерной техники популярность моделирования возрастает.

Его основными преимуществами являются:

- 1) установление "чистых", т.е. незашумленных, взаимосвязей между параметрами контроля (при отсутствии помех);
- 2) экономия времени, что особенно важно при оптимизации процедур НК;
- 3) возможность разработки и проверки алгоритмов решения обратных задач.

Краткая сравнительная характеристика прямых и обратных задач ТК приведена в табл. 2.7.

2.7. АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Классические решения нестационарной теории теплопроводности включают ТФХ изделий, их геометрические параметры, как правило, по одной пространственной координате, направленной в глубь изделия, а также параметры нагрева. Согласно теории подобия, эти параметры могут быть объединены в безразмерные критерии и числа подобия, что позволяет анализировать решения в обобщенном критериальном виде.

Наиболее распространенными безразмерными критериями являются:

- критерий Био $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ (L – толщина пластины), характеризующий обобщенную толщину изделия;

- число подобия Фурье $Fo = \frac{\alpha \tau}{L^2}$, характеризующее обобщенное время;

- критерий Предводителя Pd = $\frac{\omega L^2}{a}$ (ω – циклическая частота тепловых волн).

В задачах нагрева (охлаждения) бездефектных твердых тел импульсами и тепловыми волнами, которые типичны для ТК, нестационарные температуры полностью определяются совокупностью критериев $\{Bi, Fo\}$ или $\{Bi, Fo, Pd\}$.

Скрытые дефекты осложняют анализ в безразмерном виде. В качестве соответствующих безразмерных параметров дефектов предложены следующие (см. пп. 3.5 и 4.1):

- $h_x^* = \frac{h_x}{L} \left(\frac{\lambda_z}{\lambda_x} \right)^{1/2}$ – обобщенный раз-

мер дефекта в анизотропном изделии в направлении координаты x (h_x – поперечный размер прямоугольного дефекта в направлении координаты x);

- $R_d^* = \frac{R_d}{L/\lambda_z}$ – относительное теп-

ловое сопротивление дефекта;

- $Fo_d = \alpha \tau / l^2$ – число Фурье, отражающее течение безразмерного времени в дефектной области (односторонний ТК);

- $Bi = l / (\lambda R_d)$ – критерий Био, отражающий отношение тепловых сопротивлений слоя основного материала над дефектом и дефекта (односторонний ТК).

При экспериментальном определении параметров ТК (решении обратных задач математической физики) необходимо иметь в виду следующее:

- 1) время нестационарного процесса является специфическим измеряемым параметром;

2) в зависимости от геометрии изделия и процедуры испытаний те или иные параметры, могут выступать в виде комплексов, и их отдельная классификация невозможна;

3) многопараметрические задачи идентификации решают путем минимизации функционала, который определяют как разность между совокупностью экспериментальных данных, развивающихся во времени, и соответствующими теоретическими решениями; поэтому с более высокой точностью оценивают те параметры изделия, которые сильнее влияют на измеряемые (информативные) параметры;

4) одномерные классические решения позволяют оценить глубину залегания дефектов и их толщину, но не поперечные размеры.

Последний пункт означает, что основным отличием многомерных задач от одномерных является возможность учитывать диффузию тепла в материале объекта контроля вокруг дефектов конечных размеров.

2.7.1. Определение тепловой инерции материала (передняя поверхность полуограниченного тела, нагреваемого импульсом Дирака). Решение задачи нагрева полуограниченного тела импульсом Дирака имеет вид (см. табл. 2.3):

$$T = \frac{W}{e\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (2.34)$$

Уравнение (2.34) часто строят в координатах $\ln T = f(\ln \tau)$, где оно выражается прямой линией. В идеальном случае для любого момента времени τ^* тепловую инерцию тела можно определить по поверхностной температуре тела и измеренной поглощенной энергии:

$$e = \frac{W}{T(\tau^*)} \frac{1}{\sqrt{\pi\tau^*}}. \quad (2.35)$$

Последнее выражение иллюстрирует тот факт, что, используя решение для полуограниченного тела, можно определить

тепловую инерцию твердого тела как комплекс трех параметров ($e = \sqrt{C\rho\lambda}$), но невозможно определить каждый параметр в отдельности. Кроме того, при этом необходимо измерять *поглощенную* телом энергию, что на практике не всегда удается выполнить с необходимой точностью. Последнюю трудность можно преодолеть, используя метод эталона:

$$\frac{e}{e_{ref}} = \frac{T_{ref}(\tau^*)}{T(\tau^*)}, \quad (2.36)$$

где индекс *ref* относится к эталону. Далее покажем, как метод эталона применяют для обнаружения и оценки параметров подповерхностных дефектов.

2.7.2. Определение температуропроводности (задняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака). В классической работе У. Паркера и соавторов [19] предложено измерять ряд ТФХ, прежде всего температуропроводность, используя выражение для нестационарной температуры на задней поверхности адиабатической пластины, нагреваемой на передней поверхности коротким тепловым импульсом (импульсом Дирака), см. табл. 2.4:

$$\frac{T}{(Wa/\lambda L)} = \Theta_D^R = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2\pi^2 Fo}. \quad (2.37)$$

График функции Θ_D^R , показанный на рис. 2.5, стартует из нулевой точки и стремится к стационарному значению $T \rightarrow Wa/\lambda L$. В случае реальной (неадиабатической) пластины, температура задней поверхности достигает максимума, после чего спадает из-за сброса энергии в окружающую среду (см. штриховую линию на рис. 2.5).

Нарастающий фронт температурного отклика позволяет выделить характерные точки, каждой из которых соответствует характеристическое время теплопередачи τ^* , в частности:

- время достижения половины максимального значения $\tau_{1/2}$;

- время максимума первой производной $\tau_{m.d}$.

Для любого экспериментально измеренного времени τ^* значение коэффициента температуропроводности можно определить из очевидного соотношения:

$$a = Fo^* \frac{L^2}{\tau^*}, \quad (2.38)$$

где коэффициент Fo^* определяется из уравнения (2.37). В частности,

$$Fo^* = 0,1388 \text{ для } \tau_{1/2};$$

$$Fo^* = 0,0918 \text{ для } \tau_{m.d}. \quad (2.39)$$

Преимуществом использования характеристического времени $\tau_{m.d}$ является возможность определения температуропроводности в режиме реального времени, т.е. не дожидаясь времени наступления максимума температурной кривой, необходимого для вычисления $\tau_{1/2}$, а также его более слабая зависимость от интенсивности теплообмена с окружающей средой. Однако необходимость вычисления производной $\partial T / \partial \tau$ для зашумленного сигнала вызывает рост высокочастотных шумов, что снижает эффективность этого подхода. Поэтому наиболее применим метод Паркера с использованием характеристического времени $\tau_{1/2}$.

Метод Паркера, или импульсный метод (Parker's method, flash method), обладает высокой точностью, благодаря чему его используют в большинстве исследований по анализу температуропроводности твердых тел. Существуют различные модификации метода, в которых точность измерений повышают:

- 1) учетом теплоотдачи на поверхностях объекта контроля;
- 2) более строгим обоснованием выбора характеристического времени τ^* ;
- 3) учетом конечных размеров объекта контроля и т.п.

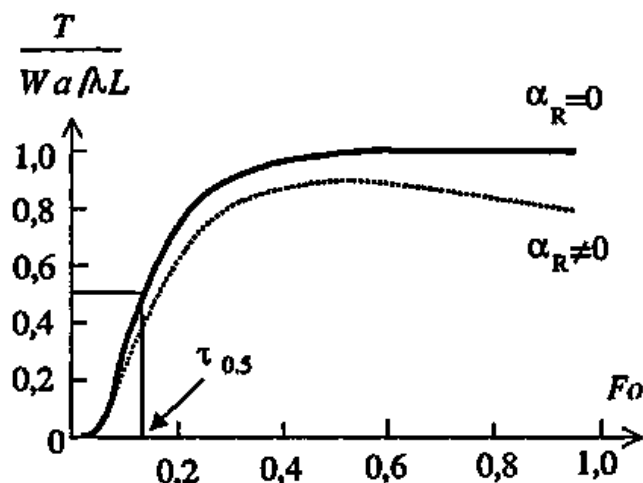


Рис. 2.5. Изменение температуры на задней поверхности пластины, нагреваемой импульсом Дирака

Помимо коэффициента теплопроводности, метод Паркера позволяет также определить коэффициент теплоемкости, для чего, наряду с толщиной изделия, необходимо измерить величину поглощенной энергии W . По известным a и λ можно определить теплоемкость: $C = \lambda / (\rho a)$.

Для передней (нагреваемой) поверхности адиабатической пластины, структура соответствующего импульсного решения (см. табл. 2.4) такова, что характерные точки на температурной кривой отсутствуют и определение ТФХ сложнее, чем при использовании решения для обратной поверхности. Чувствительность этого решения, например к изменениям температуропроводности, ниже, чем на задней поверхности.

2.7.3. Определение толщины изделия (передняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака). Представляет интерес определение остаточной толщины изделия, в особенности, при оценке степени коррозии самолетных панелей, труб и резервуаров, путем анализа температурного отклика на передней поверхности. На практике, как правило, неизвестны как толщина L , так и температуропроводность изделия a .

Базовая теория разработана для относительно тонких металлических пластин, нагрев которых в силу малых значений критерия Био ($Bi < 0,1$) является адиабатическим. Поэтому однородные области большой протяженности в течение длительного времени сохраняют температуру, близкую к адиабатическому стационарному значению $T = Wa/\lambda L$.

Если принять, что в зонах коррозионного износа толщина пластины снижена до значения $l \leq L$, то на передней поверхности пластины в конце теплового процесса возникает температурный сигнал между бездефектной и дефектной областями:

$$\Delta T = T_d - T_{nd} = \frac{Wa}{\lambda l} - \frac{Wa}{\lambda L}, \quad (2.40)$$

откуда потерю материала $\Delta L = L - l$ можно оценить по простой формуле

$$\frac{\Delta L}{L} = 1 - \frac{T_{nd}}{T_d}. \quad (2.41)$$

2.7.4. Определение оптимального времени обнаружения подповерхностных дефектов (полуограниченное тело, нагреваемое импульсом Дирака). Температуру полуограниченного адиабатического тела на глубине z определяют из соответствующего общего решения, которое аналогично решению (2.34):

$$\frac{T}{Wa/\lambda z} = \frac{1}{\sqrt{\pi Fo_z}} e^{-1/4 Fo_z}, \quad (2.42)$$

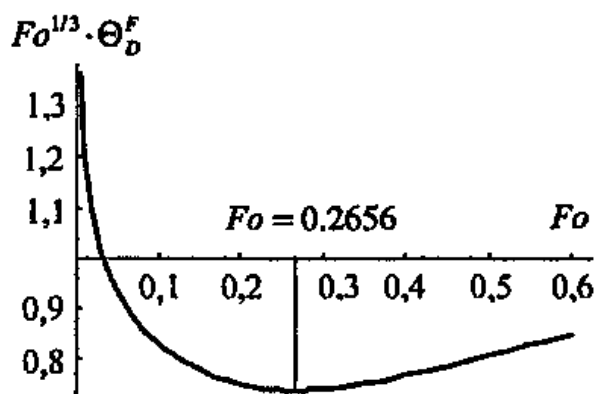


Рис. 2.6. График функции $Fo^{1/3} \cdot \Theta_D^F$ для передней поверхности пластины, нагреваемой импульсом Дирака

где $Fo_z = \sigma t/z^2$.

Феноменологически можно считать, что дефект в виде нарушения сплошности, расположенный на глубине $z = l$, будет обнаружен, если "пакет тепловой энергии", высвободившийся на поверхности, достигнет точки z , отразится от поверхности дефекта и вернется на поверхность. Анализируя производную $\partial T/\partial t$ функции из формулы (2.42), можно показать, что максимальная температура на глубине l имеет место при $t_l = l^2/2a$. Тогда оценкой оптимального времени обнаружения подповерхностного дефекта является

$$\tau_m = 2t_l = l^2/a. \quad (2.43)$$

Границы применимости оценки (2.43), часто рекомендуемой различными исследователями, показаны ниже.

2.7.5. Манипуляции с функцией температурного отклика на передней поверхности пластины. Одной из трудностей анализа температурного отклика передней поверхности пластины на стимуляцию импульсом Дирака является отсутствие в нем характерных временных точек. Тем не менее, такие точки можно создать искусственно путем соответствующей обработки температурного отклика.

В главе 4, посвященной тепловой дефектометрии, будет показано, что в функции температурного отклика передней поверхности изделия имеются характерные точки, обусловленные границами раздела сред между различными материалами, в частности границами дефектов.

Формированием некоторых комплексных параметров можно подчеркнуть характерные точки, а их положение во времени использовать для определения глубины залегания границы раздела.

Например, можно рассмотреть искусственную функцию, образованную произведением кубического корня из времени на основную функцию:

$$\Theta' = Fo^{1/3} \Theta_D^F, \quad (2.44)$$

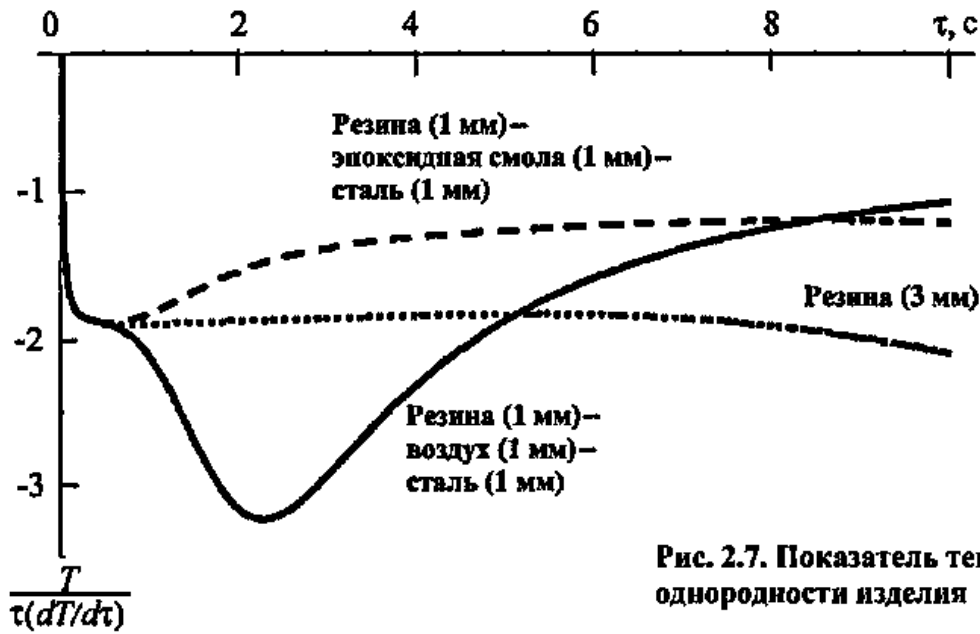


Рис. 2.7. Показатель тепловой однородности изделия

которая характеризуется минимумом при $Fo^* = 0,2656$ (рис. 2.6). Очевидно, найдя этот минимум соответствующей обработке экспериментальных данных, можно определить коэффициент температуропроводности.

О.Ю. Троицким с сотрудниками предложен другой безразмерный параметр

$$K = \frac{T(\tau)}{\tau [\partial T / \partial \tau]}, \quad (2.45)$$

названный *показателем тепловой однородности образца* [20].

Физический смысл этого параметра связан с использованием регулярного режима нагрева, в ходе которого темп нагрева однородного изделия остается постоянным, т.е. производная от температуры по времени не изменяется.

На рис. 2.7 изображено изменение параметра K во времени для пластины толщиной 3 мм, нагреваемой импульсом Дирака. Рассмотрено три варианта структуры пластины.

Для однородного изделия величина K , будучи отрицательной на стадии охлаждения, после прохождения начального нерегулярного режима остается постоянной вплоть до длительных времен, когда начинают сказываться задняя поверхность и теплоотдача.

Видимые отклонения K от постоянного значения в определенные моменты

времени связаны с наличием границ раздела.

Граница между резиной и эпоксидной смолой прослеживается слабо ввиду близости ТФХ этих материалов. Существенное отклонение K в отрицательную область имеет место для границы раздела резина-воздух. В свою очередь более теплопроводная сталь вызывает отклонение K в положительную область.

При экспериментальной реализации данного метода следует иметь в виду, что операции деления и дифференцирования, необходимые для формирования K , могут существенно ухудшать отношение сигнал/шум, поэтому характерные точки во временном развитии показателя тепловой однородности целесообразно использовать при анализе тонких изделий, состоящих из разнородных материалов.

2.7.6. Нестационарный нагрев многослойных пластин. Моделью структуры из двух материалов, соединенных связующим материалом, в котором возникают дефекты, может служить трехслойная пластина, в которой средний слой поочередно представляет либо связующий материал, либо дефект (рис. 2.8). Величину температурного сигнала от дефекта рассчитывают как разность двух решений, первое из которых соответствует дефектной области, а второе – бездефектной.

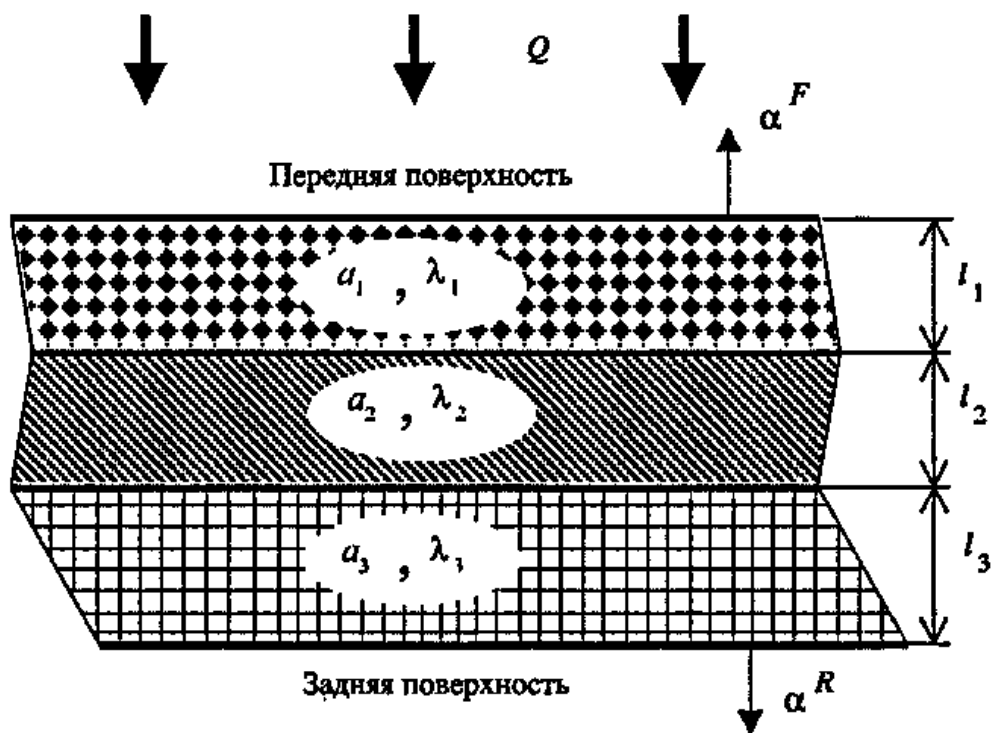


Рис. 2.8. Трехслойная модель ТК (емкостной дефект)

Трехслойная неадиабатическая пластина с идеальным контактом слоев. Данная модель описывает емкостные дефекты, характеризующиеся, как и бездефектные слои, определенными значениями тепло- и температуропроводности:

$$a_i \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad i = 1 \dots 3; \\ z = 0 - L; \quad \tau > 0; \quad (2.46a)$$

$$T(z, \tau = 0) = 0; \quad (2.46b)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(z=0, \tau)}{\partial z} = Q(\tau) - \alpha^F T_1(z=0, \tau); \quad (2.46b)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(z=L, \tau)}{\partial z} = \alpha^R T_3(z=L, \tau) \quad (2.46g)$$

$$\lambda_j \frac{\partial T_j(z=l_j, \tau)}{\partial z} = \lambda_{j+1} \frac{\partial T_{j+1}(z=l_j, \tau)}{\partial z}; \\ j = 1-2; \quad (2.46d)$$

$$T_j(z=l_j, \tau) = T_{j+1}(z=l_j, \tau); \quad j = 1-2. \quad (2.46e)$$

Уравнение (2.46a) – одномерное дифференциальное уравнение теплопро-

водности параболического типа; (2.46b) – начальное условие; (2.46в) – граничное условие на передней (нагреваемой) поверхности; (2.46г) – граничное условие на задней поверхности; уравнения (2.46д) и (2.46е) условия непрерывности тепловых потоков и температуры на границах слоев. В зависимости от вида функции $Q(\tau)$ можно моделировать различные типы нагрева. Например, решение для функции нагрева в виде прямоугольной ступеньки T_{st} , позволяет получить решения для нагрева импульсом Дирака (T_D) и прямоугольным импульсом (T_{sp}):

$$T_D(\tau) = \frac{\partial T_{st}(\tau)}{\partial \tau}; \quad (2.47) \\ T_{sp}(\tau, \tau_h) = T_{st}(\tau) - T_{st}(\tau - \tau_h).$$

Базовым считают решение $T_D(\tau)$ для задачи ТК, в которой нагрев осуществляется импульсом Дирака. Решение для случая нагрева импульсом произвольной формы $\varphi(\tau)$ получают с помощью интеграла Дюамеля:

$$T_\varphi(\tau) = \int_0^\tau T_D(\tau - \tau') \varphi(\tau') d\tau',$$

причем
$$\int_0^{\infty} \varphi(\tau') d\tau' = 1. \quad (2.48)$$

На практике часто используют решение для прямоугольного импульса нагрева, которое легко трансформируется в случай нагрева мгновенным импульсом, а также в случай непрерывного нагрева (программа "МультиЛэйер-3" ООО "Иновация", Россия).

Трехслойная модель (2.46) является базовой, поскольку с ее помощью можно моделировать различные задачи ТК (покрытие на подложке, многослойные изделия и т.п.). При этом возможно изучать влияние на температурный сигнал $\Delta T(\tau)$ большинства практических параметров за исключением поперечных размеров дефектов. Принципиально одномерная модель вида (2.46) непригодна для моделирования нагрева тел локализованным (сканирующим или неподвижным) источником тепла.

Решения задач нагрева многослойных изделий в явном виде требуют трудоемких вычислений, из которых достаточно нетривиальным является необходимость вычислять корни сложных трансцендентных уравнений. Поскольку для этого используют компьютерные средства, преимущества подобных аналитических решений становятся малозначимыми по сравнению с гибкими численными решениями. Тем не менее, многослойные аналитические модели целесообразно использовать для оценки точности численных решений в дефектных областях, что затруднительно сделать с помощью классических решений.

Расчет задач нагрева неадиабатических изделий с числом слоев более 3 в аналитическом виде теоретически возможен, но практически труден из-за громоздкости получающихся выражений. В этих случаях рекомендуется применять численные методы. При наличии в теле нескольких тепловых барьеров, т.е. зон контакта различных материалов, односто-

ронным методом удается исследовать только 2 ... 3 барьера, наиболее близко расположенных к передней поверхности. Для анализа более глубоких слоев следует применять двусторонний тепловой метод.

Анализ нагрева многослойных адиабатических пластин удобно проводить методом *термического четырехполюсника*, теория которого и соответствующие компьютерные программы описаны в [18]. Часто ограничиваются анализом решений в области Лапласа без возвращения в область оригиналов. Этот метод для решения задач тепловой дефектометрии описан в п. 4.5.

Трехслойная адиабатическая пластина с идеальным контактом слоев. Пренебрежение теплоотдачей на наружных поверхностях пластины упрощает решение и делает его более пригодным для использования в задачах тепловой дефектометрии.

Решение для передней поверхности адиабатической трехслойной пластины, нагреваемой импульсом Дирака, получено Д. Балажа и др. [6] (модель (рис. 2.8) при $\alpha^F = \alpha^R = 0$):

$$\frac{T(\tau, z=0)}{T_m} = 1 + 2 \frac{\sum_{i=1}^4 \chi_i v_i}{\sum_{i=1}^4 \chi_i} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{i=1}^4 \chi_i \cos(v_i \gamma_n)}{\sum_{i=1}^4 \chi_i v_i \cos(v_i \gamma_n)} e^{-\gamma_n^2 \tau / \eta_i^2}, \quad (2.49)$$

где γ_n -- корень трансцендентного уравнения;

$$\sum_{i=1}^4 \chi_i \sin(v_i \gamma) = 0; \quad T_m = W / \sum_{i=1}^3 \rho_i C_i l_i;$$

$$\chi_1 = e_{13} + e_{12} + e_{23} + 1; \quad \omega_1 = \eta_{13} + \eta_{23} + 1;$$

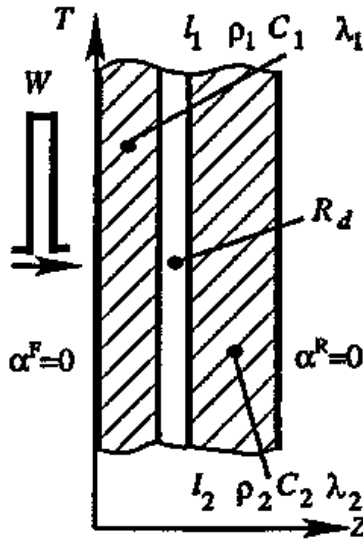


Рис. 2.9. Двухслойная пластина с резистивным дефектом

$$\begin{aligned}\chi_2 &= e_{13} - e_{12} + e_{23} - 1; \\ \omega_2 &= \eta_{13} + \eta_{23} - 1; \\ \chi_3 &= e_{13} + e_{12} - e_{23} + 1; \\ \omega_3 &= \eta_{13} - \eta_{23} + 1; \\ \chi_4 &= e_{13} + e_{12} - e_{23} - 1; \\ \omega_4 &= \eta_{13} - \eta_{23} - 1; \\ e_y &= e_i; e_i = \sqrt{\lambda_i C_i \rho_i}; \eta_y = \eta_i / \eta_j; \\ \eta_i &= l_i / \sqrt{a_i};\end{aligned}$$

W – плотность энергии нагрева в Дж/м².

Двухслойная неадиабатическая пластина с контактным сопротивлением между слоями (нагрев прямоугольным импульсом). Решение (2.49) имеет более простой вид в случае нагрева двух адиабатических пластин толщиной соответственно l_1 и l_2 , разделенных резистивным слоем с тепловым сопротивлением $R_d = d/\lambda_d$ (рис. 2.9). Температуру передней поверхности после воздействия прямоугольного импульса длительностью τ_h определяют по выражению [21]:

$$T^F(\tau > \tau_h) = \sum_{n=1}^{\infty} T_{\infty} \frac{4L\mu_n}{D(\mu_n)} \frac{\exp(a\mu_n\tau_h) - 1}{a\mu_n\tau_h} \times \exp[-a\mu_n\tau], \quad (2.50)$$

где $T_{\infty} = \frac{Q\tau_h a}{\lambda L} = \frac{W}{C\rho L}$; $W = Q\tau_h$;

$$\begin{aligned}D(\mu_n) &= \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \right)^2 2\mu_n l_1 + \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \operatorname{tg}(\mu_n l_1) \right] \sin(2\mu_n l_1) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \cos(\mu_n l_1) - \sin(\mu_n l_1) \right)^2 \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\sin(\mu_n l_2) - \frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \cos(\mu_n l_2)}{\sin(\mu_n l_2) - \frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \cos(\mu_n l_2)} \right)^2 \right. \\ &\quad \times \left\{ \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \right)^2 2\mu_n l_2 + \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \right)^2 + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \frac{\alpha}{\lambda\mu_n} \operatorname{tg}(\mu_n l_2) \right] \sin(2\mu_n l_2) \right\}.\end{aligned}$$

где T_{∞} – однородная температура адиабатического образца ($\alpha = 0$) при больших временах; μ_n – корни трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned}\frac{\lambda\mu}{1/R_d} &= \operatorname{ctg} \left[\mu l_1 - \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu} \right) \right] + \\ &+ \operatorname{ctg} \left[\mu l_2 - \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha}{\lambda\mu} \right) \right],\end{aligned} \quad (2.51)$$

которые находят одним из известных способов.

Двухслойная адиабатическая пластина с контактным сопротивлением между слоями (нагрев импульсом Дирака). Еще более простое решение получено Д. Балажа и др. для случая нагрева адиабатической пластины импульсом Дирака [6] (рис. 2.9):

$$\begin{aligned}\frac{T_D(z=0, \tau)}{T_m} &= 1 + 2 \frac{\sum_{i=1}^2 \chi_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^2 \chi_i} \sum_{k=1}^{\infty} \times \\ &\quad \frac{\sum_{i=1}^2 \chi_i \cos(\gamma_i, v_k) + (-1)^i \times}{\sum_{i=1}^2 \chi_i \gamma_i \cos(\gamma_i, v_k) - (-1)^i R^* \cos(\gamma_i, v_k) +}\end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{\times R^* v_k \sin(\gamma_i v_k)}{+ (-1)^i R^* \gamma_i v_k \sin(\gamma_i v_k)} e^{-v_k^2 \tau / \eta_2^2}; \quad (2.52)$$

$$T_m = 1 / \sum_{i=1}^2 C_i \rho_i l_i; \quad \chi_i = e_{12} - (-1)^i;$$

$$\gamma_i = \eta_{12} - (-1)^i; \quad i = 1, 2;$$

$$\eta_{12} = \eta_1 / \eta_2; \quad R_d^* = e_1 R_d / \eta_2;$$

$$e_i = \sqrt{C_i \rho_i \lambda_i}; \quad e_{12} = e_1 / e_2;$$

$$\eta_i = l_i / \sqrt{a_i};$$

v_k — k -й положительный корень трансцендентного уравнения:

$$\sum_{i=1}^2 \chi_i \sin(\gamma_i v) - (-1)^i R_d^* v \cos(\gamma_i v) = 0.$$

Величина R_d^* является безразмерным тепловым сопротивлением дефекта, зависящим от ТФХ обоих слоев.

В рамках одномерного приближения решение (2.52) используют для изделий из металлов и композиционных материалов с дефектами в виде расслоений.

2.7.7. Одномерные тепловые волны. Тепловые волны возникают в результате инжекции в исследуемый объект модулированной тепловой энергии.

Полуограниченное адиабатическое тело. Рассмотрим некоторые общие черты гармонических температурных волн, распространяющихся в адиабатическом полуограниченном твердом теле в результате стимуляции поверхности тела тепловым потоком, который описывается выражением

$$Q(\tau) = Q_0 [1 + \cos(\omega \tau)], \quad (2.53)$$

где ω — циклическая частота.

Адиабатическое граничное условие при $z = 0$ имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = Q_0 [1 + \cos(\omega \tau)] = \text{Re} \{ Q_0 [1 + \exp(j\omega \tau)] \}, \quad (2.54)$$

где Re означает действительную часть комплексного выражения.

Функция нагрева включает два члена: постоянный $Q_0/2$ и осциллирующий $\exp(j\omega \tau)$ (постоянная составляющая нагрева будет опущена в дальнейшем рассмотрении этого параграфа). Решение одномерного дифференциального уравнения (2.14) для осциллирующей составляющей имеет вид

$$T(z, \tau) = \frac{Q_0}{\lambda \sigma} \exp(-\sigma x + j\omega \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{C \rho \lambda \omega}} \times \times \exp\left(-z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \exp\left[j\left(\omega \tau - z \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \frac{\pi}{4}\right)\right], \quad (2.55)$$

где $\sigma = (1 + j)\sqrt{\omega/(2a)}$. Выражение (2.55) аналогично выражению для амплитуды электромагнитной волны в скин-слое электропроводных материалов (металлов). Аналогия с оптическим излучением позволяет ввести в рассмотрение ряд эффектов, характерных для волновых процессов, таких как отражение, преломление, рассеяние и т.п.

Как любые распространяющиеся волны, тепловые волны в твердом теле обладают *волновым вектором*

$$\text{Re}(\sigma) = 1/\mu = \sqrt{\omega/(2a)},$$

где μ — *длина тепловой диффузии*.

С учетом μ выражение (2.55) принимает вид:

$$T(z, \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{C \rho \lambda \omega}} \exp(-z/\mu) \times \times \exp\left[j\left(\omega \tau - z/\mu - \frac{\pi}{4}\right)\right]. \quad (2.56)$$

Тепловые волны экспоненциально затухают с ростом глубины; можно считать, что они не проникают глубже трех длин тепловой диффузии ($z = 3\mu$). Таким образом, глубина проникновения тепловых волн увеличивается с повышением темпе-

ратуропроводности и/или уменьшением частоты.

Например, на поверхности Земли действуют два типа тепловых волн с периодом, равным одним суткам (суточные волны) и одному году (годовые волны). Наиболее глубоко (2 ... 3 м) проникают в почву именно годовые волны, обладающие сверхнизкой частотой. Суточные температурные колебания достигают глубины 10 ... 20 см, что используется в тепловом методе обнаружения заглубленных противотанковых мин.

Тепловые волны обладают также *дисперсией*, поскольку высокочастотные волны распространяются быстрее низкочастотных. *Фазовая скорость* тепловых волн определяется как

$$v = \omega \mu = \sqrt{2a\omega}. \quad (2.57)$$

Сдвиг фазы между *стимулирующей* тепловой волной и *поверхностной* волной ($z = 0$) равен -45° . С ростом глубины сдвиг фазы возрастает на величину, определяемую соотношением $\varphi = -z/\mu - \pi/4$.

Тепловая волна характеризуется *импедансом*

$$Z = \frac{1}{\lambda \sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega C\rho\lambda}}, \quad (2.58)$$

который определяет амплитуду волны на поверхности изделия. Амплитуда волны возрастает в материалах с малой тепловой инерцией $e = \sqrt{C\rho\lambda}$.

Подобно коэффициенту температуропроводности, коэффициент *тепловой активности* (*тепловая инерция*) является динамической характеристикой материала; как правило, большая температуропроводность сопровождается большей тепловой инерцией. С этой точки зрения парадоксальными свойствами обладает воздух, который благодаря низкой плотности имеет коэффициент температуропроводности, близкий к металлам, но характеризуется очень низким коэффициентом тепловой активности.

Полуограниченное неадиабатическое тело. Решение задачи нагрева полуограниченного неадиабатического тела гармоническим тепловым потоком, приведенное в табл. 2.5, является более общим, нежели решение (2.55), однако оно не содержит параметра толщины изделия. Поэтому более детальный анализ амплитуды и фазы температурных волн выполнен ниже для неадиабатической пластины.

Неадиабатическая пластина. Для пластины с интенсивностью теплообмена α на передней поверхности и адиабатической задней поверхностью решение имеет вид:

$$\frac{T(Z, \tau)}{Q_m / \alpha} = A \cos(Pd Bi - \Psi); \quad (2.59)$$

$$Z = z/L; \quad A = (N_1 N_{-1})^{1/2} \text{ и т.д.}$$

где Z – координата, направленная вглубь изделия; Q_m – максимальная плотность мощности поглощенного теплового потока; α – коэффициент теплообмена на нагреваемой (передней) поверхности; A – амплитуда тепловой волны; Ψ – фаза тепловой волны; L – толщина пластины; λ – коэффициент теплопроводности; Bi и Pd – критерии Био и Предводителяева.

При асимптотическом анализе (2.59) можно показать, что амплитуда и фаза на поверхности пластины при $L \rightarrow \infty$ будут соответствовать найденным из соответствующих выражений для полуограниченного тела.

В теории тепловых волн обычно анализируют затухание амплитуды и сдвиг фазы тепловой волны с глубиной, тогда как в ТК имеют дело с поверхностным решением ($z = 0$), параметром которого является глубина залегания дефекта.

Ниже использовано решение (2.59), согласно которому поверхностная температура есть функция трех переменных: $\{\tau, Bi, Pd\}$. Амплитуда и фаза температурной волны зависят от двух параметров: Bi, Pd .

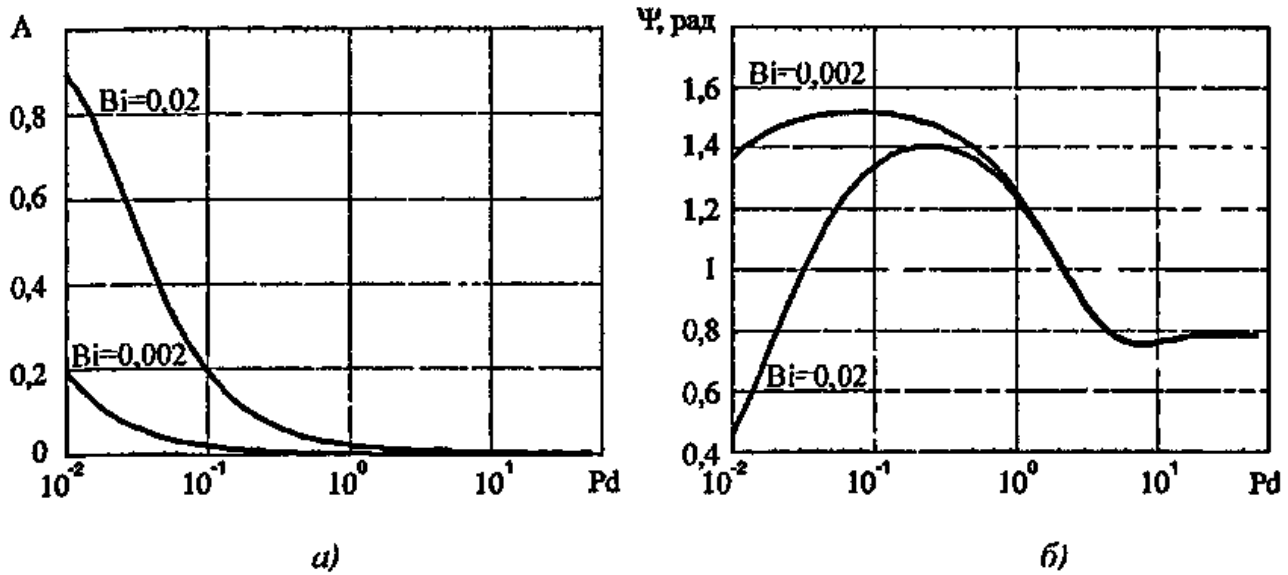


Рис. 2.10. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловой волны в обобщенных координатах, определенные по формулам (2.59)

Графики этих функций изображены на рис. 2.10 для значений Bi и Pd , соответствующих композиционным материалам. Амплитуда температурной волны снижается с ростом критерия Предводителя, асимптотически стремясь к нулю. В соответствии с ранее сделанными выводами это означает, что высокочастотные волны не создают заметных сигналов на поверхности изделий значительной толщины, которые характеризуются большой тепловой инерцией.

Температурные волны на границе раздела двух сред. Рассмотрим явления отражения и преломления (пропускания) тепловых волн на границе раздела двух сред (рис. 2.11). Коэффициенты отражения R и пропускания T равны [24]:

$$R = \frac{\cos(\Theta_{in}) - b \cos(\Theta_{refr})}{\cos(\Theta_{in}) + b \cos(\Theta_{refr})}; \tag{2.60}$$

$$T = \frac{2 \cos(\Theta_{in})}{\cos(\Theta_{in}) + b \cos(\Theta_{refr})},$$

где $b = e_2/e_1$ характеризует степень теплового согласования двух сред, а индексы in и $refr$ обозначают соответственно углы падения и преломления.

В случае плоских (одномерных) волн

$$R = \Gamma = \frac{1-b}{1+b}; \quad T = \frac{2}{1+b}. \tag{2.61}$$

Таким образом, тепловые волны проходят через границу раздела двух сред и отражаются от нее аналогично электромагнитным или акустическим волнам. Если тепловая волна из твердого тела выходит в воздух, то коэффициент ее отражения близок к единице из-за низкого коэффициента тепловой активности воздуха. Тем не менее, в случае тонких воздушных дефектов ситуация становится более сложной из-за возникновения интерференции тепловых волн в воздушном промежутке. При этом решающую роль начинает играть толщина дефекта (см. п. 3.2.3).

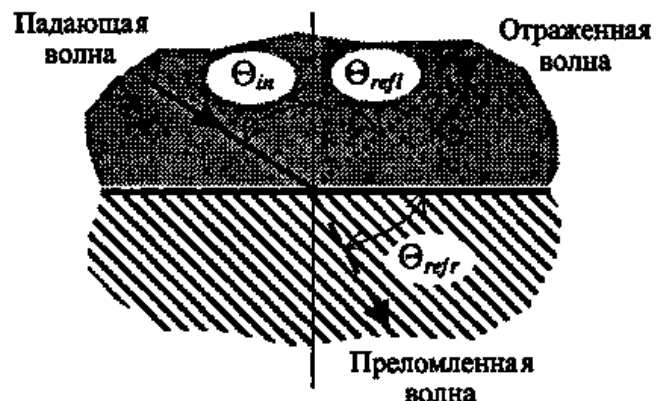


Рис. 2.11. Отражение и преломление тепловых волн на границе раздела двух сред

2.7.8. Связь импульсных и гармонических тепловых волн. Процессы как импульсного, так и гармонического нагрева твердых тел имеют одну и ту же физическую природу. Формально решения для тепловых волн получены в области частот (frequency-domain), в то время как импульсные решения находятся во временной области (time-domain). Как известно, связь таких решений осуществляется преобразованием Лапласа. Решение во временной области $T(\tau)$ может быть получено с помощью ряда Фурье, используя решение в частотной области:

$$T(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A(\omega_n) T(z, \omega_n, \tau), \quad (2.62)$$

где $T(z, \omega_n, \tau)$ – плоская тепловая волна циклической частоты ω_n , распространяющаяся в направлении координаты z и используемая в качестве базисной функции ряда Фурье; $A(\omega_n)$ – вклад волны данной частоты в общий импульсный отклик.

Поскольку спектр прямоугольного импульса непрерывен, ряд Фурье может быть заменен интегральным преобразованием.

Приведенное выше поясним на примере нагрева полуограниченного тела импульсом Дирака. Дираковское выделение энергии на поверхности тела $z=0$ эквивалентно нагреву тепловыми волнами непрерывного спектра частот и одинаковой энергии, которые являются синфазными при $z=0$ и $\tau=0$.

Распространение исходного теплового импульса в глубь тела можно трактовать как распространение пакета тепловых волн различной частоты, которые испытывают затухание по амплитуде и сдвиг по фазе в зависимости от частоты. Температурный отклик тела на глубине z в момент времени τ может быть получен суммированием амплитуд всех тепловых волн при (z, τ) , для чего следует применить формулу (2.55):

$$T(z, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_0}{\sigma_n} \exp(-\sigma_n z) \exp(j\omega_n \tau). \quad (2.63)$$

Здесь Q_0 выражено в Вт/м². Заменяя ряд интегралом и обозначив $j\omega = s$, получим:

$$T(z, \tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q_0}{\lambda \sigma(s)} \exp[-\sigma(s)z] \times \\ \times \exp(s\tau) ds = W_0 L^{-1} \left[\frac{\exp(-\sigma z)}{\lambda \sigma} \right], \quad (2.64)$$

где L^{-1} – обратное преобразование Лапласа; W_0 – полная энергия исходного импульса, выраженная в Дж/м². С учетом таблицы обратного преобразования Лапласа и $\sigma = \sqrt{s/a}$ окончательное решение имеет вид

$$T(z, \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau}} \exp(-z^2/4a\tau), \quad (2.65)$$

идентичный соответствующему решению в табл. 2.3.

2.7.9. Стационарная теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку и определение термического сопротивления. В динамическом ТК исследуют процессы нестационарной теплопроводности. Ниже рассмотрена стационарная теплопередача через плоскую стенку, поскольку соответствующие задачи возникают при тепловизионной диагностике ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также дымовых труб. В особенности это относится к определению термического сопротивления стенки.

Пусть плоская стенка разделяет две среды с различной температурой T_{in}^a и T_{out}^a (рис. 2.12). Теплообмен на поверхностях пластины характеризуется коэффициентами α_{in} и α_{out} . Однослойная пластина обладает термическим сопротивлением $R_t = L/\lambda$, многослойная

$R_t = \sum_{i=1}^N L_i / \lambda_i$. Тепловой поток через стенку

$$Q = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{R_t} \text{ или } Q = \frac{T_{in}^a - T_{out}^a}{R}, \quad (2.66)$$

где $R = 1/\alpha_m + R_t + 1/\alpha_{out}$ — полное тепловое сопротивление стенки с учетом сопротивлений пограничных слоев, зависящих от соответствующих коэффициентов теплообмена.

Схеме (рис. 2.12) соответствует тепловизионная диагностика качества теплоизоляции дымовых труб или ограждающих конструкций строительных сооружений. С помощью тепловизора измеряют температурное поле на наружной поверхности ствола трубы (стены здания) T_{out}^w и по его амплитуде или текстуре судят о наличии скрытых дефектов и оценивают их параметры (см. главу 9).

Результат решения соответствующей прямой задачи теплопроводности для поверхностной температуры имеет вид:

$$T_{out}^w = \frac{T_{in}^a + \alpha_{out} T_{out}^a \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + R_t \right)}{1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t}. \quad (2.67)$$

Определение термического сопротивления стенки представляет собой типичную обратную задачу технической диагностики, которую, согласно ГОСТ 26254-84, решают измерением теп-

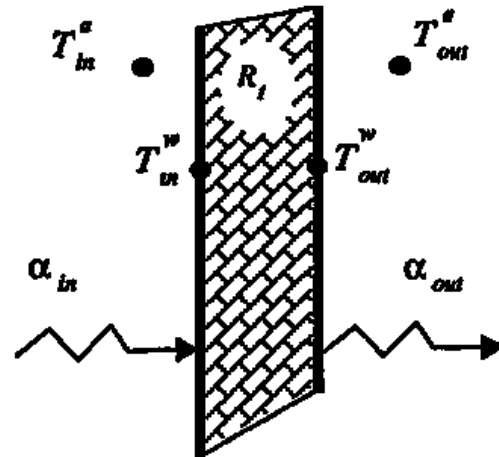


Рис. 2.12. Теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку

лового потока через исследуемую стенку; тепловизор используют как средство измерения температуры внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции.

В работе [25] на примере тепловизионной диагностики дымовых труб показано, что ИК-термография более пригодна для оценки локальных вариаций термического сопротивления стенок, нежели для определения его абсолютного значения. Если на наружной поверхности ограждающей конструкции измерить с помощью тепловизора величину поверхностного температурного градиента ΔT_{out}^w в зоне предполагаемого дефекта, то соответствующее ему изменение термического сопротивления можно найти по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= \Delta T_{out}^w / \frac{\partial T_{out}^w}{\partial R_t} = \\ &= \frac{\left(1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t \right)^2}{\alpha_{out} (T_{out}^a - T_{in}^a)} \Delta T_{out}^w. \end{aligned} \quad (2.68)$$

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ

3.1. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТК

Одномерные, в том числе многослойные, задачи решают аналитически с использованием *операционного метода, метода термического четырехполюсника или функций Грина*, тогда как для многомерных моделей наиболее пригодны *численные методы*. Ниже будут рассмотрены некоторые особенности применения аналитических и численных методов при исследовании теплопередачи в твердых телах, содержащих скрытые дефекты типа нарушения сплошности.

3.1.1. Теплофизическое описание дефектов. Внутренние дефекты искажают регулярное течение тепловых потоков в объекте контроля и соответственно приводят к локальным температурным аномалиям, которые передаются через материал объекта на его поверхность, где регистрируются аппаратурой ТК в виде температурных сигналов $\Delta T(x, y, z = 0, \tau)$.

Внутренние дефекты различного вида описываются различными граничными условиями. Если дефект моделируют слоем инородного материала, например, газонаполненным промежутком между слоями композита, на границе тело-дефект имеют место условия неразрывности теплового потока и температуры:

$$T_{nd} = T_d; \quad \lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}. \quad (3.1)$$

При введении условий (3.1) необходимо решать дифференциальное уравнение теплопроводности не только в основном материале, но также и в дефекте, "сшивая" решения на границе дефект - основной материал. При этом распределение температуры в объекте контроля бу-

дет зависеть от теплопроводности и температуропроводности (теплоемкости) дефекта.

Теплоемкость дефекта может существенно влиять на величину температурного сигнала и его временное развитие в ходе нагрева/охлаждения, если она сопоставима с теплоемкостью объекта контроля (в двусторонней процедуре ТК) или слоя материала над дефектом (в односторонней процедуре). Такие дефекты иногда называют *емкостными*. Емкостными дефектами являются противопехотные мины, размещаемые в почву на глубину до 10 см.

Влияние теплоемкости дефекта также может быть заметным в случае обширных неглубоких расслоений в композиционных материалах. Емкостной характер дефекта ответствен за так называемую *инверсию температурного сигнала*, когда дефектная область над низкотеплопроводным (воздушным) дефектом в односторонней процедуре ТК становится холоднее бездефектных областей, т.е. $\Delta T(\tau) < 0$ (см. также п. 3.8.1).

Если теплоемкостью дефекта можно пренебречь, то его основной теплофизической характеристикой является тепловое сопротивление $R_d = d/\lambda_d$. Такие дефекты часто называют *резистивными*. На границах резистивных дефектов температура изменяется скачкообразно, а тепловой поток остается неразрывным:

$$\begin{aligned} T_{d1} - T_{d2} &= R_d \left(-\lambda \frac{\partial T_{d1}}{\partial z} \right); \\ -\lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} &= -\lambda_d \frac{\partial T_{d1}}{\partial z}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где индексы $d1$ и $d2$ обозначают переднюю и заднюю поверхности дефекта.

В зоне контакта двух шероховатых материалов возникает "контактное тепловое сопротивление". Дефекты такого вида характерны для сварных соединений и покрытий. В частности, при диффузионной сварке возможны дефекты на границе свариваемых материалов, в зоне которых имеется контакт материалов, но нет их взаимного проникновения. Аналогичные дефекты, называемые в англоязычной литературе "целующимися" (kissing), могут возникать между слоями композиционного материала.

Модели ТК с резистивными дефектами имеют более простой вид и часто используются при разработке алгоритмов тепловой дефектометрии.

3.1.2. Преобразование Лапласа и метод "термического четырехполюсника". В классической теории теплопроводности большинство решений задач нагрева тел простой формы получено с помощью интегрального преобразования Лапласа.

Преобразование Лапласа $F(p)$ функции $f(\tau)$ определяется выражением

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-p\tau} d\tau = L[f(\tau)]. \quad (3.3)$$

Обратное преобразование осуществляют по формуле обращения

$$f(\tau) = L^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} F(p) e^{p\tau} dp, \quad (3.4)$$

где интегрирование проводят в комплексной плоскости вдоль прямой $\sigma = \text{const}$ параллельной мнимой оси.

Другая форма записи (3.4)

$$f(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{(-1)^n}{n!} \left(\frac{n}{\tau} \right)^{n-1} F^{(n)} \left(\frac{n}{\tau} \right) \right]. \quad (3.5)$$

Если изображение $F(p)$ есть дробная функция p , что часто встречается в задачах ТК,

$$F(p) = \frac{\varphi(p)}{\eta(p)} = \frac{A_0 + A_1 p + A_2 p^2 + \dots}{B_1 p + B_2 p^2 + \dots}, \quad (3.6)$$

то по теореме разложения

$$f(\tau) = L^{-1} \left[\frac{\varphi(p)}{\eta(p)} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi'(p_n)}{\eta'(p_n)} e^{p_n \tau}, \quad (3.7)$$

где p_n – простые корни $\eta(p)$, причем знаменатель $\eta(p)$ не содержит свободного члена.

Если $F(p)$ есть отношение двух полиномов, причем степень полинома $\varphi(p)$ меньше степени полинома $\eta(p)$ и полином $\eta(p)$ имеет корни кратности k в точках p_m , то

$$f(\tau) = L^{-1} \left[\frac{\varphi(p)}{\eta(p)} \right] = \sum_m \frac{1}{(k-1)!} \lim_{p \rightarrow p_m} p \times \left\{ \frac{d^{k-1}}{dp^{k-1}} \left[\frac{\varphi(p)(p-p_m)^k}{\eta(p)} e^{p\tau} \right] \right\}, \quad (3.8)$$

где суммирование производят по всем корням $F(p)$.

В простых случаях оригинал изображения можно найти в соответствующих таблицах.

Одной из основных целей теоретического анализа задач ТК является разработка алгоритмов решения обратных задач с целью определить параметры скрытых дефектов по результатам экспериментальных наблюдений. Аналитические решения, полученные классическими методами, настолько громоздки, что их обращение (инвертирование) невозможно. Относительно простые решения прямых и обратных задач ТК, в основе которых лежит анализ решений в области Лапласа, где соответствующие формулы носят алгебраический характер, получены с помощью метода "термического четырехполюсника" [18] (см. также п. 4.5). Ниже изложены основные положения этого метода.

Пусть протяженная однородная пластина толщиной l нагревается тепловым потоком Q . Одномерное распределение

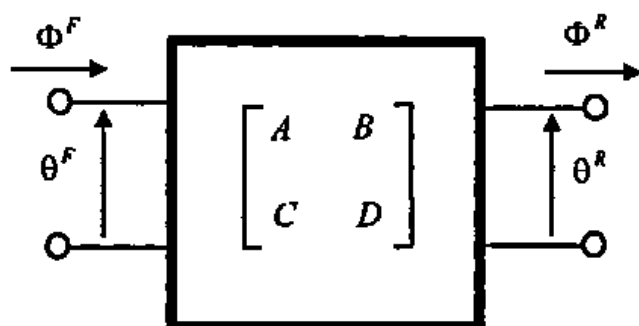


Рис. 3.1. Матричное представление задачи нагрева однослойной пластины

температуры в пластине описывается функцией $T(z, \tau)$ (как было условлено ранее, начальная температура принята нулевой и решение рассматривается для избыточной температуры). Эта функция есть решение дифференциального уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3.9)$$

причем $T(\tau = 0) = 0$. Плотность теплового потока внутри пластины определена законом Фурье

$$Q(z, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z}. \quad (3.10)$$

Образы Лапласа для $T(z, \tau)$ и $q(z, \tau)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \Theta(z, p) &= \int_0^{\infty} T(z, \tau) e^{-p\tau} d\tau; \\ \Phi(z, p) &= \int_0^{\infty} Q(z, \tau) e^{-p\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Метод "термического четырехполюсника" наглядно реализуется, если рассматривать только лапласовские образы температуры и тепловых потоков на передней и задней поверхностях пластины: $\Theta^F, \Theta^R, \Phi^F, \Phi^R$. Вышеуказанные четыре величины связаны между собой матричным уравнением [18]:

$$\begin{bmatrix} \Theta^F \\ \Phi^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta^R \\ \Phi^R \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Theta^R \\ \Phi^R \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} A = D &= \cosh(kL); \quad B = \frac{1}{\lambda k} \sinh(kL); \\ C &= \lambda k \sinh(kL); \quad k = \sqrt{p/a}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Коэффициенты A, B, C, D зависят от параметра преобразования Лапласа p , толщины пластины L и ТФХ материала пластины. Уравнение (3.12) справедливо для любого типа граничных условий.

Матрица M с ее четырьмя коэффициентами A, B, C, D характеризует рассматриваемую систему с внешней стороны, поскольку функции $\Theta^F, \Theta^R, \Phi^F, \Phi^R$ определены только для входа и выхода системы (графическое представление на рис. 3.1).

Удобство представления решения в виде (3.12) состоит в том, что в случае многослойной пластины нужно перемножить матрицы M_i , определенные для каждого слоя. Ниже рассмотрен нагрев импульсом Дирака трехслойной пластины, в которой центральный слой имитирует дефект, обладающий только тепловым сопротивлением R_d .

Решение в матричной форме выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Theta^F \\ \Phi^F \end{bmatrix} = M_1 M_d M_3 \begin{bmatrix} \Theta^R \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

где M_1, M_2 -- матрицы, характеризующие слои изделия (кроме дефекта).

Соответственно для матрицы M_d , описывающей "дефектный" слой,

$$A_d = D_d = 1; \quad B_d = R_d; \quad C_d = 0. \quad (3.14)$$

В области Лапласа формулы для определения температуры имеют алгебраический вид. Обычно решения нормализуют на значение температуры в конце адиабатического процесса $T_{\infty} = W / (Cp\lambda)$, после чего анализируют температурный сигнал как разность решений, полученных для дефектной и бездефектной пластин ($R_d = 0$ для бездефектной пластины):

$$\Delta\Theta^F = \frac{R^* \operatorname{sh}^2[\alpha(1-x^*)]}{\operatorname{sh}(\alpha) \{ \operatorname{sh}(\alpha) + R^* \alpha \operatorname{sh}(\alpha x^*) \operatorname{sh}[\alpha(1-x^*)] \}};$$

$$\Delta\Theta^R = \frac{R^* \operatorname{sh}(\alpha x^*) \operatorname{sh}[\alpha(1-x^*)]}{\operatorname{sh}(\alpha) \{ \operatorname{sh}(\alpha) + R^* \alpha \operatorname{sh}(\alpha x^*) \operatorname{sh}[\alpha(1-x^*)] \}};$$

(3.15)

где $\Delta\Theta$ – образ Лапласа от нормализованной температуры $\Delta T/T_\infty$; $R^* = R_d/R$; $R = L/\lambda$; $\alpha = \sqrt{p^*}$; $p^* = L^2 p/a$; $x^* = l/L$.

Решение (3.15) получено для нагрева импульсом Дирака пластины с резистивным дефектом. С помощью формулы (3.15) можно получить решения задач ТК на передней и задней поверхностях изделия, включая алгоритм определения термического сопротивления дефекта R_d и глубины его залегания l (см. п. 4.5).

Важной частью метода "термическо-го четырехполосника" является численный алгоритм перехода из области изображений Лапласа $F(p)$ в область оригиналов $f(\tau)$, в частности, алгоритм Стеффеста (Stehfest's algorithm):

$$f(\tau) \cong \frac{\ln(2)}{\tau} \sum_{i=1}^n v_i F[l \ln(2)/\tau], \quad (3.16)$$

где набор коэффициентов v_i , зависит от n (см. [18]).

3.1.3. Численные методы. Численные методы становятся все более распространенными незаменимы в случае сложной геометрии исследуемого объекта или нелинейности теплообмена на его границах. Пакеты компьютерных программ, реализующих различные модификации численных методов решения дифференциальных уравнений (метод конечных разностей, объемов, элементов и т.п.), все более популярны на мировом рынке.

Ниже рассмотрен метод конечных разностей. Исходным пунктом служит уравнение нестационарной теплопроводности в обобщенном виде, которое спра-

ведливо для декартовых, цилиндрических или сферических координат

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^N L_i T, \quad (3.17)$$

где $L_i = \partial^2 / \partial q_i^2$ – дифференциальный оператор; N – метрика задачи.

При переходе к численной постановке вторые пространственные производные и первые временные производные заменяют соответствующими конечно-разностными выражениями. Обобщенной конечно-разностной формой записи уравнения (3.17) является

$$\frac{1}{a} \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta \tau} = \Theta (\Lambda T)^{p+1} + (1 - \Theta) (\Lambda T)^p, \quad (3.18)$$

где Θ – постоянная конечно-разностной схемы; $\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i$ (Λ_i – конечно-разностный аналог L_i). Производные имеют следующий вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial q_i^2} \approx \frac{1}{(\Delta h)^2} (T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i); \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta \tau}.$$

Здесь индекс "i" обозначает узлы пространственной сетки, а индекс "p" – временные шаги;

Δh – шаг по соответствующей координате,

$\Delta \tau$ – шаг по времени.

При $\Theta = 0$ имеет место явная схема расчета, при $\Theta = 0,5$ – схема Кранка-Никольсона, при $\Theta = 1$ – полностью неявная схема. Для одномерного уравнения теплопроводности (2.15) явная схема имеет вид:

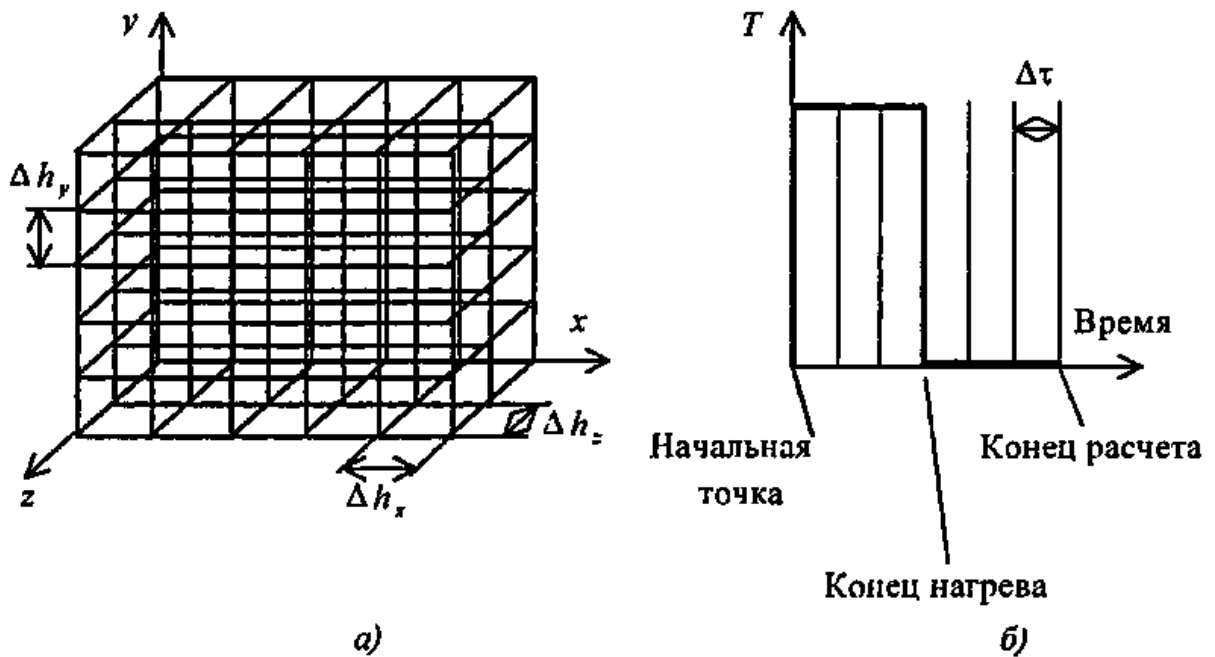


Рис. 3.2. Пространственная (а) и временная сетка (б) при численном моделировании задач ТК

$$T_i^{p+1} = \frac{a\Delta}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^p + T_{i-1}^p) + \left[1 - 2 \frac{a\Delta\tau}{(\Delta x)^2} \right] T_i^p. \quad (3.20)$$

Схема (3.20) позволяет рассчитывать температуру i -го узла T_i в момент времени $\tau + \Delta\tau$, если известны температуры соседних узлов в предыдущий момент времени τ .

Подобные численные схемы могут быть легко получены для двух- и трехмерных случаев. Иллюстрация к трехмерному пространственно-временному численному моделированию с использованием равномерных сеток приведена на рис. 3.2.

Время расчета таких задач пропорционально числу узлов пространственно-временной сетки.

Например, расчет 100 временных шагов пространственной сетки, содержащей 4 миллиона узлов, с помощью программы ThermoCalc-3D (фирма "Инновация", Россия) требует 10 мин машинного времени при использовании персонального компьютера с частотой 650 МГц и оперативной памятью 128 Мбайт.

Явная разностная схема устойчива, если

$$\frac{(\Delta x)^2}{a\Delta\tau} \geq 2 \quad (\text{одномерный случай}).$$

Условие устойчивости ограничивает выбор временного шага при фиксированных пространственных шагах. При решении многомерных задач это может привести к значительным временам счета из-за большого числа временных шагов.

Явные решения наглядны и легко программируются, однако на практике чаще используют *неявные* схемы, которые свободны от вышеупомянутого недостатка [5].

Эффективна *неявная локально-одномерная* схема, которую рассчитывают методом *переменных направлений* , согласно которому каждый временной шаг разбивают на три подшага и расчет выполняют для каждого подшага вдоль каждой из координат.

Пример локально-одномерной схемы для анализа двухмерной цилиндрической модели ТК описан в [10].

3.1. Рекомендуемые шаги пространственно-временной сетки при решении задач ТК с помощью программы ThermoCalc-2D

Толщина материала L , мм	Условия нагрева	Рекомендуемые параметры пространственно-временной сетки			
		Al	Сталь	Бетон	Углепластик
1	$\tau_h = 0,01$ с, $Q = 10^5$ Вт/м ²	100 × 200 0,001 (1,6)	50 × 300 0,01 (3)	50 × 200 0,01 (2,5)	50 × 200 0,005 (2,6)
	$\tau_h = 100$ с, $Q = 10^4$ Вт/м ²	50 × 100 0,01 (0,4)	50 × 200 0,01 (0,5)	50 × 200 0,05 (3,1)	50 × 200 0,05 (3,6)
5	$\tau_h = 0,01$ с, $Q = 10^5$ Вт/м ²	200 × 400 0,01 (0,3)	50 × 400 0,01 (2,5)	200 × 400 0,01 (5)	200 × 400 0,01 (3)
	$\tau_h = 100$ с, $Q = 10^4$ Вт/м ²	100 × 100 1 (1,6)	100 × 200 1 (3)	100 × 200 1 (3)	100 × 100 1 (0,8)
50	$\tau_h = 0,01$ с, $Q = 10^5$ Вт/м ²	100 × 800 0,01 (5)	50 × 2000 * 0,01 (10)	100 × 2000 * 0,01 (10)	100 × 2000 * 0,01 (9)
	$\tau_h = 100$ с, $Q = 10^4$ Вт/м ²	50 × 800 1 (1,5)	50 × 300 5 (2)	50 × 300 5 (2,5)	50 × 800 5 (1,5)

Примечания: 1. Глубина дефекта $l = 10\% L$; толщина дефекта $d = 10\% L$.

Свойства материалов: Al – $\lambda = 210$ Вт/(м·К), $a = 8,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с; сталь – $\lambda = 32$ Вт/(м·К), $a = 7,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

углепластик – $\lambda = 0,64$ Вт/(м·К), $a = 5,2 \cdot 10^{-7}$ м²/с; бетон – $\lambda = 1,5$ Вт/(м·К), $a = 7,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; воздух (в дефекте) – $\lambda = 0,07$ Вт/(м·К), $a = 5,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Коэффициенты теплоотдачи на обеих поверхностях $\alpha = 10$ Вт/(м·К).

2. Верхняя строка – сетка $R \times Z$; нижняя строка – шаг по времени, с; в скобках приведена погрешность, %.

3. В скобках приведена точность вычислений температуры в дефектной области по сравнению с соответствующим одномерным решением, полученным с помощью программы Multilayer-3).

* Эти модели требуют весьма малых шагов по координате z .

Как пространственная, так и временная сетки могут быть неравномерными. Пространственная сетка должна сгущаться в районе дефекта, а шаг временной сетки должен быть меньше времени резких изменений температуры, которые происходят, например, в момент включения и выключения импульса нагрева.

Однако неравномерные сетки более трудны для программирования, а их погрешности при решении задач ТК мало исследованы.

3.1.4. Точность численных решений. Точность расчетов оценивают относительно аналитических решений. Этот вопрос хорошо изучен в классической теории теплопередачи для бездефектных изделий.

Обычная рекомендация состоит в том, что точность численных методов возрастает с уменьшением шагов пространственно-временной сетки. Тем не менее, в области внутренних дефектов проверка точности численных решений становится нетривиальной из-за отсутствия соответствующих аналитических решений.

Точность двух- и трехмерных численных алгоритмов проанализирована на примере компьютерных программ *ThermoCalc-2D* и *ThermoCalc-3D*, причем для проверки численных расчетов использована программа *Multilayer-3*, реализующая решение одномерной трехслойной задачи ТК (все программы фирмы "Инновация", Россия). Программа *ThermoCalc-2D* моделирует дискообразные дефекты в трехслойном дискообразном изделии (см. п. 3.3).

При неограниченном увеличении диаметра дефекта, двухмерная цилиндрическая модель ("диск в диске") переходит в одномерную трехслойную модель, решение которой приведено в главе 2. Рекомендуемые значения шагов равномерной пространственно-временной сетки приведены в табл. 3.1 для нескольких типичных ситуаций ТК.

Величины погрешностей, составляющие в большинстве случаев от 0,5 до 5 %, приведены в табл. 3.1 для температур в дефектной области (см. данные в скобках). Бездефектные температуры вычисляются с меньшими погрешностями (менее 1 %). Наибольшие погрешности возникают в ситуациях, когда нетеплопроводное или значительной толщины тело нагревается коротким тепловым импульсом. Такие ситуации не очень характерны для практики, поскольку при этом следует применять относительно слабый, но продолжительный нагрев.

3.1.5. Коммерческие пакеты для численного решения задач ТК. Программы общего применения. Коммерческие пакеты для численного решения задач теплопередачи представляют законченные графические среды для моделирования сложных объектов, управления процессом расчета и визуализации результатов. Судя по доступной технической документации, многие из имеющихся на рынке компьютерных программ могут быть использованы в той или иной степени для решения ТК.

Пользовательские интерфейсы таких программ используют концепцию и инструменты компьютерного проектирования (*CAD-Computer-Aided Design*), с помощью которых возможно моделирование двух- и трехмерных проблем. Компоненты анализируемых геометрий можно передавать из одной программы в другую, используя стандартные *CAD* средства. Такие программы могут автоматически обмениваться данными или быть встроенными в многоцелевые средства проектирования *CAD* и моделирования *CAM* (*Computer-Aided Modeling*), которые применяют, например, в авиакосмической промышленности. Это позволяет существенно сократить время подготовки и предварительной обработки данных, поскольку разработанные модели могут впоследствии использоваться различными программами.

В коммерческих пакетах используют приемы построения оптимальных сеточных моделей, что важно при анализе сложных геометрий. Плотность пространственно-временной сетки может быть увеличена (сгущена) в тех местах или в те моменты времени, где и когда ожидаются основные теплофизические феномены, влияющие на проявление дефектов.

Например, при исследовании нагрева тела значительной толщины с приповерхностным дефектом нужно иметь частую сетку в слое над дефектом и редкую под ним, а шаг по времени должен быть малым в период проявления дефекта и относительно большим в конце теплового процесса. Это позволяет снизить нагрузку на

компьютер и уменьшить время расчета без потери точности.

Специальные виды сеточных элементов могут применяться для моделирования поверхностных неровностей; анизотропия материалов и зависимость ТФХ от времени также легко моделируются в рамках современных моделей. Расчетные схемы могут быть явными и неявными, с ручным или автоматическим изменением шага по времени.

Обзор ряда коммерческих пакетов приведен в табл. 3.2. Каждая программа имеет свои особенности, описание которых можно найти на интернетовских сайтах производителей.

3.2. Коммерческие пакеты общего применения для теплофизических расчетов*

Программа/ Теплофизический модуль	Сайт в Интернете	Характеристика**
Abaqus/Standard	www.hks.com	<p>Метод конечных элементов. Графический процессор обработки данных. Регулируемая численная сетка. Двух- и трехмерная геометрия. Нестационарные проблемы. ТФХ зависят от температуры. Анизотропные материалы. Теплообмен конвекцией и излучением. Граничные условия изменяются во времени. Слои разделены резистивной прослойкой. Работа в среде MS Windows и UNIX.</p>
Adina-Adina-T	www.world.std.com	
Algor/Multiphysics	www.algor.com	
Ansys/Multiphysics	www.ansys.com	
CosmosM/HSTAR	www.cosmosm.com	
Marc	www.marc.com	
Matlab/PDE	www.matlab.com	
MSC-Nastran	www.macsch.com	
Samsef/Thermal	www.samsef.com	
Mathematica/ Industrial Thermics	E-mail: info@visualanalysis.com	

* Ряд данных предоставлен Э. Гринцато (Италия)

**Некоторые характеристики присущи не всем программам.

3.3. Специализированные компьютерные программы фирмы "Инновация" для решения задач ТК

Программа	Характеристика
Mulilayer-3	<i>Аналитическое</i> решение задачи нагрева неадиабатической трехслойной пластины прямоугольным импульсом
ThermoCalc-2D	<i>Численное</i> решение задачи нагрева трехслойного дискообразного тела с концентрическим дефектом в виде диска (двухмерная цилиндрическая модель). Нагрев прямоугольным и синусоидальным импульсом. Тепловые волны. Адаптивный учет конвекции и излучения
ThermoCalc-3D	<i>Численное</i> решение задачи нагрева трехслойного параллелепипеда с 9-ю дефектами в форме параллелепипедов. Нагрев прямоугольным и синусоидальным импульсом. Задание произвольной функции нагрева. Все параметры модели являются произвольной функцией времени. Использование пространственной маски нагрева (искусственной и экспериментальной). Создание последовательности ИК-изображений

Описанные программы предоставляют достаточно высокие требования к мощности процессора используемого компьютера, объему оперативной памяти и объему жесткого диска. Лучшие результаты (на момент написания данного справочника) получают в среде UNIX, хотя применение стандартных персональных компьютеров (в среде Windows) также возможно. Стоимость лицензии на использование коммерческих программ относительно невысока для университетов, но может быть выше более чем на порядок для промышленности.

Специализированные программы для решения задач ТК разработаны в Управлении по авиации США NASA,

Управлении по авиации Франции ONERA, Университете Уэйна (США), Федеральном Институте по исследованиям материалов BAM (Германия), Институте холодильной техники ITEF (Италия) и ряде других организаций. На коммерческом уровне выполнены описанные в табл. 3.3 программы фирмы "Инновация" (Россия).

3.2. ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ТК

3.2.1. Температурный сигнал в одномерной модели. Использование этой модели для расчета сигналов от внутренних дефектов предполагает, что теплопередача в изделии осуществляется незави-

симо в дефектной и бездефектной областях. Эффектами поперечной диффузии тепла при этом пренебрегают, вследствие чего пространственный профиль ΔT в любой момент времени имеет вид прямоугольной ступеньки (рис. 3.3).

В одномерной модели температурный сигнал над дефектом зависит только от времени и пространственной координаты z , направленной вглубь изделия

$$\Delta T(z, \tau) = T_d(z, \tau) - T_{nd}(z, \tau). \quad (3.21)$$

В рамках одномерной модели температурный сигнал ΔT рассчитывают в виде разности двух решений, полученных соответственно для дефектной и бездефектной зон. Такой подход позволяет оценить зависимость дифференциального температурного сигнала от глубины залегания и толщины дефекта, а также от ТФХ изделия и дефекта.

Границы применимости одномерных моделей, в которых влияние диффузии тепла на величину ΔT остается незначительным, рассмотрены ниже. На практике "поперечные" (трехмерные) тепловые потоки на краях дефекта сглаживают форму сигнала ΔT и при определенных размерах дефекта приводят к существенному снижению его амплитуды (см. штрихпунктирную линию на рис. 3.3).

3.2.2. Одномерная модель ТК с абсолютно нетеплопроводным дефектом. Классическое решение для нагрева неадиабатической пластины. Простейшая одномерная модель дефекта при одностороннем ТК изображена на рис. 3.4, будучи дальнейшим упрощением модели на рис. 3.3. Дефект является абсолютным теплоизолятором, на его границе выполняется условие: $\partial T / \partial z = 0$. В дефектной

зоне участвует только слой материала толщиной l (глубина залегания дефекта). Достоверность такой модели возрастает с ростом толщины дефекта и уменьшением его теплопроводности по сравнению с основным материалом. Такая модель лучше описывает задачу определения толщины пластины (контроль коррозии задней поверхности), описанную в п. 2.7.3, нежели задачу обнаружения скрытого дефекта. Модель на рис. 3.4, в отличие от общей модели на рис. 3.3, малоприспособна для анализа двусторонней процедуры ТК, в которой температурный сигнал ΔT принимают равным температуре бездефектной поверхности T_{nd} , поскольку под дефектом избыточная температура считается равной нулю. Ниже рассмотрена процедура только одностороннего ТК.

Пусть пластина, изображенная на рис. 3.4, нагревается тепловым потоком в виде прямоугольного импульса длительностью τ_h . Постановка задачи для бездефектной области неадиабатической пластины имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (3.22)$$

$$T(z, \tau = 0) = 0; \quad (3.23)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = Q - \alpha^F T(z=0); \quad (3.24)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = \alpha^R T(z=L), \quad (3.25)$$

где (3.22) – одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности, (3.23) – начальное условие, (3.24) и (3.25) – граничные условия на поверхностях пластины.

Согласно данной модели перед началом нагрева пластина имеет температуру окружающей среды, решение будет получено для избыточной температуры.

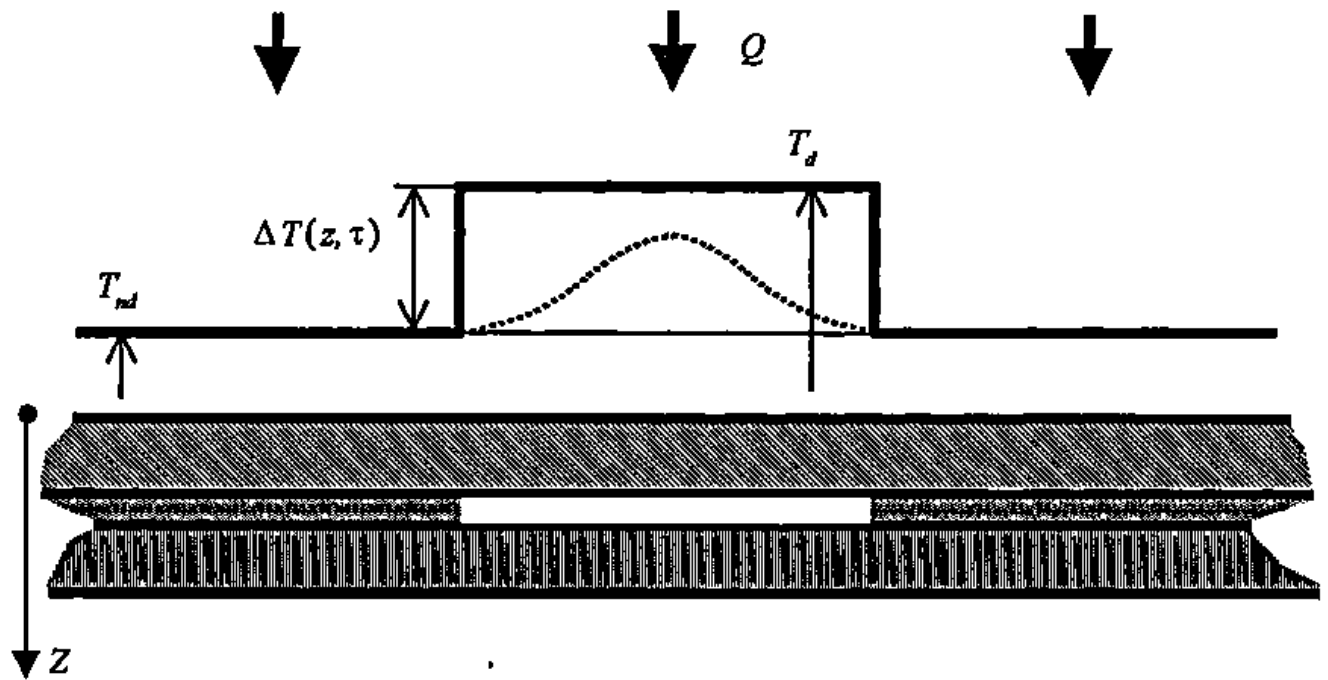


Рис. 3.3. Обобщенная одномерная модель ТК

В дефектной области $\partial T(z=l)/\partial z = 0$, для получения однородного решения следует принять адиабатические граничные условия на задней поверхности, т.е. $\alpha^R = 0$, тогда модель нагрева становится однородной в дефектной и бездефектной областях соответственно с параметром толщины пластины l или L .

Модель (3.22–3.25) описывает также нагрев (или охлаждение) пластины в среде с температурой T_{amb} . Условие (3.24) для нагрева в среде можно записать в виде формулы

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = \alpha^F [T_{amb} - T(z=0)], \quad (3.26)$$

которая идентична условию (3.24), если принять $Q = \alpha^F T_{amb}$ (при этом температуру также отсчитывают от начальной температуры пластины). В случае охлаждения пластины следует изменить знак выражения в правой части (3.26).

В классической теории теплопроводности рассматривают задачу нагрева обе-

их поверхностей пластины толщиной $2L$ в среде с температурой T_{amb} , причем в силу симметрии в центре пластины производная от температуры по координате равна нулю [5]. Такая задача идентична модели (3.22–3.25). Для передней поверхности ее решение имеет вид (см. табл. 2.4):

$$\frac{T^F}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (3.27)$$

где $Q' = Q/\alpha$ и μ_n – положительные корни характеристического уравнения: $\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = Bi$. Некоторые значения μ_n приведены в табл. 3.4.

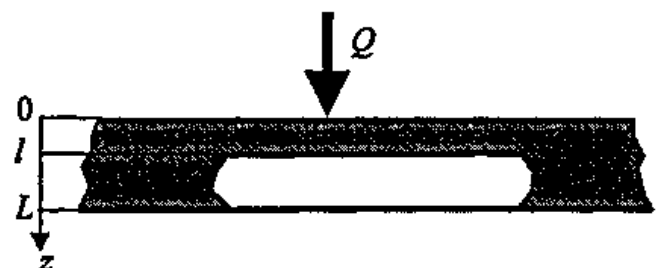


Рис. 3.4. Одномерная модель абсолютно нетеплопроводного дефекта при одностороннем ТК

3.4. Корни характеристического уравнения: $\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = \operatorname{Bi}$ [5]

Bi	μ_1	μ_2	μ_3
0	0,0000	3,1416	6,2832
0,001	0,0316	3,1419	6,2833
0,01	0,0998	3,1448	6,2848
0,1	0,3111	3,1731	6,2991
0,2	0,4328	3,2039	6,3148
0,3	0,5218	3,2341	6,3305
0,4	0,5932	3,2636	6,3461
0,5	0,6533	3,2923	6,3616

При $\tau \rightarrow \infty$ $T^F \rightarrow Q/\alpha^F$. При нагреве в среде с температурой $T_{amb} \rightarrow Q/\alpha^F$ температура поверхности пластины стремится к T_{amb} (при адиабатической задней поверхности).

С уменьшением времени процесса число необходимых корней и членов ряда возрастает. Для изделий, удовлетворяющих условию $\operatorname{Bi} \leq 0,1$, рекомендовано оставлять [5] только первый член ряда $\mu_1 = \sqrt{\operatorname{Bi}}$. Тогда в бездефектной области решение имеет вид:

$$\begin{aligned} T_{nd}^F(\tau) &= \frac{Q}{\alpha} (1 - \cos \sqrt{\operatorname{Bi}} e^{-\operatorname{Bi} Fo}) = \\ &= \frac{Q}{\alpha} (1 - \cos \sqrt{\operatorname{Bi}} e^{-\frac{\alpha a}{\lambda L} \tau}). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Оценка температурного сигнала от дефекта при импульсном ТК адиабатической пластины. Решение (3.28) показывает, что при малых временах (порядка 0,01 ... 0,1 с) один член ряда не обеспечивает требуемой точности, а расчет со многими членами ряда сопряжен с определенными вычислительными трудностями. Для часто встречающегося в ТК случая $\operatorname{Bi} \leq 0,1$ целесообразно использовать адиабатическое решение для нагрева прямо-

угольным импульсом (см. табл. 2.4):

$$\begin{aligned} T_{nd}^F &= \frac{QL}{\lambda} \left\{ Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} \times \right. \\ &\quad \left. \times (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1) \right\}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

которое при $\tau \gg \tau_h$ совпадает с решением для адиабатического нагрева импульсом Дирака (см. табл. 2.4):

$$T_{nd}^F = \frac{Wa}{\lambda L} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} \right). \quad (3.30)$$

Решение (3.30) будет использовано ниже для того, чтобы проиллюстрировать ограниченность простейшей одномерной модели (рис. 3.4).

В дефектной области толщину пластины L следует заменить глубиной залегания дефекта l :

$$T_d^F = \frac{Wa}{\lambda L} \frac{L}{l} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo l^2 / l^2} \right). \quad (3.31)$$

Следует заметить, что энергетически импульс Дирака и прямоугольный импульс связаны соотношением $W = Q \tau_h$. Некоторые особенности решений (3.30, 3.31) при определении толщины пластины

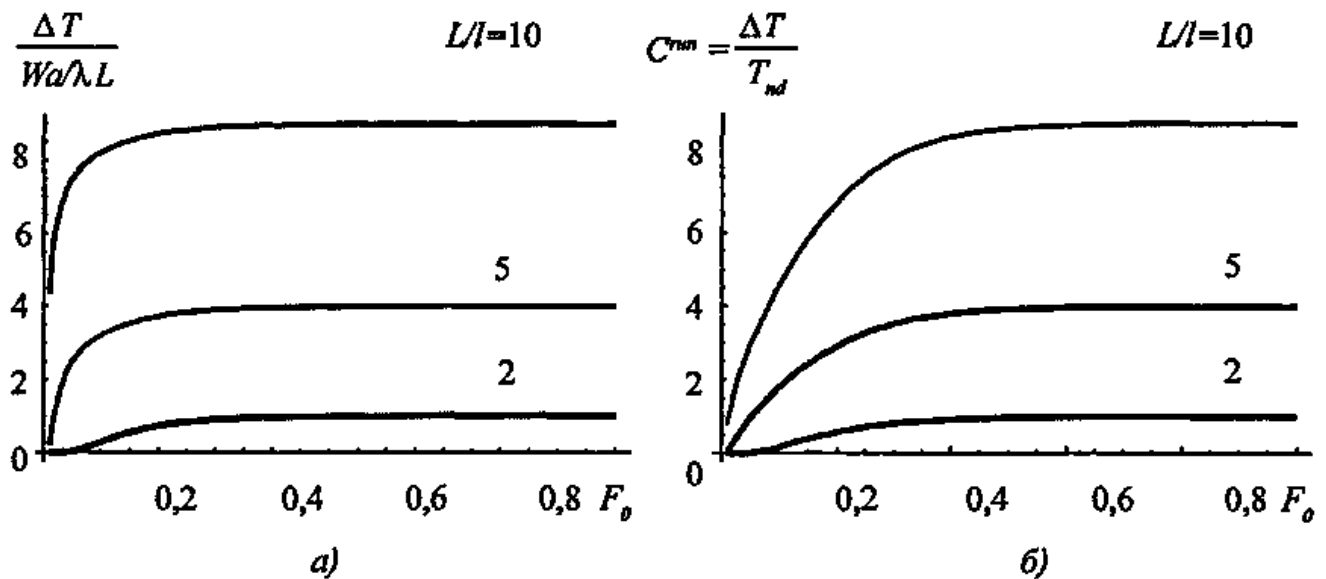


Рис. 3.5. Изменение температурного сигнала (а) и текущего контраста (б) над дефектом в одномерной адиабатической модели ТК согласно формулам (3.30) и (3.31)

(оценке коррозионного износа) рассмотрены в п. 2.7.3.

На рис. 3.5 показано развитие температурного сигнала $\frac{\Delta T}{Wa/\lambda L}$ и текущего

контраста $C^{run} = (T_d^F - T_{nd}^F) / T_{nd}^F$ во времени для дефекта на глубине l . При $\tau(F_0) \rightarrow \infty$ оба параметра стремятся к величине $L/l - 1$.

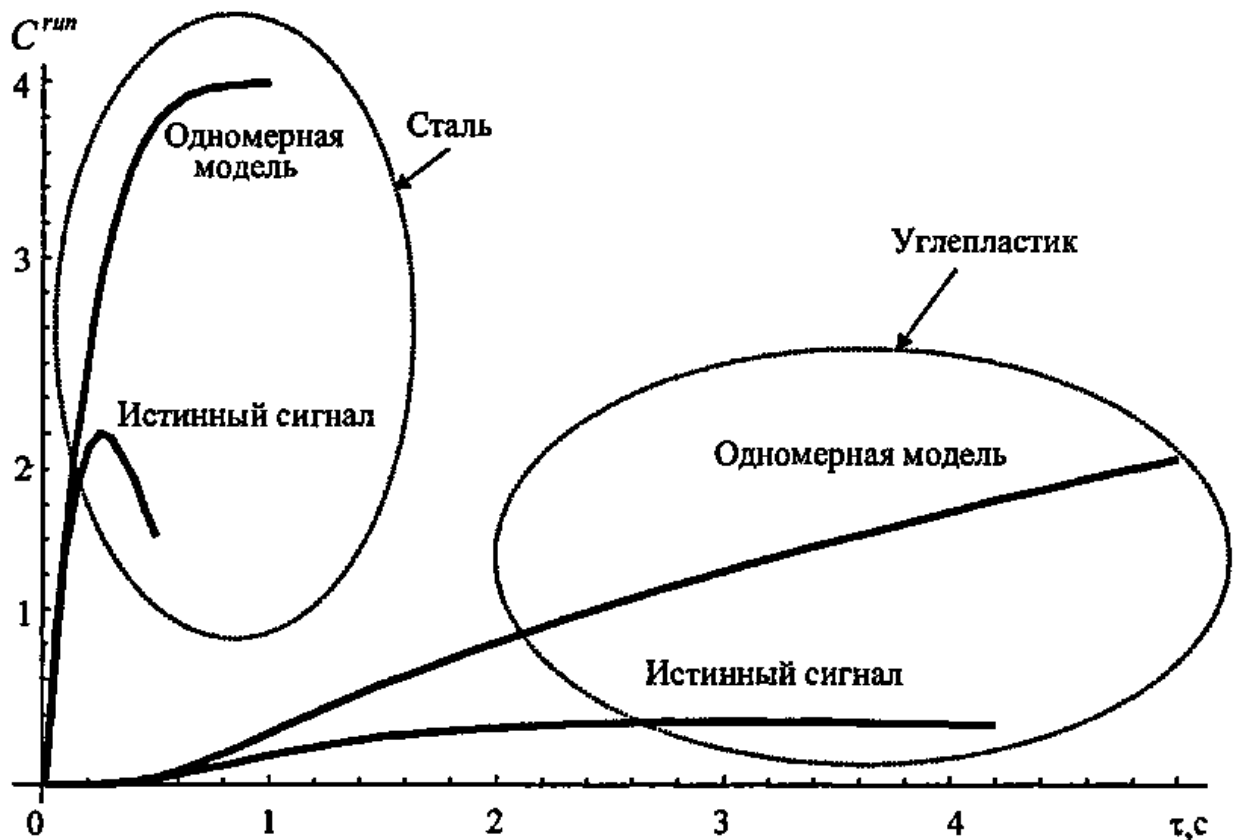


Рис. 3.6. Проверка одномерной адиабатической модели для воздушного дефекта радиусом 5 мм и толщиной 0,2 мм, расположенного в углепластике и стали AISI 1010 на глубине 1 мм

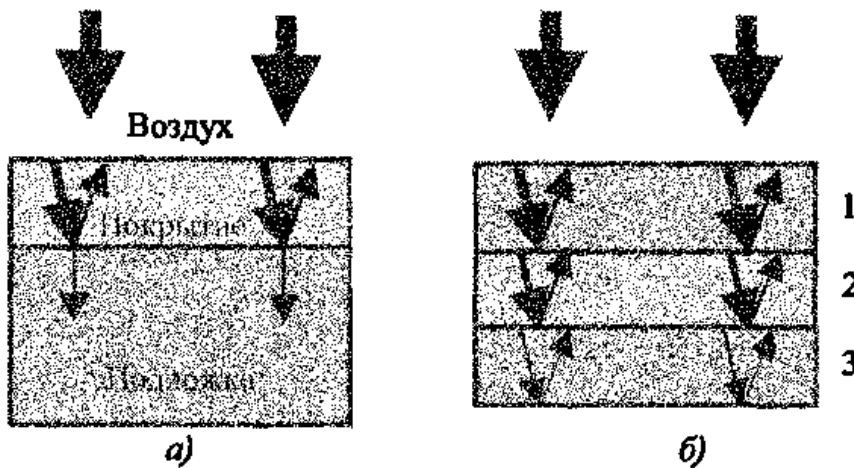


Рис. 3.7. Интерференция тепловых волн в покрытии (а) и дефекте (б)

Для иллюстрации того, насколько данная модель отражает реальные ситуации ТК, на рис. 3.6 показано изменение текущего контраста C^{sup} во времени над дискообразным воздушным дефектом радиусом $r_d = 5$ мм и толщиной $d = 0,2$ мм, который расположен на глубине 1 мм в пластине толщиной 5 мм, выполненной из различных материалов. Нагрев производится импульсом длительностью $t_n = 0,01$ с. Истинные значения контраста рассчитаны с помощью программы ThermoCalc-2D.

Согласно одномерной модели максимальный контраст для случая на рис. 3.6 должен быть равен $C_m^{sup} = L/l - 1 = 4$. Наиболее близкое значение контраста создается воздушным дефектом в стали. Для углепластика оценка C^{sup} становится нереалистичной. Достоверность простейшей одномерной модели возрастает с увеличением толщины дефекта или теплопроводности основного материала. Следует отметить, что данная модель требует продолжительного наблюдения, поэтому ее практическое значение невелико.

3.2.3. Гармонические тепловые волны. Интерференция в адиабатическом тонком слое и дефекте. В обобщающей работе Д. Альмонда и П. Пателя [24] проанализировано поведение тепловых волн в тонких слоях (дефектах), где наличие интерференции между падающими и отраженными волнами существенно изменяет амплитуду $\Delta T(\tau)$ по сравнению

со случаем отражения от границы полубесконечной среды (рис. 3.7).

Пусть покрытие толщиной L_c расположено на подложке, которую рассматривают как полугограниченное тело, т.е. толщина подложки значительно больше длины тепловой диффузии (рис. 3.7, а). В первом приближении можно считать, что вся энергия нагрева выделяется на поверхности подложки, хотя в общем случае нагрева оптическим излучением следует учитывать объемное поглощение энергии в покрытии, затухающее с ростом глубины.

Температура на поверхности покрытия определяется суммой падающих и отраженных тепловых волн, которые распространяются в покрытии, отражаясь от границ покрытие-подложка и покрытие-воздух (рис. 3.7, а). В теории тепловых волн выражение для поверхностной температуры записывают в виде:

$$T(z=0) = AT_{c-a} \left[\frac{1 + R_{c-s} e^{-2\sigma_c L_c}}{1 - R_{c-s} R_{c-a} e^{-2\sigma_c L_c}} \right], \quad (3.32)$$

где A — амплитуда тепловой волны; T_{c-a} — коэффициент пропускания границы покрытие-воздух; R_{c-s} и R_{c-a} — коэффициенты отражения границы соответственно покрытие-подложка и покрытие-воздух; индекс c относится к покрытию. На границе покрытие-воздух коэффициент отражения $R_{c-a} \approx 1$ и коэффициент пропус-

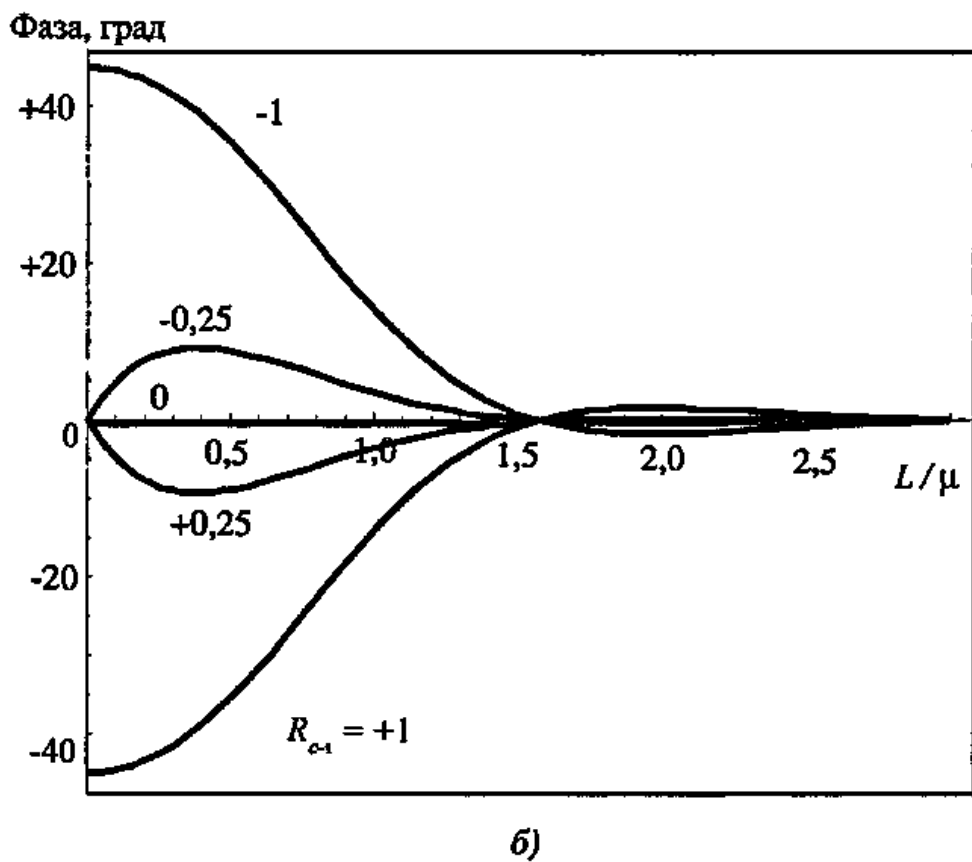
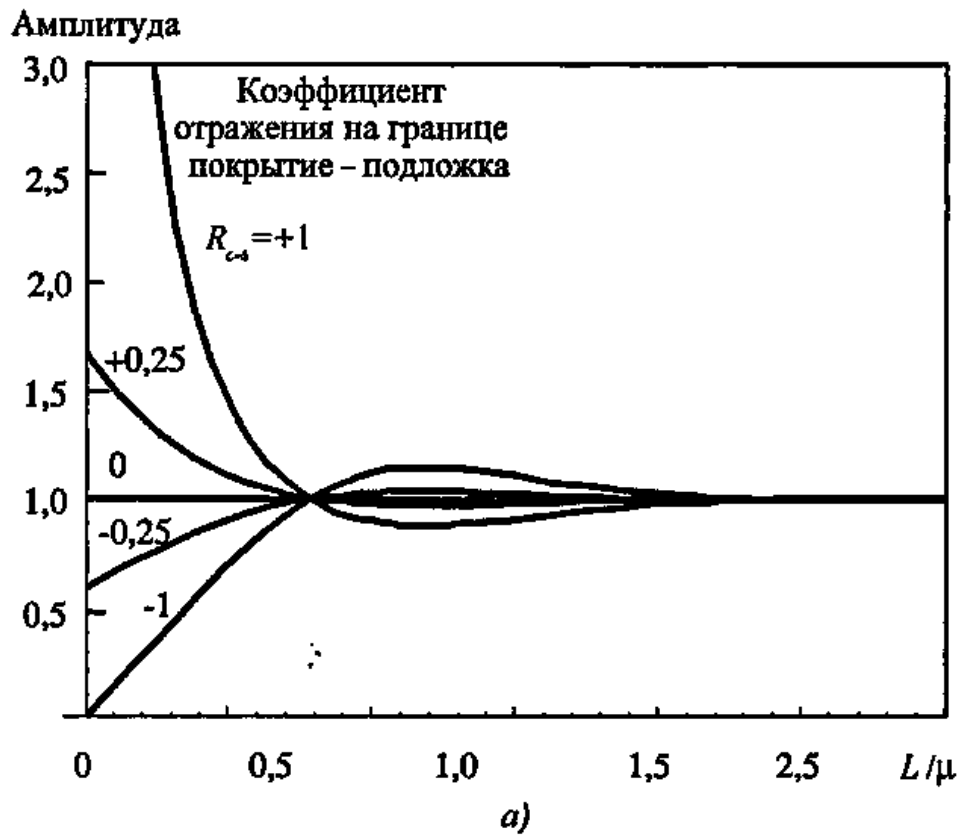


Рис. 3.8. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловых волн на поверхности покрытия для различных значений коэффициента отражения на границе покрытие-подложка (подложка - полуограниченное тело; $R_{c-a} = 1$; $T_{c-a} = 2$; $L = L_c$)

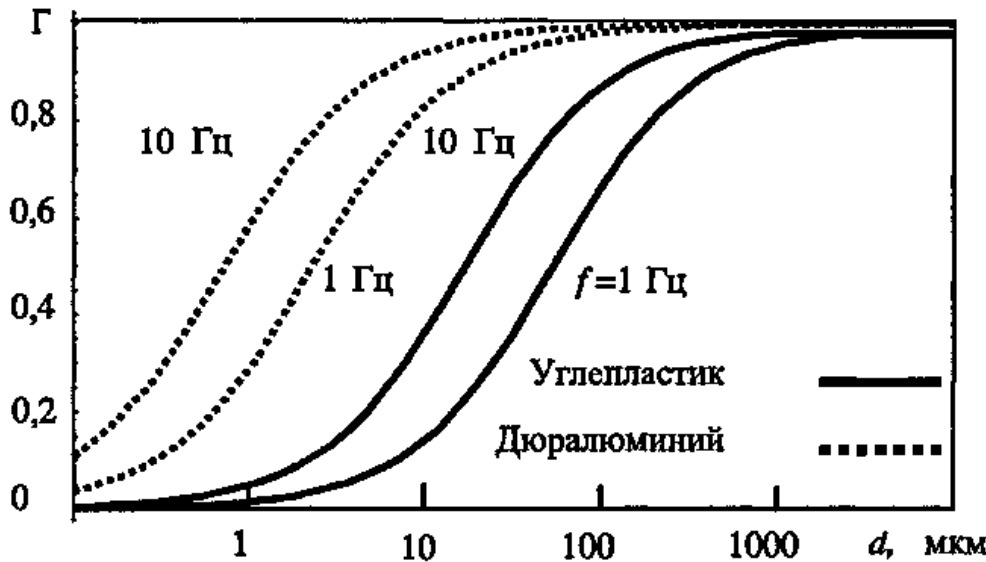


Рис. 3.9. Коэффициент отражения тепловых волн различной частоты от тонких воздушных в дюралюминии и углепластике (см. ТФХ материалов в табл. 2.2)

кания $T_{c-a} \approx 2$, поскольку $b \sim 0$ из-за низкой тепловой инерции воздуха. Для этого практически важного случая на рис. 3.8 изображены нормализованная амплитуда (модуль) и фаза поверхностной температурной волны $T_{norm}(z=0)$, построенные согласно следующим формулам:

$$T_{norm}(z=0) = \frac{1 + R_{c-s} e^{-2\sigma_c L_c}}{1 - R_{c-s} R_{c-a} e^{-2\sigma_c L_c}};$$

амплитуда (модуль) =

$$= \sqrt{[\text{Re}\{T_{norm}\}]^2 + [\text{Im}\{T_{norm}\}]^2}; \quad (3.33)$$

фаза = $\text{arctg} \frac{\text{Im}\{T_{norm}\}}{\text{Re}\{T_{norm}\}}$,

где Re and Im обозначают соответственно действительную и мнимую части комплексного числа.

Графики (рис. 3.8) показывают, что интерференция тепловых волн существенна при толщине покрытия менее одной длины диффузии. Особыми точками являются точки пересечения кривых с нулевой осью: для амплитуд при $L_c/\mu = 0,785$, а для фаз при $L_c/\mu = 1,571$. Этот факт может служить аргументом в пользу более глубокого проникновения фазы волны по сравнению с ее амплитудой, что делает фазовый анализ более предпочтительным.

Данный феномен будет рассмотрен ниже.

Формула (3.32) дает возможность определения ТФХ или толщины покрытия по результатам измерения поверхностной температуры. В силу комплексного характера σ_c температура также является комплексной функцией; температура в любой точке тела не совпадает по фазе с волной нагрева.

Внутри дефекта, например, трещины или расслоения, происходит интерференция тепловых волн, поэтому коэффициент отражения тепловой волны от дефекта становится зависимым от частоты.

Эффективный коэффициент отражения тонкого инородного включения (рис. 3.7, б)

$$\Gamma = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2 e^{-2\sigma_2 L_2}}{1 + \Gamma_1 + \Gamma_2 e^{-2\sigma_2 L_2}}, \quad (3.34)$$

где

$$\Gamma_1 = \frac{1 - b_{21}}{1 + b_{21}}; \Gamma_2 = \frac{1 - b_{32}}{1 + b_{32}}; b_{i+1/i} = \frac{\lambda_{i+1} \sigma_{i+1}}{\lambda_i \sigma_i}.$$

Здесь индексы 1, 2, 3 относятся к слоям изделия (см. рис. 3.7, б); Γ_1 и Γ_2 – коэффициенты отражения тепловой волны для границ слоев 1–2 и 2–3; L_2 – толщина 2-го слоя. Коэффициент Γ зависит от вида материалов, частоты и толщины дефекта.

На рис. 3.9 изображены зависимости коэффициента отражения тепловых волн от воздушных дефектов в дюралюминии и углепластике на двух частотах: 1 и 10 Гц, рассчитанные согласно (3.34). Величина Γ увеличивается с ростом частоты, теплопроводности материала и толщины дефекта. Следует отметить наличие насыщения, означающее, что толщина дефекта, начиная с некоторого значения, перестает влиять на коэффициент отражения. Аналогичный вывод справедлив для зависимости сигнала ΔT от толщины дефекта в процедурах импульсного ТК (см. п. 3.8.3).

Формула (3.34) справедлива для емкостных дефектов, образованных слоями с выраженными границами. Коэффициент отражения тепловой волны от резистивного дефекта

$$\Gamma = \frac{1 - b_{21} + R_d \lambda_2 \sigma_2}{1 + b_{21} + R_d \lambda_2 \sigma_2}, \quad (3.35)$$

где в отличие от (3.34) оба индекса 1 и 2 относятся соответственно к слоям основного материала, разделенным слоем с тепловым сопротивлением R_d .

Сравнение (3.34) и (3.35) для дефектов в дюралюминии и углепластике показало практически идеальное совпадение значений коэффициентов отражения (данные рис. 3.9). Таким образом, тонкие газообразные дефекты в твердых материалах могут моделироваться контактным сопротивлением R_d , что упрощает соответствующие аналитические расчеты.

Неадиабатическая пластина переменной толщины и простейшая оценка сигнала от дефектов. Решения для нагрева пластины гармоническим тепловым потоком с неадиабатическими граничными условиями приведены в табл. 2.5. С учетом равенства $\sqrt{\pm j} = \pm \sqrt{0,5}(1 \pm j)$ для передней поверхности пластины это решение можно записать в следующем явном виде:

$$A = \left(\frac{B}{B + \frac{2}{Bi} \sqrt{\frac{Pd}{2}} S + \frac{Pd}{Bi^2} V} \right)^{1/2};$$

$$\Psi = \frac{W}{S + B / \left(\frac{1}{Bi} \sqrt{\frac{Pd}{2}} \right)}; \quad (3.36)$$

где $B = ch^2(u) \cos^2(u) + sh^2(u) \sin^2(u)$;

$$S = ch(u) sh(u) - \cos(u) \sin(u);$$

$$V = sh^2(u) \cos^2(u) + ch^2(u) \sin^2(u);$$

$$W = ch(u) sh(u) + \cos(u) \sin(u);$$

$$u = \sqrt{\frac{Pd}{2}}.$$

При $L \rightarrow \infty$ решение (3.36) переходит в решение для полуограниченного тела. Следует заметить, что в решениях табл. 2.5 отсутствуют постоянная составляющая нагрева, а также затухающий со временем член, связанный с влиянием начальных условий, которые имеют место в момент включения гармонического источника.

Графики на рис. 3.10 иллюстрируют, как отдельные тепловые волны взаимодействуют с пластинами из углепластика различной толщины. Низкочастотные волны проникают глубже в объект контроля и создают более высокую поверхностную температуру. В таком аспекте нельзя говорить об оптимальной частоте нагрева, по крайней мере, в бездефектной области. Фактически максимальная температура нагрева обеспечивается волной нулевой частоты, т.е. непрерывный постоянный нагрев должен быть оптимальным.

Оба графика на рис. 3.10 обнаруживают резкие изменения температуры и фазы в области определенных толщин (в предыдущем параграфе это трактовалось как результат интерференции в слое материала). Представляют интерес особые точки, соответствующие минимумам функций $A(L)$ и $\Psi(L)$, что предположительно связано с интерференцией тепловых волн.

Согласно рис. 3.8 можно принять, что фаза тепловой волны распространяется до глубин приблизительно вдвое больших, чем ее амплитуда. Ниже этот фено-

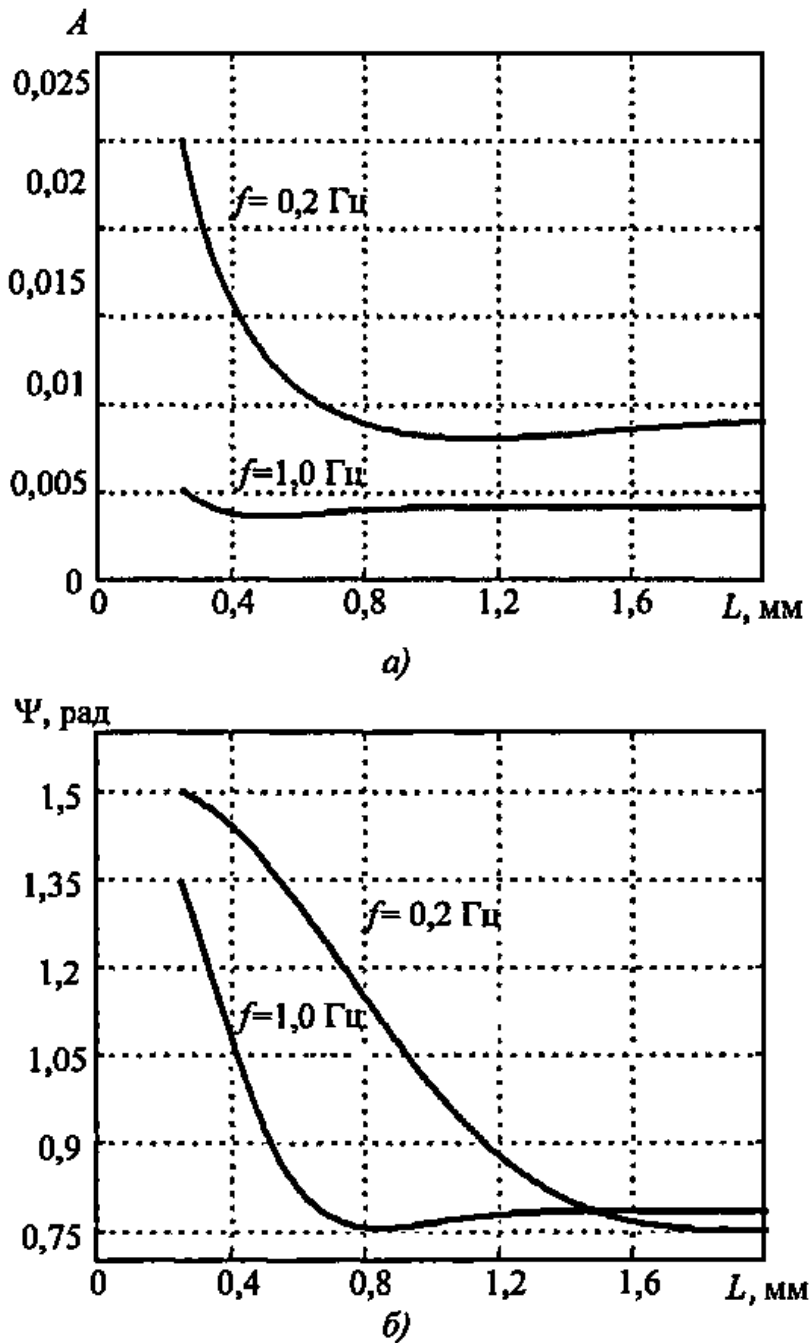


Рис. 3.10. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловой волны в зависимости от толщины пластины из углепластика

мен рассмотрен на примере углепластика с учетом данных рис. 3.10. Максимальную глубину проникновения фазы L_{\max}^{Phase} и амплитуды L_{\max}^{Ampl} предложено оценивать по минимумам функций $A(L)$ и $\Psi(L)$, которые до определенной степени соответствуют переходу к условиям полуограниченного тела. Из рис. 3.10 следует, что $L_{\max}^{Phase} / L_{\max}^{Ampl} \approx 1,5$ для $f = 0,2 \text{ Гц}$ и

$L_{\max}^{Phase} / L_{\max}^{Ampl} \approx 1,7$ для $f = 1 \text{ Гц}$. В обобщенном виде сравнение глубин проникновения амплитуды и фазы тепловых волн будет приведено в п. 5.4 с использованием Фурье-анализа.

Если принять модель идеально отражающего (полностью теплоизолированного) одномерного дефекта (п. 3.2.2, модель рис. 3.4), то одно и то же решение (3.36) можно использовать для расчета нагрева

3.5. Сравнение одномерной и трехмерной моделей тепловых волн при обнаружении дискообразного дефекта диаметром 20 см и толщиной 10 см в почве на глубине 5 см

Модель ТК	Параметры поверхностной температурной волны	
	Амплитуда	Фаза, рад
Одномерная модель		
Бездефектная зона	0,256	0,603
Дефектная зона	0,449	0,988
Трехмерная модель		
Бездефектная зона	0,254	0,590*
Дефектная зона (дефект – воздух)	0,349	0,654*
Дефектная зона (дефект – тринитротолуол)	0,322	0,654*

* С точностью до шага расчета, равного 0,065 рад (900 с).

Примечание. (см. ТФХ материалов в табл. 2.2; нагрев типа $Q(\tau) = Q_m \cos(\frac{2\pi}{T}\tau)$; $\tau = 24$ ч; $Q_m = 500$ Вт/м²; $\alpha^F = 10$ Вт/(м² К).

бездефектной и дефектной зон, принимая, что в зоне дефекта $L = l$.

Пусть почва, в которой на глубине 5 см находится дискообразный дефект диаметром 20 см и толщиной 10 см, нагревается солнечным излучением, изменя-

ющимся по гармоническому закону (обнаружение заглубленных мин). В табл. 3.5 приведены амплитуда и фаза поверхностных температурных волн над дефектом и вдали от него, рассчитанные по формулам (3.36). Для сравнения даны результаты

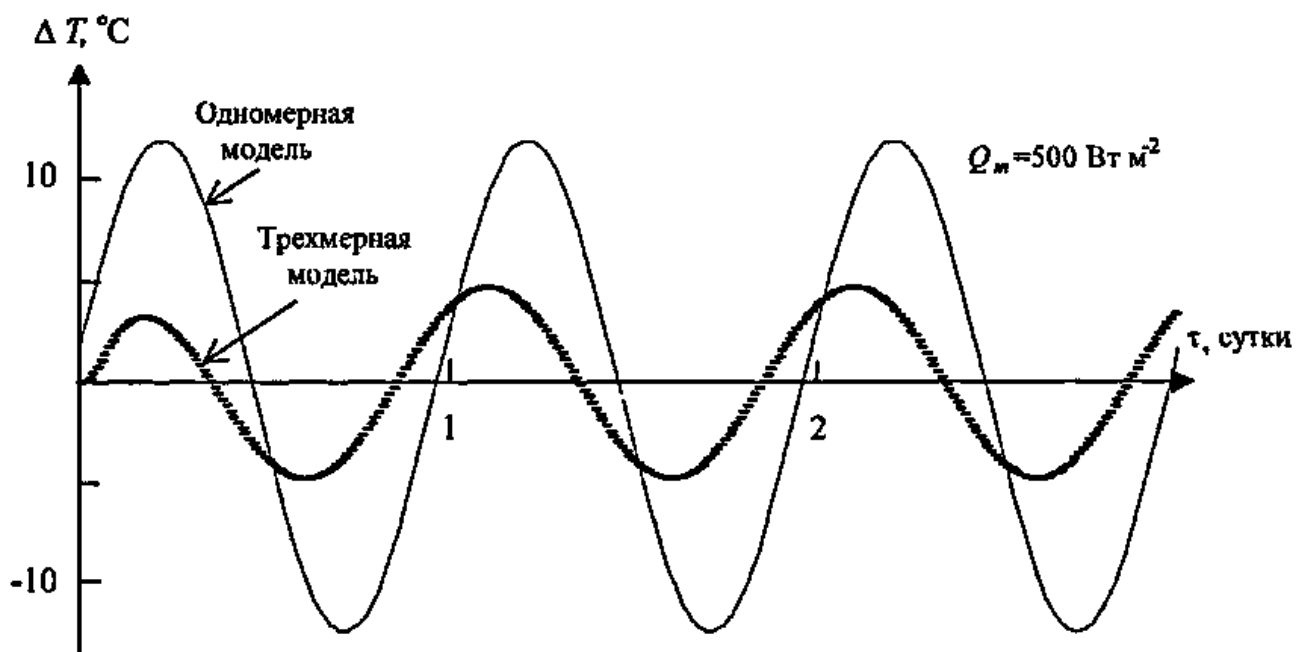


Рис. 3.11. Сравнение одномерной и трехмерной моделей тепловых волн при обнаружении воздушной полости в почве на глубине 5 см

расчета в реальной геометрии. В одномерной модели наличие дефекта существенно изменяет амплитуду и фазу температурной волны, в то время как над реальными дефектами сдвиг фаз незначителен.

На рис. 3.11 приведены три периода температурного сигнала $\Delta T(\tau)$ для обеих моделей (влияние начальных условий в трехмерной модели исчезает уже в течение 1-го периода). Замена воздуха в дефекте на тринитротолуол снижает максимальный температурный сигнал с $\Delta T_m = 4,5^\circ\text{C}$ до $\Delta T_m = 3,8^\circ\text{C}$. В реальных почвах с меньшей теплопроводностью величина сигнала может быть еще ниже.

3.2.4. Импульсные тепловые волны. Адиабатическое покрытие на подложке. Пусть покрытие толщиной L нанесено на подложку, которую можно рассматривать как полубесконечное тело. При адиабатических граничных условиях температура на поверхности покрытия описывается следующими соотношениями [26]:

при нагреве импульсом Дирака с энергией W :

$$T^F(\tau) = \frac{W}{e_c \sqrt{\pi\tau}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n e^{-\tau^2/\tau} \right]; \quad (3.37)$$

при нагреве прямоугольным импульсом мощностью Q :

$$T^F(\tau) = \frac{2Q}{e_c \sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau - \tau_h} + 2\sqrt{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n F(\tau) - 2\sqrt{\tau - \tau_h} \times \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n F(\tau - \tau_h) \right]; \quad (3.38)$$

$$F(\tau) = e^{-\tau^2/\tau} - \sqrt{\frac{\pi\tau^*}{\tau}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}} \right);$$

при нагреве импульсом в виде прямоугольной ступеньки мощностью Q :

$$T^F(\tau) = \frac{2Q}{e_c} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n \left\{ e^{-\tau^2/\tau} - \sqrt{\frac{\pi\tau^*}{\tau}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}} \right) \right\} \right], \quad (3.39)$$

где $\tau^* = n^2 L^2 / \alpha_c$ – характерное время теплопередачи (heat transit time), причем индекс "с" определяет покрытие; e_c – тепловая инерция покрытия; коэффициент отражения $\Gamma = (e_s - e_c) / (e_s + e_c)$ определен для границы раздела покрытия с и подложки s и в отличие от (3.35) является действительной величиной.

На границе раздела двух сред импульсные тепловые волны отражаются подобно гармоническим тепловым волнам или оптическим волнам. Параметр Γ является индикатором характера теплового контакта между двумя материалами. Нулевое значение Γ соответствует идеальному контакту двух идентичных материалов, случай $\Gamma > 0$ соответствует более теплопроводной подложке, $\Gamma < 0$ обозначает подложку, менее теплопроводную, чем покрытие. Графическая интерпретация этих случаев показана на рис. 3.12 для нагрева в виде прямоугольной ступеньки.

В начальный период двухслойная структура ведет себя как полуограниченное тело, выполненное из материала покрытия, и соответствующая зависимость температуры T от $\sqrt{\tau}$ имеет вид прямой линии. В течение этого периода граница раздела двух сред не проявляется на нагреваемой поверхности. В момент времени, называемый характерным временем теплопередачи, температура поверхности начинает отклоняться от той, которая бы имела место при отсутствии границы раздела двух сред; при этом знак отклонения истинной температуры от ожидаемой зависит от знака параметра Γ .

Описанный подход использован в методе ТК, названном *ИК-радиометрией с временным разрешением* (time-resolved IR

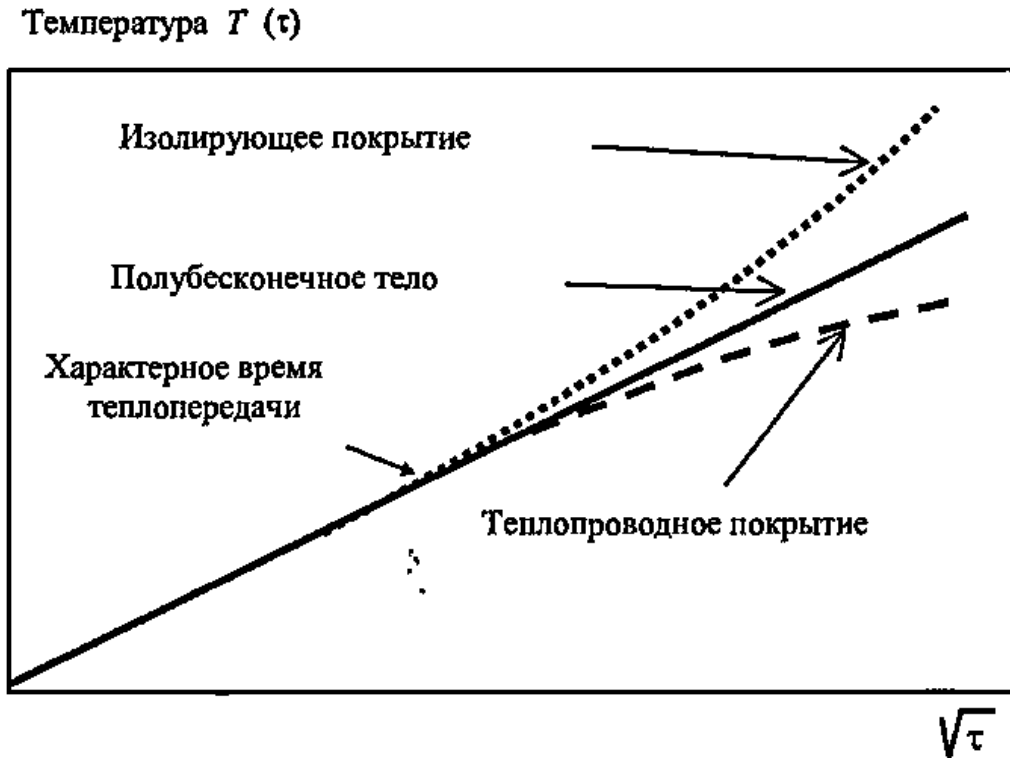


Рис. 3.12. Влияние ТФЧ подложки на поведение поверхностной температуры (нагрев полубесконечного тела равномерным тепловым потоком в виде ступенчатой функции)

radiometry, TRIR) [26]. Нагрев изделия производят равномерно-распределенным лазерным излучением; его спектральный диапазон находится вне диапазона чувствительности применяемой ИК-системы, что позволяет отслеживать температуру передней поверхности на стадии нагрева без влияния отраженного излучения.

Трехслойная неадиабатическая пластина с емкостным дефектом. Одномерная модель изделия с емкостным дефектом дана в п. 2.7.6 в виде трехслойной пластины, каждый ее слой описывается набором $\{C, \rho, \lambda\}$. Дифференциальный температурный сигнал в соответствующей модели ТК определяется формулой (3.21). Аналитическое решение этой задачи является громоздким и требует привлечения компьютерной техники (программа Multilayer-3). Основное достоинство решений такого вида состоит в возможности аналитической проверки точности расчетов дефектов, вытянутых в направлении, параллельном нагреваемой поверхности.

Двухслойная адиабатическая пластина с резистивным дефектом и изме-

рение "кажущейся" тепловой инерции. Простое решение имеем в случае, когда две адиабатические пластины разделены прослойкой с тепловым сопротивлением $R_d = d/\lambda_d$. Соответствующие формулы, полученные группой Д. Балажа с сотрудниками из Управления по авиации Франции [6, 21], приведены в п. 2.7.6.

Решение в случае нагрева импульсом Дирака оказалось эффективным для прямых и обратных задач импульсного ТК, в частности, с использованием так называемого метода "кажущейся", т.е. наблюдаемой в эксперименте, тепловой инерции объекта контроля (apparent effusivity method) [6]. Этот метод для определения параметров скрытых дефектов (тепловой дефектометрии) см. п. 4.1. Метод можно проиллюстрировать на примере ТК изделия, состоящего из Ni-Cr покрытия толщиной 100 мкм и стальной подложки толщиной 3 мм. Коэффициенты теплопроводности: покрытия $\lambda = 14$ Вт/(мК), подложки $\lambda = 70$ Вт/(мК). Плотность и теплоемкость одинаковы для обоих материалов: $\rho = 7800$ кг/м³; $C = 500$ Дж/(кгК).

Идея метода состоит в том, что тепловую инерцию полуограниченного тела, подвергнутого импульсному тепловому воздействию, в любой момент времени можно определить по формуле (2.35): $e = W / [T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*}]$. Определение абсолютного значения e требует измерения поглощенной образцом энергии. Авторы предложили применять этот метод для пластины в течение времени $Fo < 0,1$, когда поведение пластины аналогично поведению полуограниченного тела. Температура передней поверхности адиабатической пластины в конце нагрева $T_{\infty} = W / (C\rho L)$, поэтому тепловую инерцию предложено определять по формуле

$$e = C\rho L / [T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*}], \quad (3.40)$$

где C, ρ, L считаем известными.

Поскольку в эксперименте нагрев производили импульсом длительностью 40 мкс, возможно применить формулы для нагрева импульсом Дирака и по формуле (3.40) рассчитать изменение кажущейся тепловой инерции во времени для трех случаев:

1) стальной подложки без покрытия;
2) покрытия Ni-Cr на стальной подложке при идеальном контакте между ними;

3) наличии воздушного расслоения толщиной 1 мкм между покрытием и подложкой ($R = 0,43$). Для стальной подложки без покрытия (рис. 3.13, кривая 1) значение $e / e_s = 1$ в течение 100 мс, после чего начинает сказываться конечная толщина изделия. При идеальном контакте подложки и покрытия в течение 1 мс (кривая 2) величина тепловой инерции изделия определяется только покрытием: $e / e_s = e_c / e_s = \sqrt{\lambda_c / \lambda_s} = 0,45$. С 10 мс и вплоть до 100 мс происходит сближение кривых 1 и 2, после чего структура покрытие-подложка начинает вести себя как стальная подложка без покрытия. Наличие де-

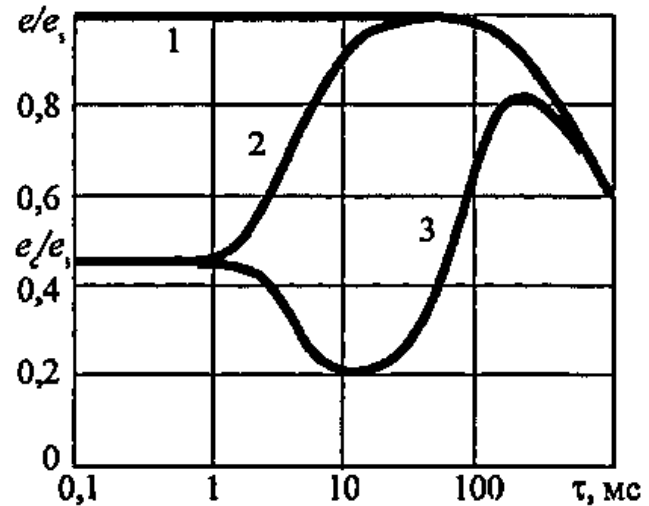


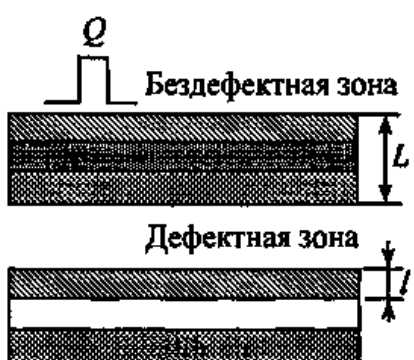
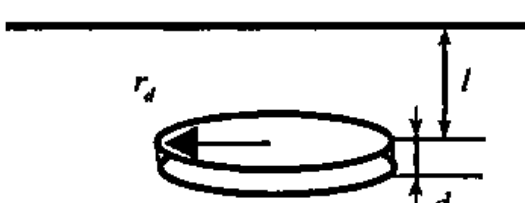
Рис. 3.13. Изменение кажущейся тепловой инерции во времени при импульсном нагреве покрытия Ni-Cr толщиной 100 мкм на подложке из стали толщиной 3 мм:

1 – подложка из стали; 2 – покрытие Ni-Cr на подложке при идеальном контакте слоев; 3 – воздушный дефект между покрытием и подложкой толщиной 1 мкм

фекта приводит к почти пятикратному увеличению избыточной температуры в момент времени около 10 мс, что соответствует приблизительно двукратному снижению кажущейся тепловой инерции (кривая 3). Наличие очевидного минимума в функции $e(\tau)$ является отражением наличия максимума температурного перепада $\Delta T(\tau)$, что позволило предложить решение соответствующей обратной задачи ТК (см. п. 4.1) [6].

3.2.5. Границы применимости реалистичных одномерных моделей ТК. Под реалистичными одномерными моделями понимают такие, которые учитывают все значимые параметры ТК за исключением диффузии тепла на границах дефектов в поперечном направлении. Единственными параметрами, ограничивающими применение таких моделей, описываемых формулами (2.41, 2.49, 2.50, 2.52), являются поперечные размеры дефекта $h_x \times h_y$ в декартовых координатах или радиус дефекта r_d в цилиндрических координатах. Для иллюстраций эффекта растекания те-

3.6. Приблизительные критические значения отношения r_d/l , обозначающие переход от двухмерной к одномерной модели ТК (соответствуют 90 % максимально возможного сигнала)

Одномерная декартова модель		Двухмерная цилиндрическая модель	
			
Глубина дефекта l	Толщина дефекта d	Критическое значение r_d/l	
<i>Алюминий</i>			
$\lambda = 210 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, a = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, L = 2 \text{ мм}, Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$			
10 % L (0,2 мм)	10 % L (0,2 мм)	15	
	30 % L (0,6 мм)	17	
30 % L (0,6 мм)	10 % L (0,2 мм)	7	
	30 % L (0,6 мм)	7	
<i>Углепластик</i>			
$\lambda = 0,64 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, a = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, L = 5 \text{ мм}, Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$			
10 % L (0,5 мм)	10 % L (0,5 мм)	5	
	30 % L (1,5 мм)	7	
30 % L (1,5 мм)	10 % L (0,5 мм)	3	
	30 % L (1,5 мм)	5	
<i>Почва</i>			
$\lambda = 1,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, a = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, L = 20 \text{ см}, Q = 10^3 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 12 \text{ ч}$			
10 % L (2 см)	10 % L (2 см)	8	
	30 % L (6 см)	9	
30 % L (6 см)	10 % L (2 см)	4	
	30 % L (6 см)	4	

пла вокруг скрытых дефектов используем двухмерную цилиндрическую модель.

Пусть изделие содержит дискообразный дефект радиусом r_d на глубине l . Изделие нагревают тепловым импульсом длительностью τ_h , причем энергия нагрева равномерно распределена по передней поверхности изделия. Для любой глубины залегания двухмерный температурный сигнал $\Delta T^{(l)}$ возрастает с ростом радиуса дефекта вплоть до определенного предельного значения $\Delta T^{(l)}$, которое соответствует решению соответствующей одномерной задачи ТК. Это значение является максимально возможным для конкретного дефекта на данной глубине в конкретном изделии.

Критические значения отношения r_d/l приведены в табл. 3.6 для дефектов в различных материалах (рассмотрены случаи, когда толщина и глубина залегания дефектов составляют 10 и 30 % полной толщины изделия L). Значения r_d/l соответствуют отношению $\Delta T^{(l)}/\Delta T^{(h)} = 0,9$, т.е. ситуации, когда, с ростом диаметра дефекта сигнал над дефектом достигает 90 % амплитуды максимально возможного (одномерного) сигнала.

Данные табл. 3.6 показывают, что критические значения r_d/l существенно превосходят общепринятое в литературе условие выявляемости внутренних дефектов: $r_d/l \geq 1$. На практике это означает, что для большинства реальных дефектов одномерные модели приводят к недопустимо большим значениям ΔT .

3.3. ДВУХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ТК

3.3.1. Однослойная пластина с дефектом типа "канал" (декартова система координат). Пусть изделие содержит дефект типа нарушения сплошности, вытянутый в направлении одной из декартовых координат (y). Это означает, что размер дефекта d , на данной глубине отвечает условиям перехода многомерной задачи

в одномерную (табл. 3.6). Таким образом, дефект можно представить протяженным каналом (рис. 3.14, а); задача из трехмерной становится двухмерной.

При равномерном поверхностном нагреве изделия с одиночным дефектом, в силу симметрии задачи по координате x , можно использовать только половину дефекта, причем на границе $\{x = 0, z = 0 \dots L\}$ будет иметь место условие симметрии $\partial T / \partial x = 0$ (рис. 3.14, б).

Узкие подповерхностные трещины, расположенные перпендикулярно передней поверхности, практически не обнаруживаются при равномерном нагреве (поверхностные дефекты могут быть видны на мониторе тепловизора из-за чисто радиационного феномена: трещина выступает в качестве имитатора "черного тела" с повышенным коэффициентом излучения). Однако такие дефекты можно выявить, если в изделии создан тепловой поток, распространяющийся параллельно передней поверхности. Для этого изделие следует нагревать на поверхности в локальной зоне размером S_f , которая может быть неподвижной или перемещающейся со скоростью V (рис. 3.14, в). В ряде случаев можно нагревать торец изделия и отслеживать динамику распространения температурной волны (рис. 3.14, г).

Двухмерные модели (рис. 3.14, б–г) имеют общую математическую постановку. Более общий случай трехмерной декартовой модели ТК рассмотрим в п. 3.5.

3.3.2. Трехслойная анизотропная неадиабатическая пластина с емкостным дефектом (цилиндрическая система координат). Эффективный компромисс между необходимостью анализировать дефекты конечных размеров по всем трем координатам и громоздкостью численных расчетов представляет модель дискообразного дефекта в многослойной дискообразной пластине, реализованная в цилиндрической системе координат. Вследствие азимутальной симметрии в данной модели отсутствует зависимость

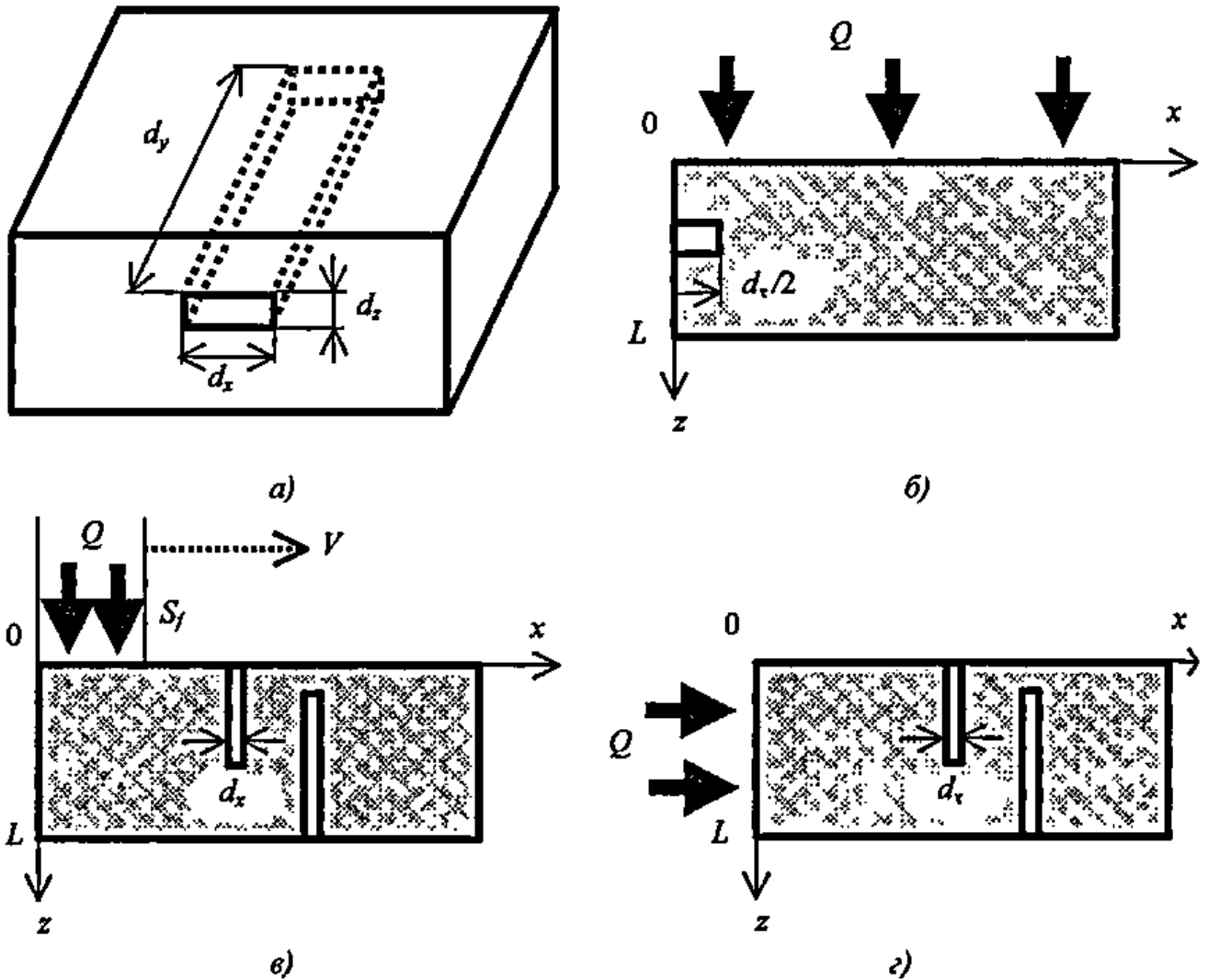


Рис. 3.14. Двухмерная декартова модель ТК

температуры от угла φ , дефект моделируют диском радиуса r_d , расположенным в центральном слое толщиной $d = l_2$. Глубина залегания дефекта равна толщине первого слоя $l = l_1$. Неадиабатические граничные условия имеют место на передней и задней поверхностях; боковая поверхность теплоизолирована.

Коэффициент теплопроводности зависит от координат r и z (анизотропная пластина). В данной модели пространственная функция теплового потока нагрева описывается азимутально-симметричной функцией, тогда как временная функция нагрева может быть произвольной.

Математическая постановка задачи нагрева трехслойной пластины описыва-

ется следующими соотношениями (рис. 3.15):

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2};$$

$$i = 1 \dots 3; \quad 0 \leq r \leq R; \quad (3.41)$$

$$0 \leq z \leq L; \quad \tau > 0$$

$$T_i(r, z, \tau) = 0; \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial T_i(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_i} + \frac{\alpha^F}{\lambda_i} T_i(z=0, \tau); \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial T_i(z=L, \tau)}{\partial z} = -\frac{\alpha^F}{\lambda_i} T_i(z=L, \tau); \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial T_i(z=R, \tau)}{\partial z} = 0; \quad (3.45)$$

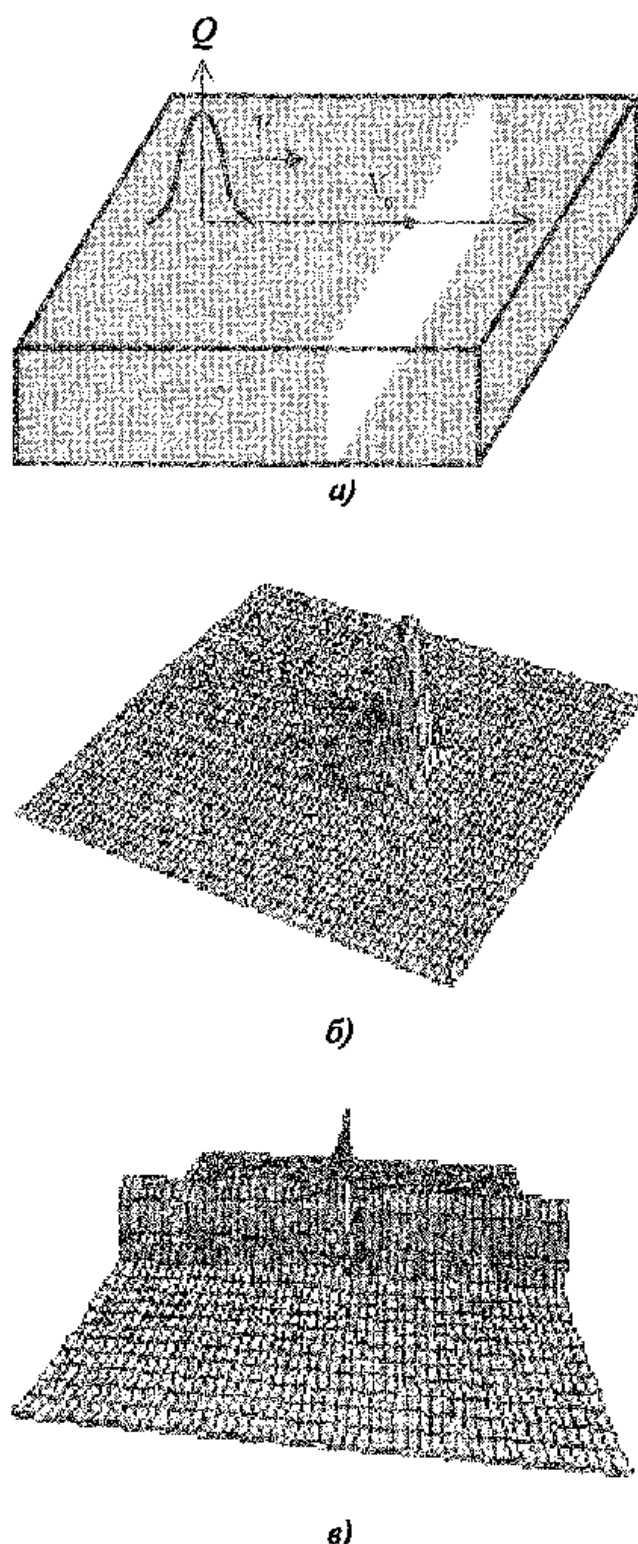


Рис. 3.16. Обнаружение вертикальных трещин движущимся тепловым пучком: а – схема контроля; распределение температуры; б – при отсутствии дефектов (в координатах изделия); в – в зоне вертикальной трещины (в координатах источника)

табл. 2.6 для точечного и гауссовского источников. В первом приближении поверхностную трещину моделируют плос-

костью, расположенной в точке $x = X_0$ перпендикулярнопередней поверхности. Будем считать, что дефект имеет нулевую толщину и теплопроводность (рис. 3.16). При этом возмущающее действие дефекта сказывается прежде всего вдоль координаты x , а общая трехмерность модели обусловлена трехмерностью источника нагрева.

Сигнал от дефекта рассчитывают либо в координатах неподвижного изделия, либо в координатах источника. Для дефекта в виде абсолютно теплоизолированной плоскости можно получить аналитическое решение с помощью метода *изображений*, согласно которому с другой стороны дефекта навстречу основному источнику симметрично движется *мнимый* источник. Температуру в любой точке впереди основного пучка ($x \leq x_0$) определяют по формуле [27]:

$$T(\tilde{x}, Fo) = T_b(\tilde{x}, Fo) + T_a[\tilde{x} + 2(\tilde{x} - \tilde{x}_0), Fo];$$

$$x \leq x_0; \quad Fo \leq ax_0 / VR^2, \quad (3.47)$$

где T_b, T_a – температуры, создаваемые основным (индекс b) и мнимым (индекс a) источниками согласно формуле, приведенной в табл. 2.6; время $Fo \leq ax_0 / VR^2$ соответствует моменту прихода основного источника в точку $x = x_0$. Следовательно, температура в зоне дефекта в момент прихода основного пучка удваивается по сравнению с той температурой, которая была бы при отсутствии дефекта. Согласно закону сохранения энергии, средняя температура в зоне *пассивного* дефекта должна быть равна средней температуре в бездефектной зоне, очевидно, что за трещиной должна возникнуть зеркальная область пониженной температуры.

3.5. ТРЕХМЕРНАЯ АДИАБАТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТК

В работе [28] предложено решение задачи ТК трехмерной адиабатической анизотропной пластины с прямоугольным резистивным дефектом размером $b \times c$

(рис. 3.17). Решение включает преобразование Лапласа по времени и преобразование Фурье по двум поперечным пространственным координатам. Постановка задачи для температуры $T(x, y, z, \tau)$ является классической. В пространстве Лапласа она имеет вид (p есть переменная Лапласа – аналог времени τ):

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + \frac{\lambda_x}{\lambda_z} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\lambda_y}{\lambda_z} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} - \frac{p}{a_z} \Theta = 0;$$

$$x = 0, L_x : \frac{\partial \Theta}{\partial x} = 0; \quad y = 0, L_y : \frac{\partial \Theta}{\partial y} = 0;$$

$$z = 0 : -\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} = Q; \quad z = l : \frac{\partial \Theta^{d.f}}{\partial z} = \frac{\partial \Theta^{d.r}}{\partial z};$$

$$\Theta^{d.f} - \Theta^{d.r} = R_d f(x, y) \left(-\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z}\right);$$

$$z = L_z : \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0, \quad (3.48)$$

где Θ – образ температуры T в пространстве Лапласа; L_x, L_y, L_z – размеры пластины; l – глубина залегания дефекта; $f(x, y) = 1$ при $\{x, y\} \in [x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$, иначе $f(x, y) = 0$; $b = x_2 \dots x_1$; $c = y_2 \dots y_1$ – размеры дефекта по координатам x и y ; R_d – термическое сопротивление бесконечно малой толщины; индексы "d.f" и "d.r" относятся к передней и задней поверхностям дефекта.

Представляет интерес постановка задачи в безразмерном виде:

$$\Theta^* = \Theta / (Q L_z / \lambda_z); \quad b^* = \frac{b}{L_x} (\lambda_z / \lambda_x)^{1/2};$$

$$c^* = \frac{c}{L_y} (\lambda_z / \lambda_y)^{1/2};$$

$$\Psi^* = \Psi / Q; \quad x^* = \frac{x}{L_x} (\lambda_z / \lambda_x)^{1/2};$$

$$y^* = \frac{y}{L_y} (\lambda_z / \lambda_y)^{1/2}; \quad (3.49)$$

$$p^* = L_z^2 p / a_z; \quad R_d^* = R_d / (L_z / \lambda_z);$$

$$z^* = z / L_z; \quad l^* = l / L_z,$$

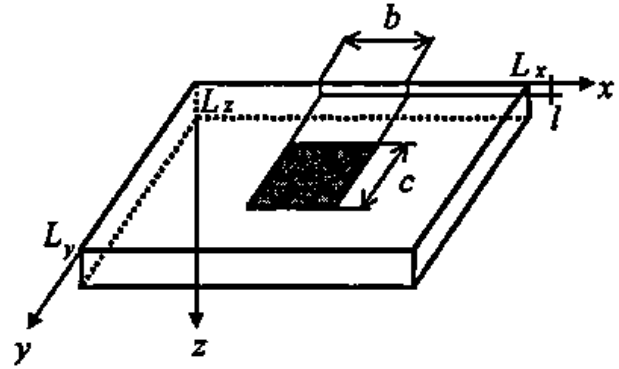


Рис. 3.17. К решению трехмерной адиабатической задачи ТК

где Ψ – образ z -компоненты плотности теплового потока $q_z = -\lambda_z (\partial T / \partial z)$. В дальнейшем в данном параграфе индекс * будет опущен.

Основное дифференциальное уравнение примет вид

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} - p \Theta = 0. \quad (3.50)$$

К функции Θ в уравнении (3.50) применяют двойное косинус-преобразование Фурье

$$T(\alpha, \beta, z, p) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Theta(x, y, z, p) \cos(\alpha x) \times$$

$$\times \cos(\beta y) dx dy, \quad (3.51)$$

где T – Фурье-образ Θ , а безразмерные пространственные пульсации приобретают дискретные значения:

$$\alpha_j = j \pi / L_x; \quad \beta_k = k \pi / L_y, \quad (3.52)$$

где j и k – неотрицательные целые числа.

В пространстве Фурье уравнение (3.50) приобретает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - (p + \alpha^2 + \beta^2) T = 0, \quad (3.53)$$

решение имеет форму

$$T = F \operatorname{ch}(uz) + G \operatorname{sh}(uz); \quad u = \sqrt{p + \alpha^2 + \beta^2}. \quad (3.54)$$

Решение (3.54) может быть получено в явном виде, после чего возвращение по-

следовательно из пространства Фурье и Лапласа производят в численном виде. Основным преимуществом данного решения является возможность его использования в тепловой дефектометрии (см. п. 4.7.4).

3.6. ОБОБЩЕННАЯ ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТК (ТРЕХСЛОЙНАЯ АНИЗОТРОПНАЯ НЕАДИАБАТИЧЕСКАЯ ПЛАСТИНА С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ЕМКОСТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ)

Дефекты любого типа в объектах произвольной геометрической формы целесообразно описывать в трехмерной декартовой системе координат. На практике приемлемой является модель, в которой в изделии, имеющем форму многослойного параллелепипеда, содержатся дефекты в форме параллелепипеда. Для трехслойной пластины математическая постановка задачи имеет следующий вид (рис. 3.18).

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_i^x \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + a_i^y \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + a_i^z \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}; \quad (3.55)$$

$i = 1 + M + 3$ (три слоя и M дефектов);

$$T_i(\tau = 0) = T_m; \quad (3.56)$$

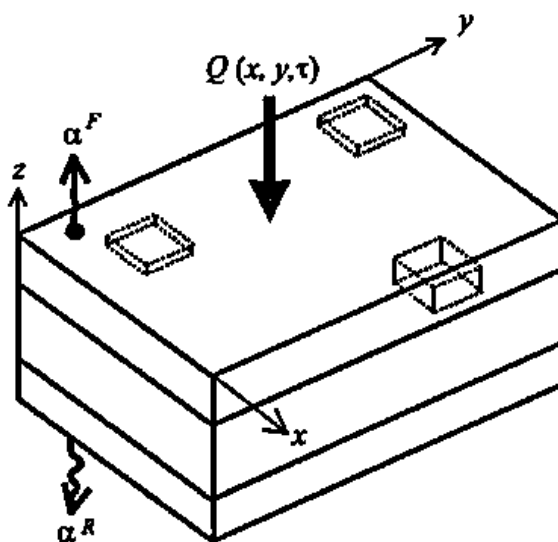


Рис. 3.18. Трехмерная декартова модель ТК

$$-\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = Q(x, y, \tau) - \alpha^F [T_1(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (3.57)$$

$$\lambda_3^z \frac{\partial T_3(x, y, z=L_z, \tau)}{\partial z} = -\alpha^R [T_3(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0$$

для $x=0, y=0 \div L_y; x=L_x, y=0 \div L_y;$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y} = 0 \quad (3.59)$$

для $y=0, x=0 \div L_x; y=L_y, x=0 \div L_x;$

$$T_i(x, y, z, \tau) = T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau) \text{ и}$$

$$\lambda_i^{q_j} \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} = \lambda_{i\pm 1}^{q_j} \frac{\partial T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} \quad (3.60)$$

на границах между слоями, а также между слоями и дефектами.

Здесь T_i – температура в i -й области, отсчитываемая от начальной температуры объекта контроля ($i=1 \dots 3$ соответствует слоям изделия и $i=4 \dots (M+3)$ соответствует M дефектам); T_m – начальная температура объекта; $\alpha_i^{q_j}, \lambda_i^{q_j}$ – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности в i -й области вдоль координаты q_j ; x, y, z – декартовы координаты; q_j – одна из трех декартовых координат x, y или z ($j=1 \dots 3$); τ – время; $Q(x, y, \tau)$ – плотность теплового потока, в общем случае зависящая от времени и пространственных координат; α^F, α^R коэффициенты теплоотдачи соответственно на передней и задней поверхностях; T_{amb} – температура окружающей среды; L_x, L_y, L_z – размеры изделия по трем декартовым координатам.

Аналогично набору уравнений (3.41 – 3.47) уравнение (3.55) – трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа; (3.56) – начальное условие; уравнение (3.57) описывает граничное условие на передней поверхности, включая нагрев и охлаждение; (3.58) – на задней поверхности (только охлаждение); (3.59) соответствуют адиабатическим граничным условиям на боковых поверхностях объекта (вдоль координат x и y); (3.60) описывают условия неразрывности температуры и тепловых потоков на границах слоев, а также слоев и дефектов.

В зависимости от задания функции нагрева $Q(x, y, \tau)$ вышеописанная модель ТК может включать различные виды нагрева и охлаждения объекта контроля и соответственно реализовывать различные методы ТК. Трехмерная декартова модель (рис. 3.18) использована в программе ThermoCalc-3D.

3.7. УСЛОВИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ОТ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

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

$$s = \frac{\Delta T}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i, noise}^2}}, \quad (3.61)$$

где $\Delta \bar{T}_{i, noise}^2$ – дисперсия шумовых сигналов от N некоррелированных источников. Более подробно статистические процедуры обнаружения сигналов от дефектов на фоне помех будут описаны в главе 6. Особенности оптимизации процедур ТК связаны с выполнением ряда простых условий, которым должны удовлетворять информативные параметры ТК.

Внутренний дефект может быть надежно обнаружен оператором или автоматическим устройством, если в момент на-

блюдения обусловленный им сигнал превышает уровень шумов:

$$s > 1 \text{ или } \Delta T > \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i, noise}^2}. \quad (3.62)$$

Дисперсия шума изменяется во времени, поэтому максимальное значение s может наступать в определенный момент времени, в общем случае не совпадающий с максимумом $\Delta T(\tau)$ или $C = \Delta T(\tau)/T(\tau)$. В данной главе мы ограничимся рассмотрением двух крайних случаев: 1) шумы ТК являются только *аддитивными* и полностью определяются шумами детектора

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

ТК являются только мультипликативными и определяются излучательно-поглощательными свойствами изделия; их можно характеризовать контрастом помехи C_{noise} , 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

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{res}. \quad (3.63)$$

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

$$C(\tau_m) > C_{noise}. \quad (3.64)$$

Следует заметить, что максимальные температурные контрасты возникают при кратковременном (Дираковском) нагреве.

Принципиальное различие вышеуказанных условий состоит в том, что условие (3.63) можно выполнить всегда путем увеличения поглощенной энергии W (мощности нагрева Q). Условие (3.64) не зависит от $W(Q)$ и определяется свойствами изделия.

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

$$T_{dsh}(\tau = \tau_h) < T_{desh} \quad (3.65)$$

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, внутренние дефекты обнаруживаются тепловым методом, если выполняется совокупность следующих трех условий

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{ics}, \quad C(\tau_m) > C_{noise},$$

$$T_{dsh}(\tau = \tau_h) < T_{desh} \quad (3.66)$$

В условиях (3.66) участвуют параметры 1) аппаратуры (ΔT_{ics}), 2) изделия (C_{noise}), 3) нагрева (T_{dsh}), 4) дефекта (ΔT или C)

3.8. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЯ И ДЕФЕКТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТК

В моделях ТК, описанных выше, температурный сигнал над внутренним дефектом ΔT и его производные, например, текущий температурный контраст $C^{int} = \Delta T / T_{pd}$, зависят от

- времени $\{\tau_h\}$,
- параметров нагрева $\{Q, \tau_h\}$,
- интенсивности теплообмена объекта контроля с окружающей средой $\{\alpha^F, \alpha^R\}$,
- толщины объекта контроля $\{L\}$,

- теплофизических свойств объекта контроля $\{\lambda, \alpha\}$,

- геометрических размеров дефекта $\{h_1, h_2, h_z = d\}$ и глубины его залегания $\{l\}$,

- ТФХ дефекта $\{\lambda_d, a_d\}$

Таким образом, на выявляемость дефектов тепловым методом влияют, по крайней мере, 14 параметров, часть из которых, а именно $\{\alpha^F, \alpha^R, \lambda, a, a_d\}$, можно условно отнести к разряду слабо влияющих в обычных условиях испытаний

3.8.1. Изменение температурных сигналов во времени. Тепловой НРК называют активным, или динамическим (transient, dynamic), поскольку сигналы от внутренних дефектов существенно зависят от времени наблюдения информативных параметров. Анализ изменений ΔT и C^{int} во времени представляет также интерес с точки зрения повышения отношения сигнал/шум, соответствующие алгоритмы широко распространены в современном ТК

Ряд особенностей изменения температуры нагреваемых тел во времени были рассмотрены в главе 2 с использованием одномерных классических решений теории теплопроводности, которые имеют критериальную форму и позволяют анализировать температурные функции в наиболее общей форме. В настоящем параграфе будут рассмотрены результаты анализа многомерных моделей, описанных в пп 3.3, 3.4. Большая часть примеров будет относиться к выявлению дефектов в композиционных материалах типа углепластика, которые широко используются в авиакосмической технике и представляют обширное поле для применения ТК. Тем не менее, приведенные результаты качественно объясняют особенности ТК и для многих других материалов

На рис 3.19, а, б показаны изменения температуры на передней (F) и задней (R) поверхностях изделия из углепластика толщиной 5 мм, нагреваемого тепловым

импульсом (в данном случае изделие считается изотропным, поскольку наибольшее влияние на амплитуду ΔT оказывает компонента тензора теплопроводности λ_z) При кратковременной тепловой стимуляции, т.е. когда длительность нагрева существенно меньше характерных времен теплопередачи в конкретном изделии ($Fo_h = \sigma \tau_h / L^2 \ll 0,1$), заметная разница между дефектной T_d и бездефектной T_{nd} температурой начинает сказываться на стадии охлаждения ($\tau > \tau_h$) На рис 3 19, в, г дифференциальные температурные сигналы $\Delta T = T_d - T_{nd}$ сравнены с текущим температурным контрастом $C^{rim} = \Delta T / T_{nd}$ (в дальнейшем индекс "rim" будет опущен) На обеих поверхностях изделия информативные параметры ΔT и C обнаруживают специфические максимумы, которые наступают при различных оптимальных временах наблюдения τ_m На передней поверхности (рис 3 19, в), на стадии охлаждения, максимальное значение ΔT_m наступает раньше, чем максимальное значение контраста C_m Напротив, если оба максимума имеют место внутри импульса нагрева, то максимальный контраст C_m опережает максимальный перепад ΔT_m Во многих случаях, максимальное отношение сигнал/шум наступает в момент максимального контраста $\tau_m(C_m)$, который может рассматриваться как *оптимальное время* ТК (optimal observation time) На задней поверхности изделия максимальный контраст обычно наступает при очень коротких временах, когда избыточная температура T и температурный сигнал ΔT малы Поэтому в двусторонних процедурах ТК (рис 3 19, г), оптимальным временем контроля является такое, при котором сигнал ΔT начинает превышать уровень шумов Следует напомнить, что $\Delta T > 0$ на нагреваемой поверхности и $\Delta T < 0$ на задней поверхности для дефектов, чья теплопроводность

ниже, чем теплопроводность основного материала Для более теплопроводных включений знак дифференциального температурного сигнала становится обратным

Из последнего правила есть исключение, обусловленное так называемой *инверсией* ΔT Инверсия возникает на передней поверхности при больших временах наблюдения, когда слой перегретого над дефектом основного материала начинает охлаждаться быстрее, чем бездефектные слои Амплитуда инверсионного сигнала обычно мала, и это явление редко наблюдают на практике Возможности, которые гипотетически представляет инверсия для выделения сигналов от дефектов на фоне помех, до сих пор не исследованы

Из-за диффузного характера теплопередачи в твердом теле температурные сигналы на передней поверхности весьма чувствительны к глубине залегания дефектов l с ростом l уменьшается не только амплитуда ΔT , но и моменты оптимального ТК наступают при более поздних временах (рис 3 19, д) Феноменологически это можно объяснить, используя концепцию температурных волн, согласно которой гармонические компоненты стимулирующего теплового импульса проникают в твердое тело на различную глубину в зависимости от частоты, испытывая при этом отражение, интерференцию и затухание Важной характеристикой двусторонних процедур ТК является тот факт, что характеристики температурных сигналов на задней поверхности, в основном, определяются толщиной изделия L и относительно слабо зависят от l Интересно отметить, что максимальные значения ΔT_m и τ_m имеют место для дефектов, расположенных в центре изделия (рис 3 19, е)

Тепловое нагружение в методе тепловых волн часто описывают функцией

$$Q = \frac{Q_m}{2} [1 - \cos(2\pi f \tau)], \quad (3.67)$$

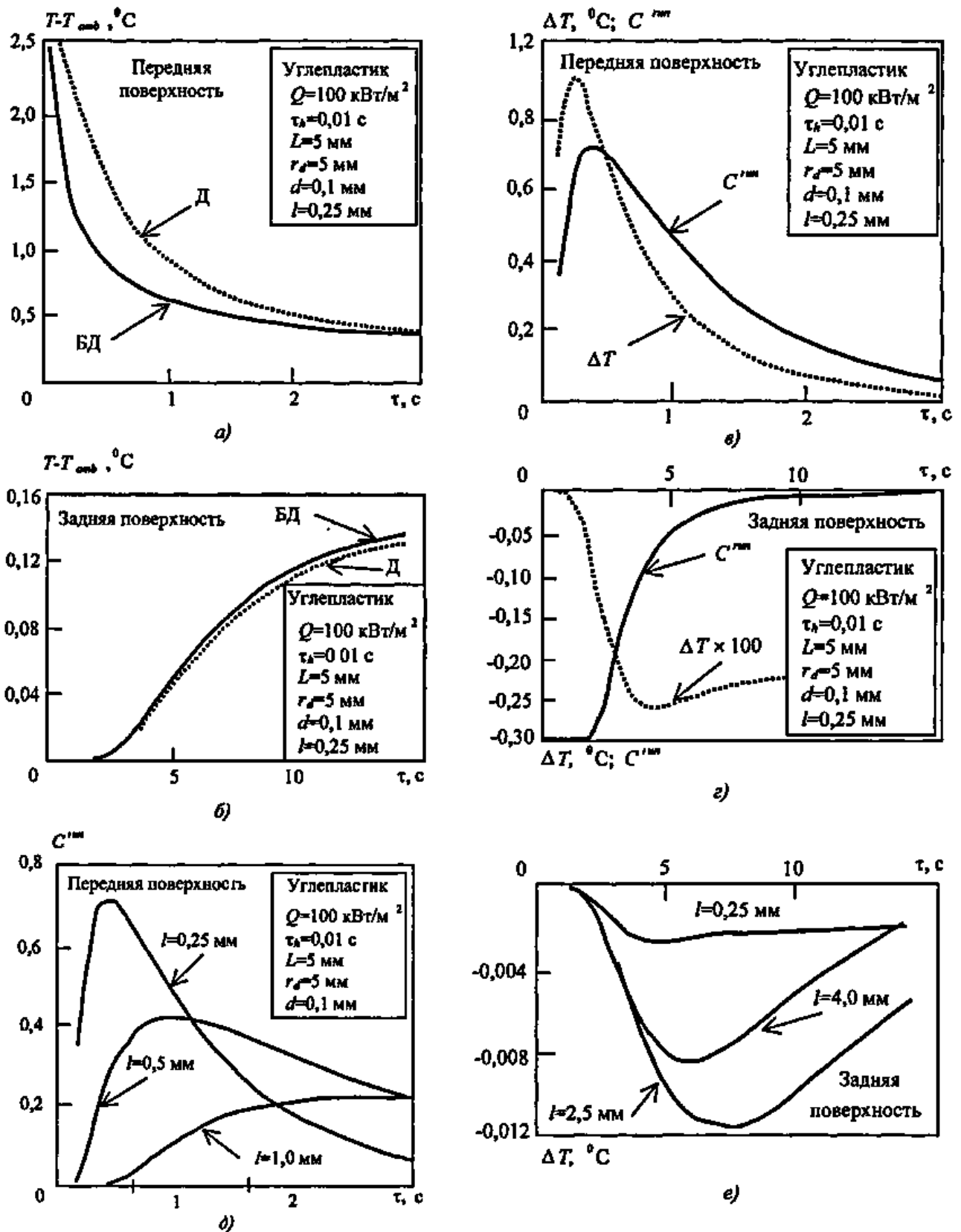


Рис. 3.19. Изменение температурных сигналов во времени на поверхности углепластика толщиной 5 мм в результате действия теплового импульса длительностью 0,01 с (БД – бездефектная зона, Д – дефектная зона).

Температура на поверхности: а – передней б – задней. Температурный сигнал и контраст на поверхности: в – передней; г – задней. Зависимость температурного сигнала от глубины дефектов на поверхности: д – передней; е – задней

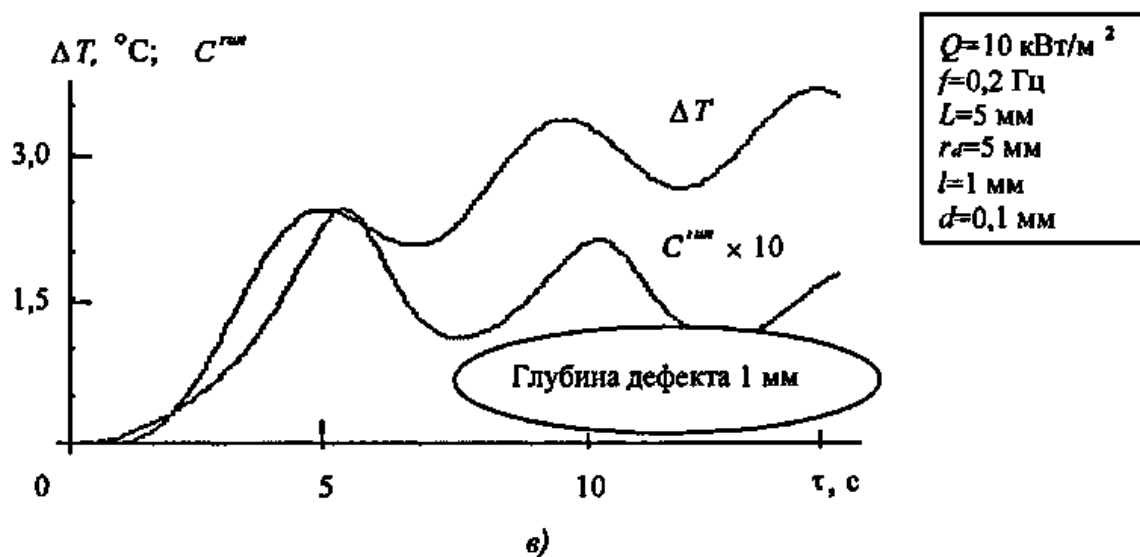
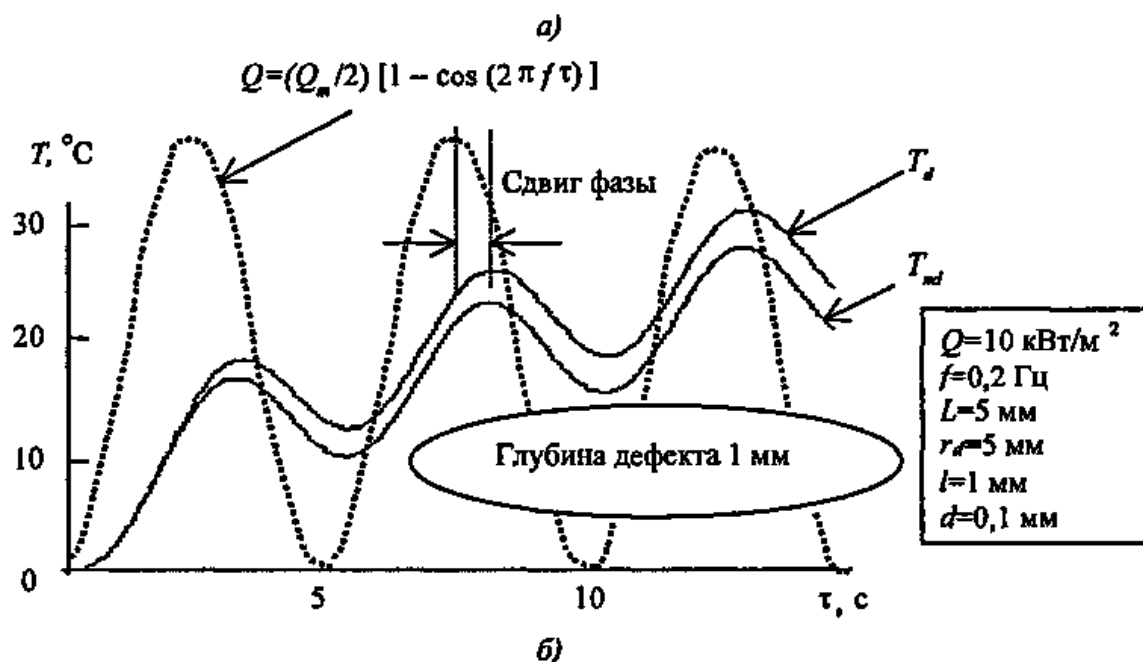
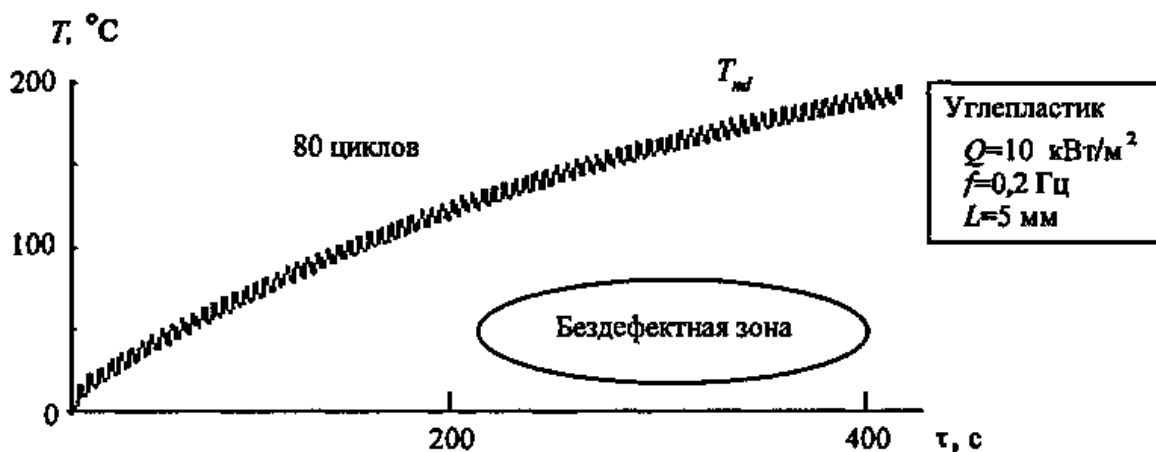


Рис. 3.20. Изменение температурных сигналов во времени на поверхности изделия из углепластика, нагреваемого гармоническим тепловым потоком (воздушный дефект на глубине 1 мм, частота нагрева $f=0,2 \text{ Гц}$ близка к оптимальной):
 а – температура на передней поверхности в бездефектной области (80 циклов нагрева);
 б – температура на передней поверхности (3 цикла нагрева); в – температурный сигнал и контраст на передней поверхности (3 цикла нагрева)

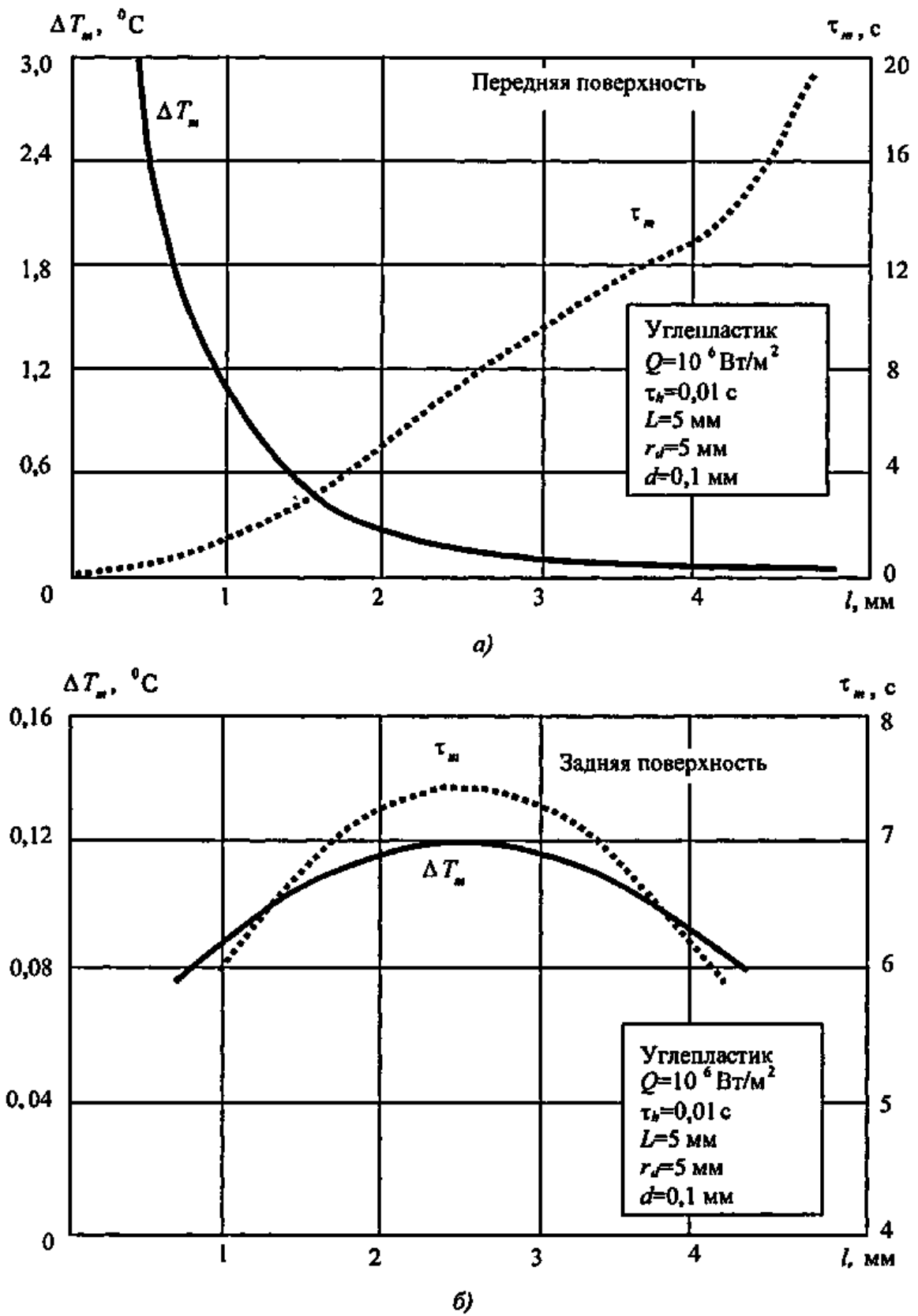


Рис. 3.21. Оптимальные параметры обнаружения дефектов в углепластике толщиной 5 мм в зависимости от глубины их залегания:
 а – передняя поверхность; б – задняя поверхность

которая обеспечивает неотрицательные значения плотности теплового потока в течение всего нагрева.

Поверхностная температура, как в бездефектной, так и в дефектной зонах, имеет постоянную и гармоническую компоненты (см. пример на рис. 3.20, а). Квазистационарный режим достигается через определенное количество волновых периодов, которое зависит от типа материала и толщины изделия. Классический *фототермический* (photothermal) метод, обычно применяемый в испытаниях гонимых материалов, требует 5 ... 10 циклов для достижения квазистационарного режима, при котором анализируют амплитуду и фазу тепловых волн. В ТК широко применяют модификацию этого метода, которая получила название *синхронного термографического контроля* (lock-in thermo-graphy). В отличие от фототермического метода, в котором реализована поточечная схема сканирования изделия, данный метод предусматривает нагрев изделия и регистрацию температуры в достаточно больших зонах. При контроле относительно толстых изделий, например, углепластика толщиной 5 мм. может понадобиться несколько десятков циклов для того, чтобы установился квазистационарный режим (рис. 3.20, а).

Наиболее примечательной характеристикой поверхностных тепловых волн является наличие *сдвига фаз* (phase lag) как относительно функции нагрева, так и между волнами в бездефектной и дефектной областях (рис. 3.20, б). На поверхности полубесконечного тела сдвиг фазы бездефектной поверхностной волны относительно функции нагрева равен 45° . Фазовые сдвиги рассматривают в качестве информативного критерия дефектности тела, который часто обеспечивает лучшее значение отношения сигнал/шум по сравнению с температурной амплитудой. Поскольку фаза может быть выражена в терминах времени, анализ сигналов в фазовом пространстве в определенной степени идентичен анализу во временной области.

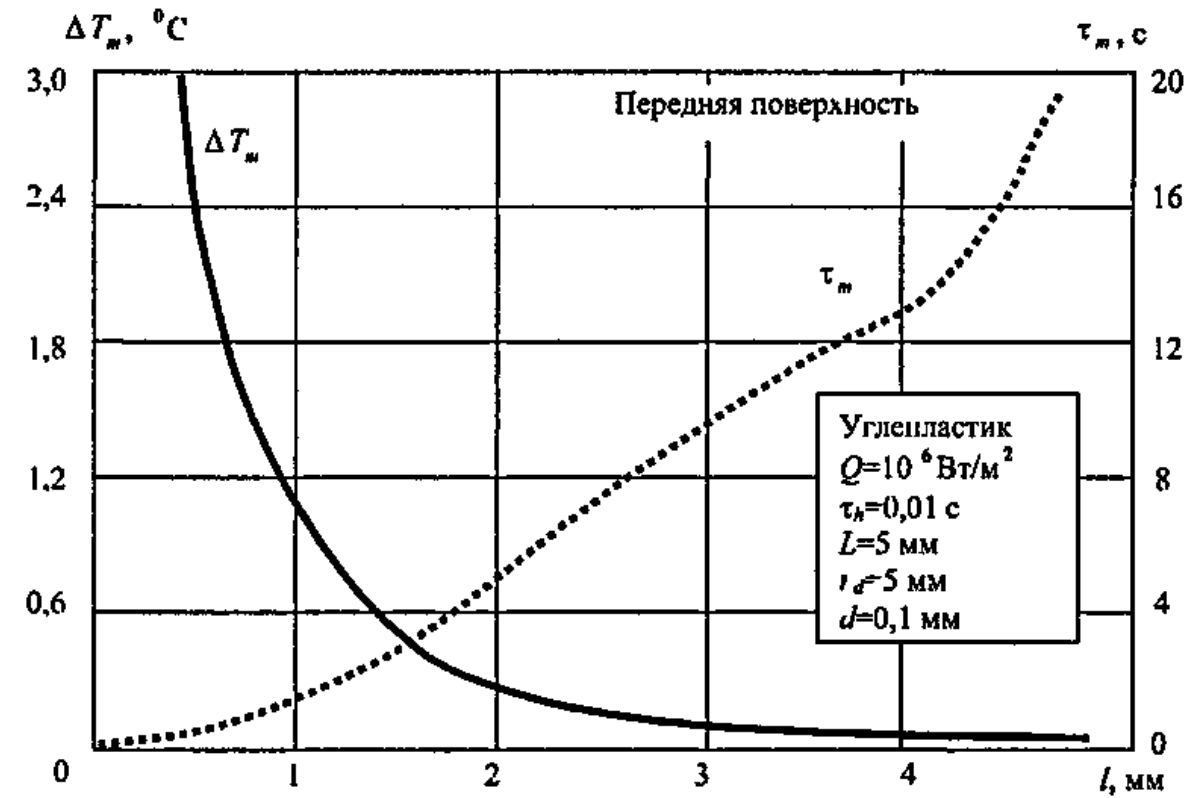
Известно, что измерения как фазы, так и времени, являясь более помехозащищенными, что обусловило их широкое применение в измерительной технике и НК.

Концепция абсолютных температурных сигналов и безразмерных температурных контрастов сохраняет свое значение также и для метода тепловых волн. Примеры развития ΔT и C во времени показаны на рис. 3.20, в. Оба информативных параметра испытывают периодические колебания. Постоянная компонента температурного сигнала возрастает с течением времени по крайней мере в течение первых пяти периодов, поскольку фактически тело нагревается той постоянной составляющей теплового потока, которая содержится в функции нагрева вида (3.67). В то же время температурный контраст быстро достигает максимума через 5 с после включения нагревателя, что соответствует тепловой волне с частотой 0,2 Гц (эта частота близка к оптимальной при обнаружении расслоений в углепластике на глубине 1 мм).

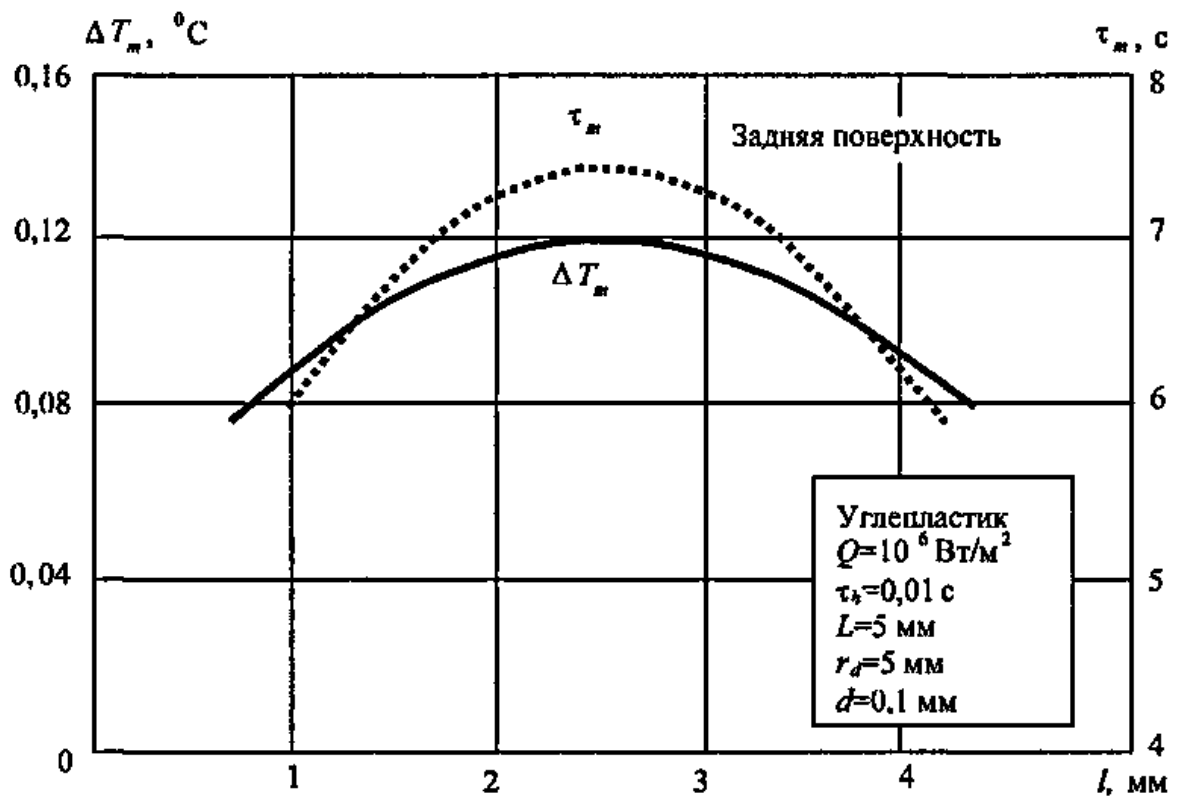
3.8.2. Глубина залегания дефекта.

Влияние глубины залегания дефекта l на оптимальные параметры ТК проиллюстрировано рис. 3.21 на примере ТК углепластика толщиной 5 мм.

На передней поверхности температурный сигнал резко спадает с ростом l (рис. 3.21, а). Если принять типичное температурное разрешение ИК-прибора равным $0,1^\circ\text{C}$, предельная глубина обнаружения составит около 3 мм. Этот вывод справедлив для мощности нагрева $Q = 10^6 \text{ Вт/м}^2$, что соответствует избыточной температуре поверхности в конце нагрева $\sim 110^\circ\text{C}$. Дальнейшее увеличение мощности нагрева способно повысить ΔT и соответственно увеличить предельное значение l , однако при этом изделие может разрушиться вследствие перегрева. Таким образом, предельно допустимая температура материала ограничивает повышение мощности нагрева при обнаружения более



а)



б)

Рис. 3.22. Оптимальные параметры обнаружения дефектов в углепластике толщиной 5 мм в зависимости от толщины дефекта:
 а – передняя поверхность; б – задняя поверхность

более глубоких дефектов. Более строго мультипликативной поверхностной помехи, рост температуры нагрева не приведет к улучшению отношения сигнал/шум вследствие пропорционального возрастания амплитуды шума. Что касается оптимального времени наблюдения τ_m , то оно возрастает с увеличением l , достигая $\tau_m \sim 10$ с при $l \sim 3$ мм. Отметим, что с учетом данных рис. 3.21, а, рекомендуемое в литературе соотношение $\tau_m = l^2/a$, которое не принимает во внимание конечные размеры дефектов, может рассматриваться только в качестве грубого приближения.

На задней поверхности графики обеих функций $\Delta T(l)$ и $\tau_m(l)$ являются симметричными относительно середины изделия $l = 2,5$ мм (рис. 3.21, б). Иными словами, при двусторонней процедуре ТК, максимальные сигналы ΔT создаются дефектами, находящимися в центре изделия.

3.8.3. Толщина дефекта. В принципе толщина дефекта d в направлении распространения основного теплового потока является всего лишь одним из размеров дефекта, которые в целом существенно влияют на ΔT_m и τ_m . Анализ параметра d отдельно от поперечных размеров дефектов h целесообразен при сравнении многомерных и одномерных задач ТК. Как следует из рис. 3.22, с ростом d увеличивается амплитуда сигнала ΔT и возрастает время τ_m . Если дефект расположен в середине изделия, т.е. на глубине $l = 2,5$ мм, соответствующие зависимости подобны как для передней, так и для задней поверхностей (рис. 3.22). Наиболее сильно параметры ΔT и τ_m изменяются при малых значениях d , в частности, для тонких дефектов можно считать, что $\Delta T \sim d$. При значительных толщинах дефектов соответствующие зависимости проявляют эффект насыщения.

При разработке алгоритмов тепловой дефектометрии дефектов решающим па-

раметром является не толщина, а *тепловое сопротивление дефекта* $R_d = d/\lambda_d$, поскольку толщина дефекта d и его теплопроводность λ_d совместно влияют на параметры обнаружения. Это еще одно отличие параметра d от поперечных размеров h_x и h_y , которые больше связаны с чисто геометрическими показателями функции $\Delta T(x, y, \tau)$ на поверхности изделия.

3.8.4. Поперечные размеры и конфигурация дефекта. Дефекты достаточно больших поперечных размеров могут приводить к одномерному течению тепла через дефект. Это положение проиллюстрировано на рис. 3.23 зависимостью ΔT_m и τ_m от r_d/l . Видно, что в углепластике поперечным тепловым потоком можно пренебречь, если $2r_d/l > 5$. Для более теплопроводного алюминия это условие становится более жестким: $2r_d/l > 10$. В литературе по ТК известно приближенное правило, согласно которому с помощью теплового метода можно обнаружить дефекты, поперечный размер которых по крайней мере вдвое превышает глубину их залегания, т.е. $2r_d/l > 2$. Данные рис. 3.23, а подтверждают этот вывод, поскольку именно со значений $2r_d/l \leq 2$ начинается резкий спад ΔT_m . Следует отметить, что временные параметры (τ_m) более устойчивы к вариациям поперечных размеров дефектов, что еще раз доказывает предпочтительность их использования для оценки параметров дефектов.

Другой аспект анализа диффузии тепла в поперечном направлении относится к влиянию на ΔT_m и τ_m конфигурации дефектов при их неизменной площади, а также влиянию дефектов друг на друга. На рис. 3.24 приведены термограммы, полученные при трех моментах времени, для 50 %-го коррозионного уноса материала в стальной пластине толщиной 2 мм. Площадь поперечного сечения всех дефектов равна 25 мм² (рис. 3.24, а). Форма дефектов воспроизводится наилучшим образом

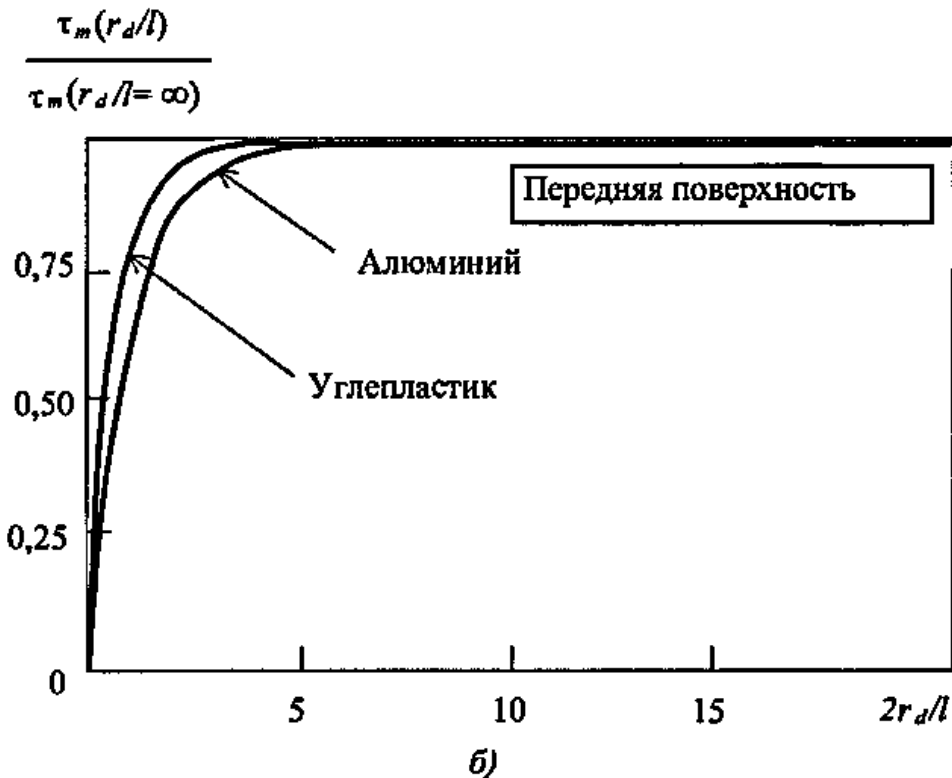
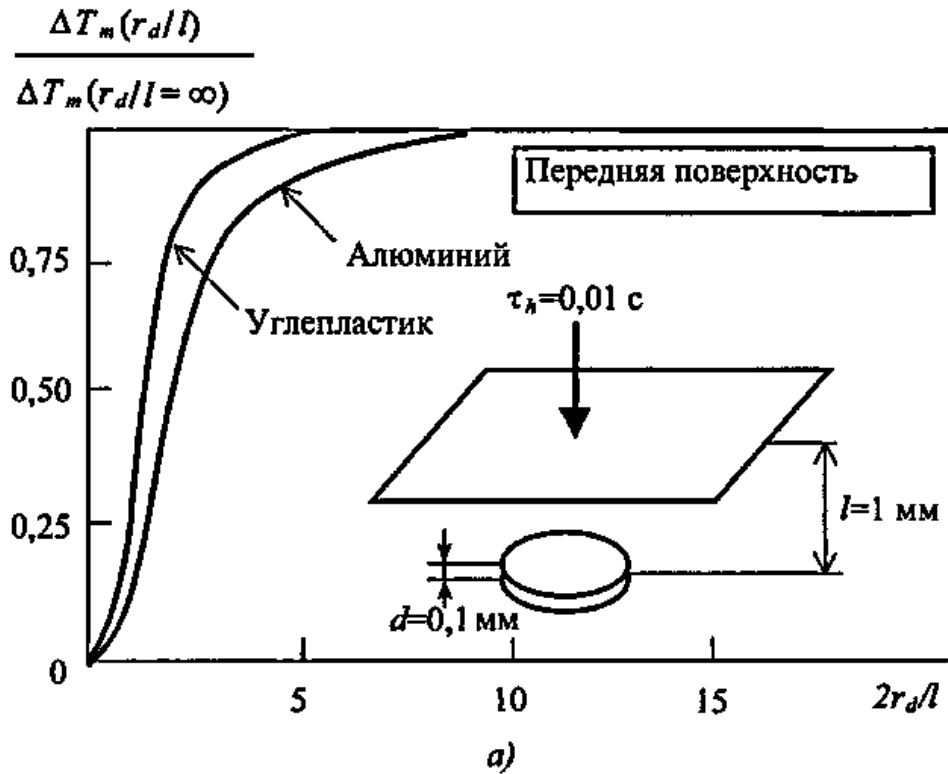


Рис. 3.23. Зависимость от поперечных размеров дефектов оптимальных параметров обнаружения:

а – максимального температурного сигнала; б – оптимального времени наблюдения

при малых временах наблюдения (рис. 3.24, б), когда поперечный тепловой поток незначителен; при этом влияние близко-расположенных дефектов друг на друга минимально. При оптимальном времени

наблюдения (рис. 3.24, а) температурный сигнал достигает максимума ΔT_m , однако при этом возрастает интенсивность диффузии тепла в поперечном направлении. В этот момент времени пятикратное измене-

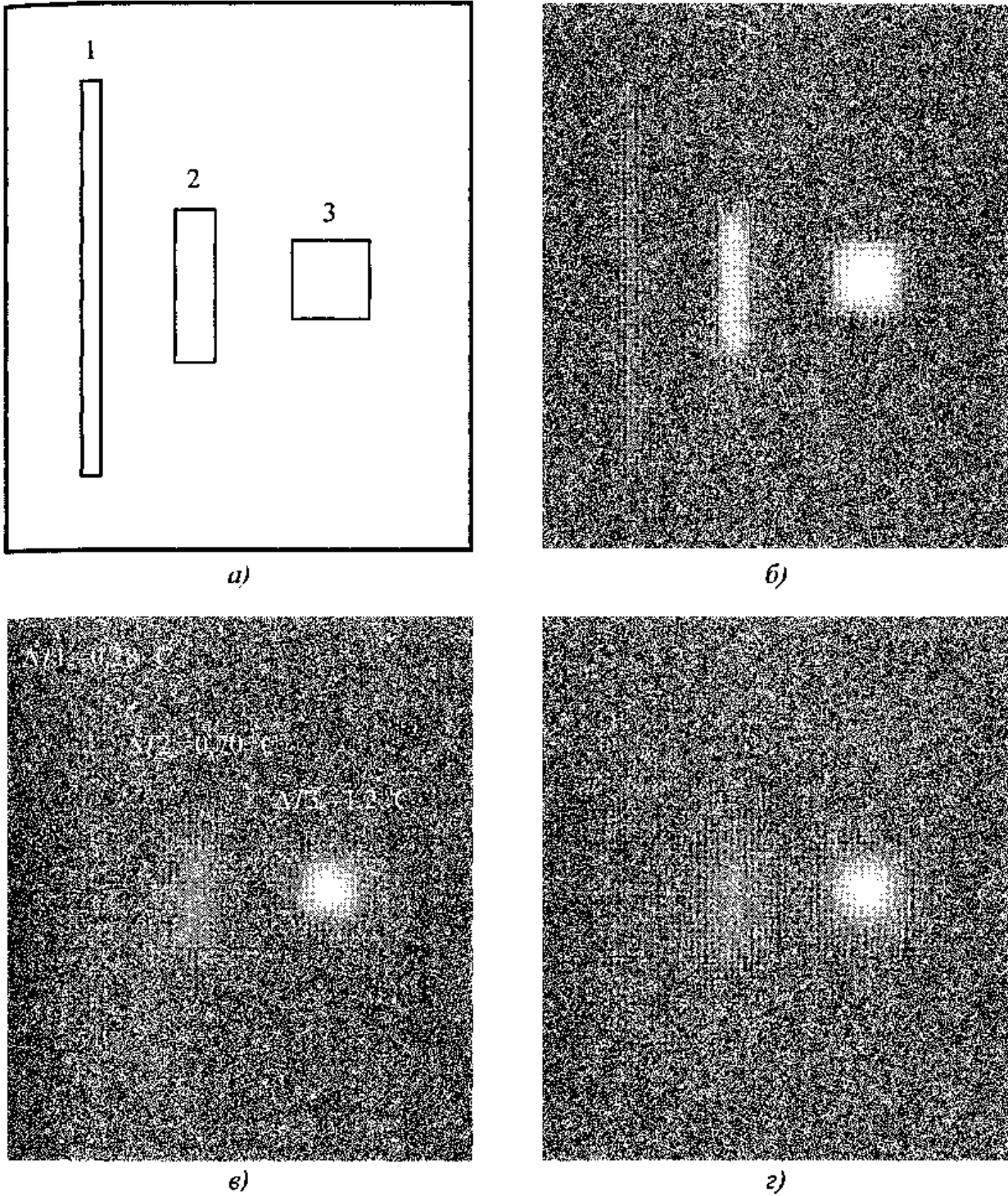


Рис. 3.24. Влияние конфигурации дефектов на распределение поверхностной температуры (обнаружение 50 %-го коррозионного уноса материала в стали толщиной 2 мм; $Q = 10^6$ Вт/м²; $\tau_h = 0,01$ с):
 а – схема дефектов (дефект 1 – 1×25 мм², дефект 2 – 2×10 мм², дефект 3 – 5×5 мм²),
 б – распределение температуры при 0,1 с; в – 0,5 с (оптимальные условия обнаружения); г – 1 с

ние размеров дефекта вдоль одной из координат приводит приблизительно к пятикратному изменению ΔT_m , даже если площадь поперечного сечения дефекта постоянна (сравнить сигналы от дефектов 1 и

3). При больших временах наблюдения диффузия тепла может существенно искажать поверхностные температурные "отпечатки" скрытых дефектов. Например, в анизотропных материалах форма таких

отпечатков может искажаться из-за различий в теплопроводности материала вдоль различных координат (рис 3 24, з)

3.8.5. Протокол нагрева и его оптимизация. Гипотетическая оптимальная процедура ТК В силу линейности задач ТК, по крайней мере при обычных условиях, избыточная температура поверхности T и температурный сигнал ΔT прямо пропорциональны мощности (энергии) нагрева Поэтому, как отмечено выше, для обеспечения максимального значения ΔT мощность нагревателя Q должна быть возможно большей В то же время рост Q , с одной стороны, ограничивается предельно допустимой температурой материала изделия (температурой деструкции), с другой стороны, максимизировать следует не сам сигнал, а отношение сигнал/шум Во многих случаях для этого достаточно обеспечить максимальное значение текущего температурного контраста $C^{run} = \Delta T / T$ Еще в 1975 г А Е Карпельсон и др показали, что максимальный контраст создается мгновенным точечным источником, перемещающимся по объему изделия [29] Авторами исследован на экстремумы функционал, полученный в результате аналитического решения трехмерной задачи для тела с дефектом, который моделировали экспоненциальным изменением ТФХ

Максимальный контраст C^{run} достигается, если в центре дефекта действует мгновенный точечный источник В то же время максимально возможное значение C^{run} можно получить из следующих физических рассуждений Пусть происходит нагрев энергией W поочередно элементарного адиабатического объема ΔV внутри дефекта и равного объема в основном материале Среднее повышение температуры элементарных объемов равно

$$T_{nd} = \frac{W}{(c\rho)_{nd} \Delta V}, T_d = \frac{W}{(c\rho)_d \Delta V} \quad (3\ 68)$$

Максимальная величина C^{run} составляет

$$C_m^{run} = \frac{(c\rho)_{nd}}{(c\rho)_d} - 1 \quad (3\ 69)$$

Условия максимальной локализованности и мгновенного действия гипотетического оптимального источника нагрева физически следуют из необходимости обеспечить максимальную адиабатичность элементарного объема, т е предотвратить объемную диффузию тепла

Практическая реализация указанного способа тепловой стимуляции затруднительна, поэтому близкими к оптимальным режимам ТК являются 1) поверхностный нагрев сосредоточенным тепловым пучком, сканирующим без пропусков поверхность изделия, 2) пропускание через металлическое изделие мощного импульса электрического тока, 3) индукционный нагрев скрытых металлических слоев в структурах металл-неметалл, 4) мощный объемный СВЧ-нагрев В частности, как показано в п 3 2 2, для поверхностного нагрева максимальное значение $C_m^{run} = L/l - 1$ (сравнить с формулой (3 69))

На практике оптимизация протокола ТК включает теоретический анализ различных вариантов нагрева и регистрации температуры с учетом технологических и других ограничений

Практическая оптимизация протокола нагрева. В принципе каждая отдельно взятая дефектная ситуация требует организации оптимального протокола нагрева

Особенности протокола нагрева показаны на рис 3 25 для одностороннего ТК Наивысший контраст обеспечивается квази-Дираковским импульсом нагрева ($\tau_h = 0,01$ с) При длинном нагреве ($\tau_h = 25$ с) максимальный контраст наступает при 7 с Если прекратить нагрев при 7 с, то контраст слегка возрастает, в то время как температура поверхности спадает Фактически задний фронт прямо-

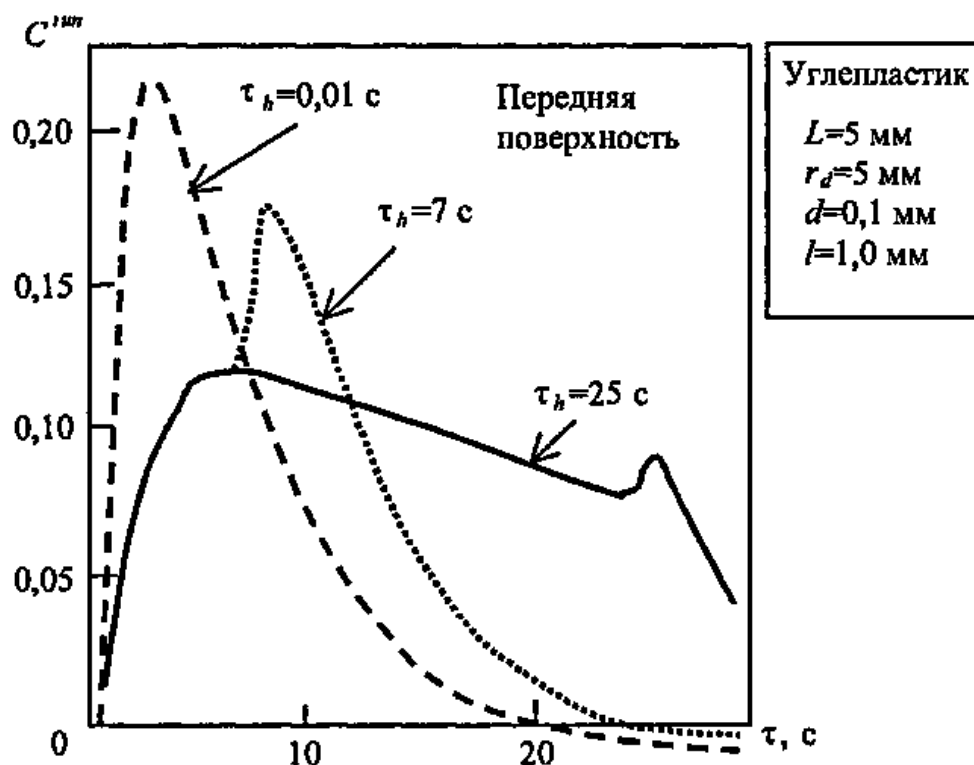


Рис. 3.25. Влияние длительности импульса нагрева на текущий температурный контраст

угольного импульса действует как импульс Дирака, поэтому кратковременный рост контраста отмечается всегда после прекращения действия прямоугольного импульса. При длительных временах наблюдения как температурный сигнал, так и контраст могут стать отрицательными вследствие более быстрого охлаждения слоя материала над дефектом (рис. 3.25).

Таким образом, требования к нагреву можно сформулировать следующим образом: 1) импульс нагрева должен быть достаточно коротким для создания необходимой амплитуды температурного контраста C (в случае оптического нагрева это также позволяет вывести точку наблюдения за пределы импульса, где отсутствует отраженное излучение); 2) полная энергия импульса должна быть достаточной для обеспечения необходимого сигнала ΔT ; 3) импульс должен быть не слишком мощным, чтобы не разрушить изделие за счет перегрева.

На практике могут иметь место другие факторы, влияющие на выбор прото-

кола нагрева: технические ограничения, помехи дефектоскопу со стороны нагревателя, требования техники безопасности и т.п.

С точки зрения теории оптимальной фильтрации максимальное отношение сигнал/шум для конкретного дефекта достигается, если форма импульса нагрева идентична временному отклику ΔT для данного дефекта. По крайней мере, теоретически возможно фильтровать экспериментальные данные в зависимости от предполагаемых типов дефектов и возможных глубин их залегания. Практические преимущества такого подхода не исследованы.

3.8.6. Материал изделия. Без учета помех, оптимальными для ТК являются материалы, создающие максимальный контраст температуры. С одной стороны, тепловая энергия не проникает глубоко в слаботеплопроводные материалы, с другой стороны, в высокотеплопроводных материалах сильна диффузия тепла вокруг дефектов. Теоретические расчеты задач

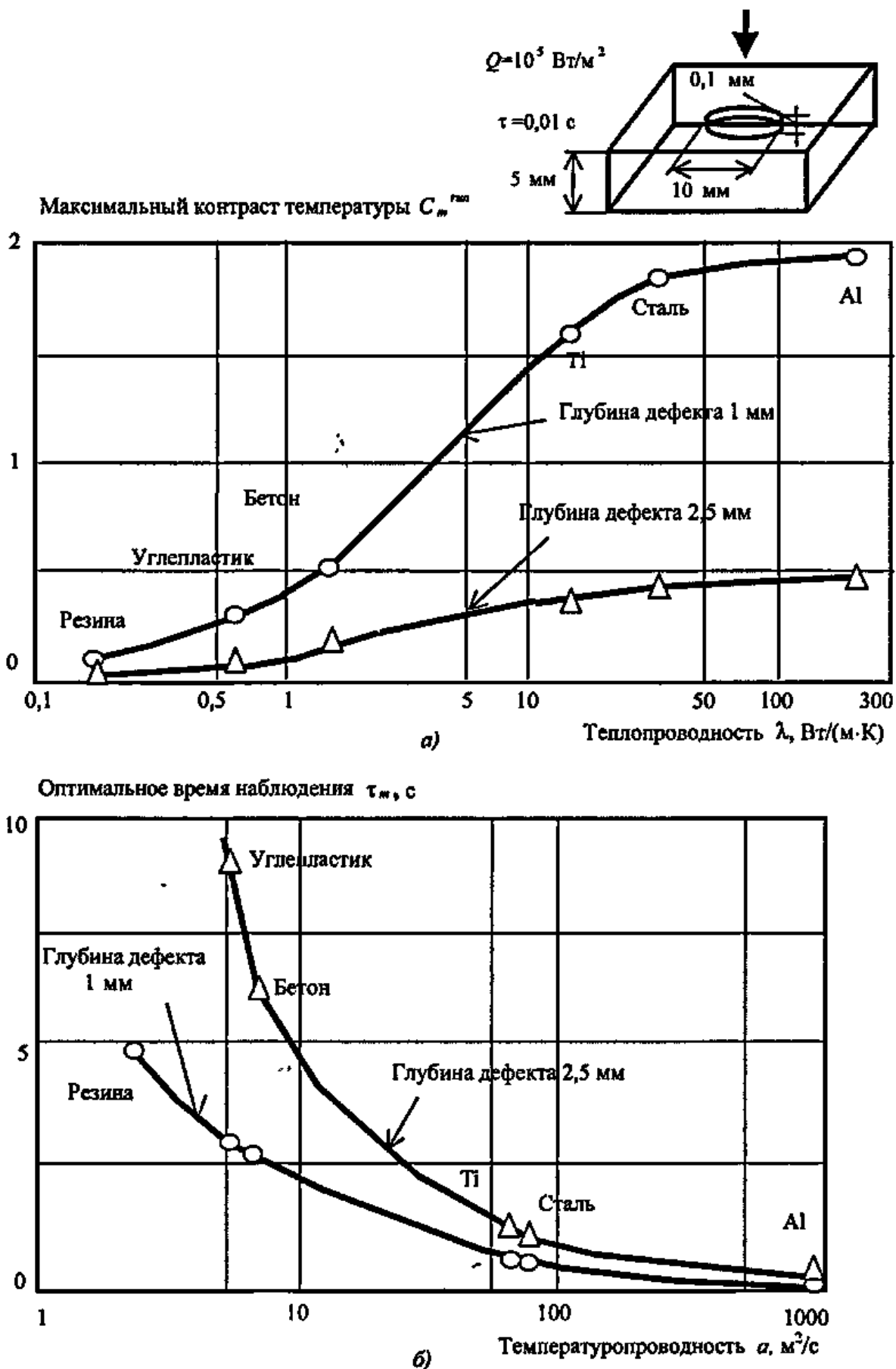


Рис. 3.26. Зависимости оптимальных параметров обнаружения от материала: а – максимальный температурный контраст в зависимости от теплопроводности; б – оптимальное время обнаружения в зависимости от температуропроводности

ТК показывают, что температурные контрасты в металлах выше, чем в немаetalлах, однако на практике металлы имеют больший уровень помех, что снижает отношение сигнал/шум. Время наблюдения дефектов должно находиться в пределах технических возможностей аппаратуры контроля. Например, зоны коррозии в тонких алюминиевых листах создают значительные температурные контрасты, которые существуют в течение коротких времен наблюдения (10–100 мс). При таких временах развития теплового процесса, применение обычных тепловизоров с частотой кадров до 30 Гц и последовательным считыванием сигнала приводит к искажению термограмм, поскольку температуры в различных точках одного и того же изображения регистрируются в различные моменты времени. Поэтому для обнаружения коррозии в тонких высокотеплопроводных материалах рекомендуется применять тепловизоры с матричными детекторами, размещенными в фокальной плоскости и работающими в режиме *одновременного считывания сигнала* (snap-shot mode). Кроме того, поверхность металлов, как правило, покрывают материалами с высоким коэффициентом излучения, что решает одновременно три задачи: 1) увеличение поглощенной энергии; 2) снижение случайных флуктуаций излучения по поверхности; 3) уменьшение отраженного излучения.

Влияние типа материала на оптимальные параметры обнаружения проиллюстрировано на рис. 3.26. Видно, что большие контрасты возникают в более теплопроводных материалах (рис. 3.26, а) при более коротких временах наблюдения (рис. 3.26, б). Эта тенденция сохраняется для различных глубин залегания дефектов, хотя ясно, что с ростом l интенсивность растекания тепла вокруг дефектов становится более существенной, и для определенных дефектов возможно существование "оптимального" материала, который обеспечит максимальное значение S .

3.8.7. Мощность нагрева и интенсивность поверхностного теплообмена. Как отмечалось выше, вследствие линейности классических задач теплопроводности как избыточная температура нагрева, так и температурный сигнал над дефектом, прямо пропорциональны поглощенной энергии W , или мощности Q , в то время как температурные контрасты (текущий и нормализованный) не зависят от $W(Q)$. Во многих случаях более интенсивный нагрев обеспечивает более качественные изображения дефектов за счет большего отношения сигнал/шум $s = \Delta T / \Delta T_{\text{рез}}$ или, в более общем случае, отношения сигнал/помеха $s = \Delta T / \Delta T_{\text{помех}}$, где $\Delta T_{\text{помех}}$ – эквивалентный сигнал помех различного рода, включая собственные шумы приемника излучения, которые определяют величину $\Delta T_{\text{рез}}$. Шум $\Delta T_{\text{рез}}$ является *аддитивным*, в то время как поверхностные шумы объектов контроля могут в первом приближении считаться *мультипликативными* (см. п. 3.7). Такими являются шумы, вызванные флуктуациями коэффициента излучения ϵ , который выступает в качестве сомножителя в соответствующем выражении для выходного сигнала дефектоскопа. В случае строго мультипликативных помех, контраст помехи во времени не изменяется, поэтому он может служить хорошей характеристикой конкретного материала. Однако, в общем случае, амплитуда помехи изменяется в ходе нагрева, в частности, из-за наличия отраженного излучения и других нелинейных эффектов.

Интенсивность поверхностного теплообмена описывается коэффициентами α^f на передней и α^R на задней поверхностях. Для тонких и/или высокотеплопроводных материалов, удовлетворяющих соотношению $Bi = \alpha L / \lambda < 0,1$, что приблизительно соответствует адиабатическим условиям, температурные контрасты слабо зависят от интенсивности теплоотдачи в широком диапазоне значений α . При ТК толстых и/или низкотеплопроводных ма-

териалов более интенсивная теплоотдача на передней поверхности снижает температурные контрасты на этой поверхности.

В двухсторонних процедурах сигналы от дефектов слабо зависят от α .

3.8.8. Анизотропия ТФХ. Учет анизотропии ТФХ может быть важным, прежде всего, при ТК волокнистых композитов, у которых теплопроводность вдоль волокон выше, чем в перпендикулярном направлении, а укладку отдельных слоев производят с поворотом волокон на некоторый угол. На рис. 3.27, а изображена пластина из углепластика, состоящая из 3-х слоев толщиной по 0,2 мм, ТФХ которых различны по координатам x и y . В центре каждого слоя находятся тонкие расслоения квадратной формы. Нагрев изделия производят оптическим импуль-

сом длительностью 10 мс. В момент времени 0,2 с прямоугольная форма дефектов прослеживается на термограмме передней поверхности достаточно хорошо, наибольшее искажение формы происходит для неглубокого дефекта в 1-м слое (рис. 3.27, б). С увеличением времени наблюдения до 1 с дефектные зоны сглаживаются и имеют овальную форму, причем форма температурного отпечатка от дефекта в 1-м слое становится резко вытянутой в направлении оси x ввиду того, что теплопроводность углепластика по этой координате в 10 раз выше теплопроводности по координате y (рис. 3.27, в).

Формы температурных отпечатков для других дефектов также претерпевают искажения, обусловленные влиянием анизотропии вышележащих слоев.

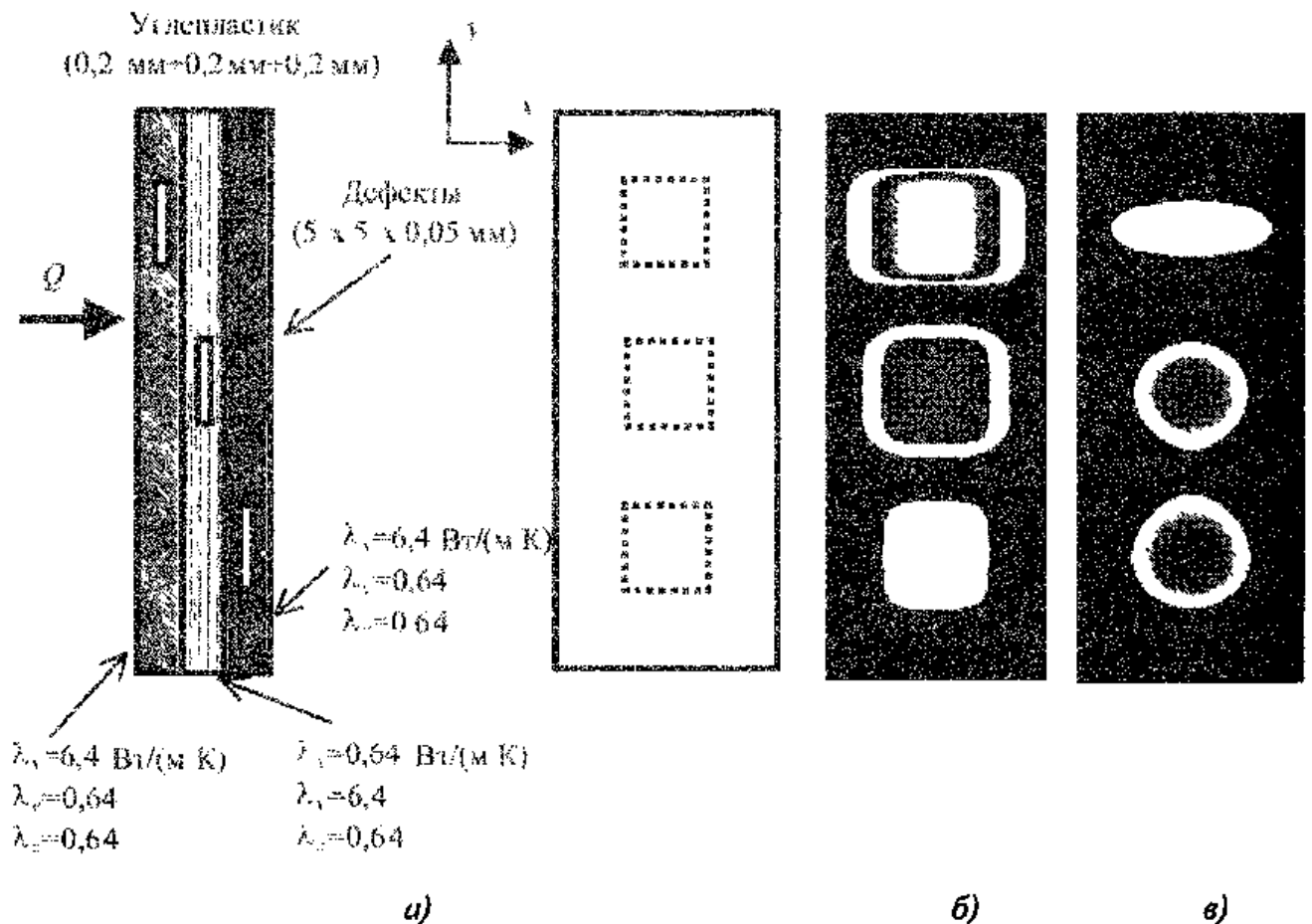


Рис. 3.27. Влияние анизотропии ТФХ на температурное распределение в пластине из углепластика с расслоениями после импульсного нагрева:

а – схема изделия, б – термограмма при 0,2 с (изотермическое представление), в – термограмма при 1 с (изотермическое представление)

3.8.9. Температурное поле в зоне трещины, расположенной перпендикулярно передней поверхности. Изделие из стали, содержащее два воздушных дефекта (рис. 3.28, а), нагревают полосовым источником в течение 0,5 с. Один из дефектов расположен на глубине 1 мм от передней поверхности, имитируя подповерхностную трещину с открытым устьем, второй дефект практически достигает передней поверхности (глубина залегания 10 мкм) и имитирует поверхностную трещину с закрытым устьем или трещину забитую краской, грязью и т.п. Трещины такого рода характерны, например, для турбинных лопаток [30]. Через 0,1 с после включения источника распределение поверхностной температуры связано только с полосовым нагревом (на левом краю изделия) и не содержит следов дефектов (рис. 3.28, б). Температурный профиль в этом случае имеет регулярный вид с понижением амплитуды слева направо. Начиная с определенного момента времени, зависящего от расстояния между зоной нагрева и трещинами, регулярный характер поля нарушается из-за того, что трещина препятствует распространению теплового потока слева направо и вглубь изделия (рис. 3.28, в). Вместе с тем, форма и амплитуда сигнала ΔT такова, что простой визуальный анализ термограммы рис. 3.28, б, в не обеспечивает надежного выявления обоих типов трещин. В работе [30] было предложено подчеркивать присутствие дефектов путем дифференцирования строчного температурного сигнала по пространственной координате, как это показано на рис. 3.28, г-ж. Изображение на рис. 3.28, г получено путем обработки термограммы рис. 3.28, в с помощью статистического фильтра локальной дисперсии (statistical local variance filter). Сигнал температурной производной показан на рис. 3.28, д, ж как результат обработки термограммы рис. 3.28, в с помощью фильтра Лапласа.

Отчетливое изображение обоих типов дефектов на рис. 3.28, г-ж обусловле-

но крутым спадом температуры через трещину. Отметим, что амплитуда сигнала для трещины с открытым устьем приблизительно в три раза превышает сигнал над трещиной с закрытым устьем. На практике, качество соответствующих изображений ухудшается по сравнению с расчетными результатами в силу того факта, что операция дифференцирования увеличивает вклад высокочастотных шумов и тем самым снижает отношение сигнал/шум.

Качество исходной термограммы можно повысить путем: 1) локализации поверхностного нагрева; 2) перемещения поверхностного источника с постоянной скоростью и регистрации температуры на определенном расстоянии от него; 3) нагревом торца изделия для перехода от поверхностного к объемному нагреву.

3.8.10. Выявление близкорасположенных дефектов. Проблему взаимного влияния дефектов на поверхностное распределение температуры рассматривают в двух аспектах: 1) близкое расположение дефектов в плоскости наблюдения ставит задачу о пространственном разрешении теплового метода аналогично тому, как это имеет место в оптике; 2) дефекты, расположенные ближе к контролируемой поверхности, могут затенять дефекты, расположенные глубже за ними. Обе задачи решают, используя численные методы.

Пространственное разрешение ТК. Задача состоит в обеспечении условий контроля, которые позволят различить два близко расположенных дефекта. Как и в оптике, для этого изготавливают специальные образцы, подобные оптическим мирам, с канавочными дефектами различной ширины, находящимися на различных расстояниях друг от друга. Очевидно, что для данного стандартного образца улучшить пространственное разрешение можно оптимальным выбором процедуры и условий контроля.

Данная проблема проиллюстрирована на примере ТК образцов из углепластика и алюминия, в которых на глубине 0,5 мм

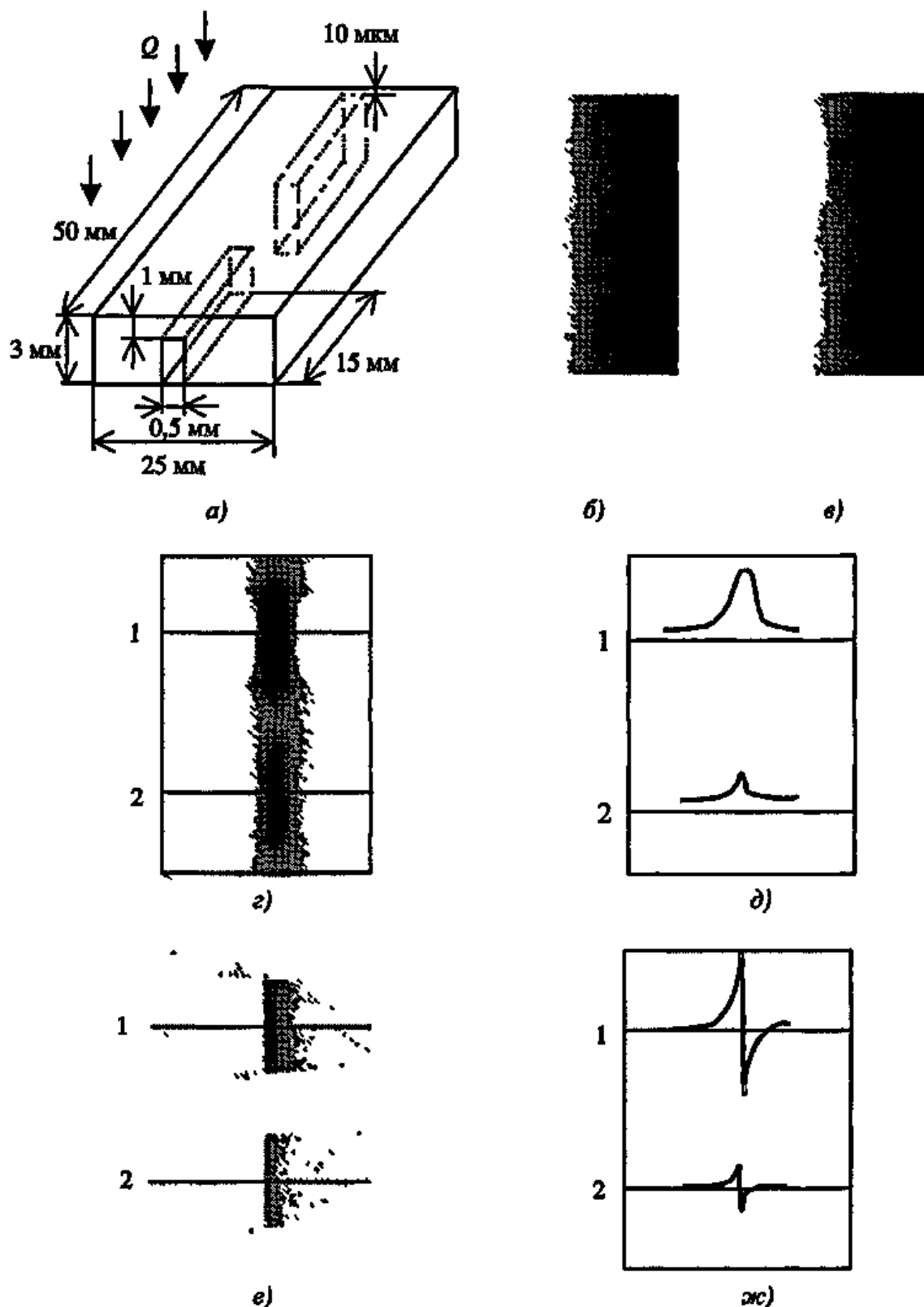


Рис. 3.28. Выявление трещины, расположенной перпендикулярно передней поверхности, при полосовом нагреве образца из стали марки AISI 1010 в течение 0,5 с ($\lambda = 63,9 \text{ Вт/(м К)}$, $\alpha = 18,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, программа ThermoCalc-3D)
a – схема изделия, *б* – температурное поле при 0,1 с, *в* – температурное поле при 2 с, *г* – то же, что *в* после обработки статистическим фильтром (инверсное изображение), *д* – то же, что *в* после обработки статистическим фильтром Лапласа, *е* – профили температуры для изображения *г*; *ж* – профили температуры для изображения *д*

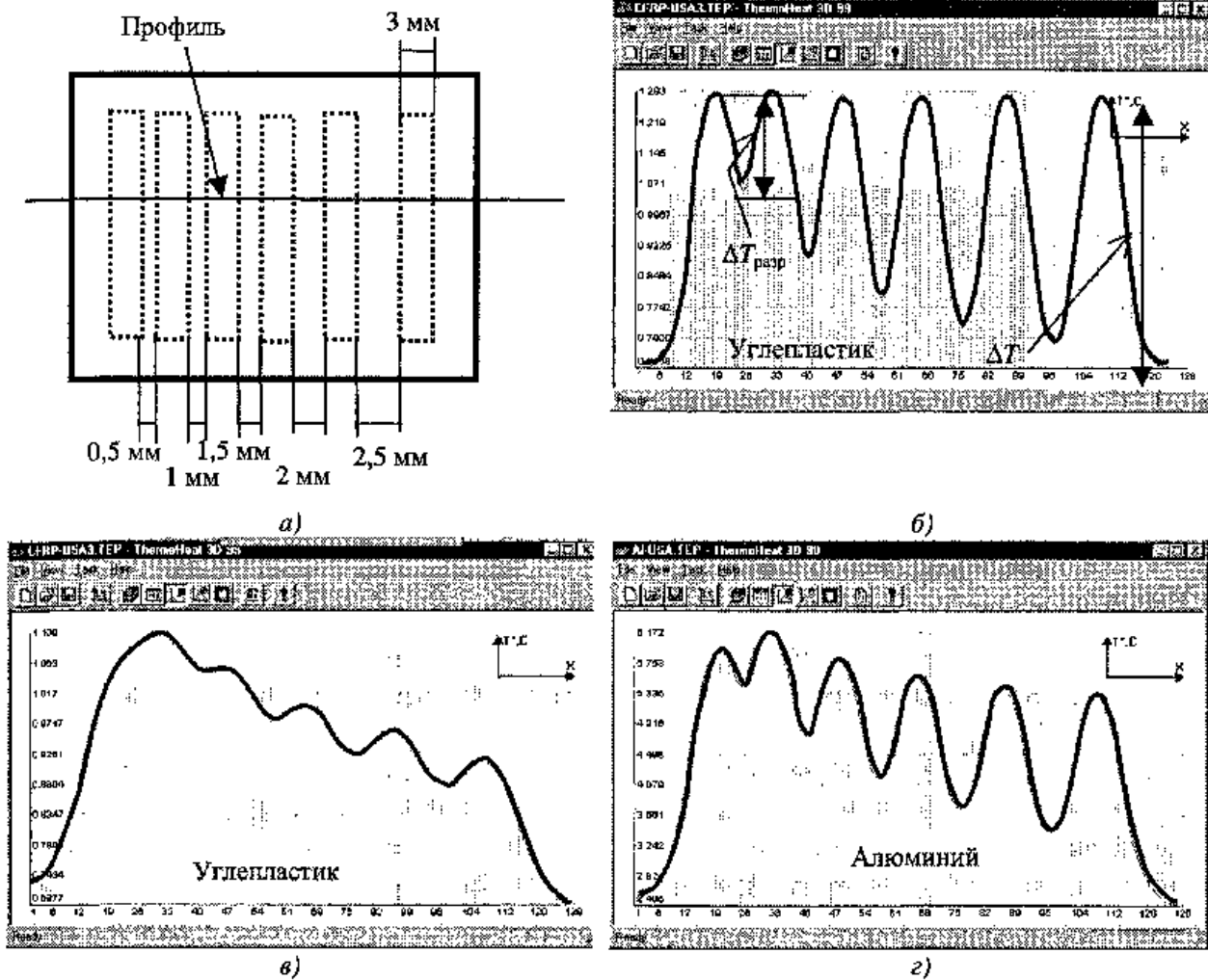


Рис. 3.29. Пространственное разрешение дефектов в ТК

(поперечные размеры дефектов 3×25 мм, глубина залегания 0,5 мм, толщина дефектов 0,5 мм):
 а – схема дефектов; б – углепластик ($L = 5$ мм, $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64$ Вт/(м · К),
 $Q = 10^5$ Вт/м², $\tau_h = 1$ с); в – углепластик ($L = 5$ мм, $\lambda_x = 6,4$ Вт/(м · К), $Q = 10^5$ Вт/м², $\tau_h = 1$ с);
 з – алюминий ($L = 2$ мм, $Q = 10^6$ Вт/м², $\tau_h = 0,03$ с)

расположены 6 дефектов (схема рис. 3.29, а). Для углепластика рассмотрены 2 варианта: 1) изотропный материал ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64$ Вт/(м · К)); 2) анизотропный материал ($\lambda_y = \lambda_z = 0,64$ Вт/(м · К)). Мерой пространственного разрешения выбрано отношение температурного сигнала $\Delta T_{разр}$ от двух близкорасположенных дефектов к максимально возможному сигналу ΔT , который имеет место для одиночного дефекта (см. рис. 3.29, б). Примем, что два близкорасположенных дефекта будут уверенно обнаружены, если $\Delta T_{разр} \geq 0,1 \Delta T$. Тогда в изотропном углепластике для момента наблюдения 1 с пространственное разрешение будет лучше 0,5 мм, что соот-

ветствует расстоянию между первыми двумя дефектами слева (рис. 3.29, б). В анизотропном углепластике, благодаря возросшей диффузии тепла в направлении оси X пространственное разрешение ухудшается до 2,5 мм (расстояние между правыми крайними дефектами на рис. 3.29, в). Соответственно, в алюминии для момента наблюдения 0,03 с пространственное разрешение равно 0,5 мм (рис. 3.29, з). Очевидно, что пространственное разрешение теплового метода ухудшается с увеличением времени наблюдения и ростом глубины дефектов.

Профили на рис. 3.29 также иллюстрируют тот факт, что несколько близко-

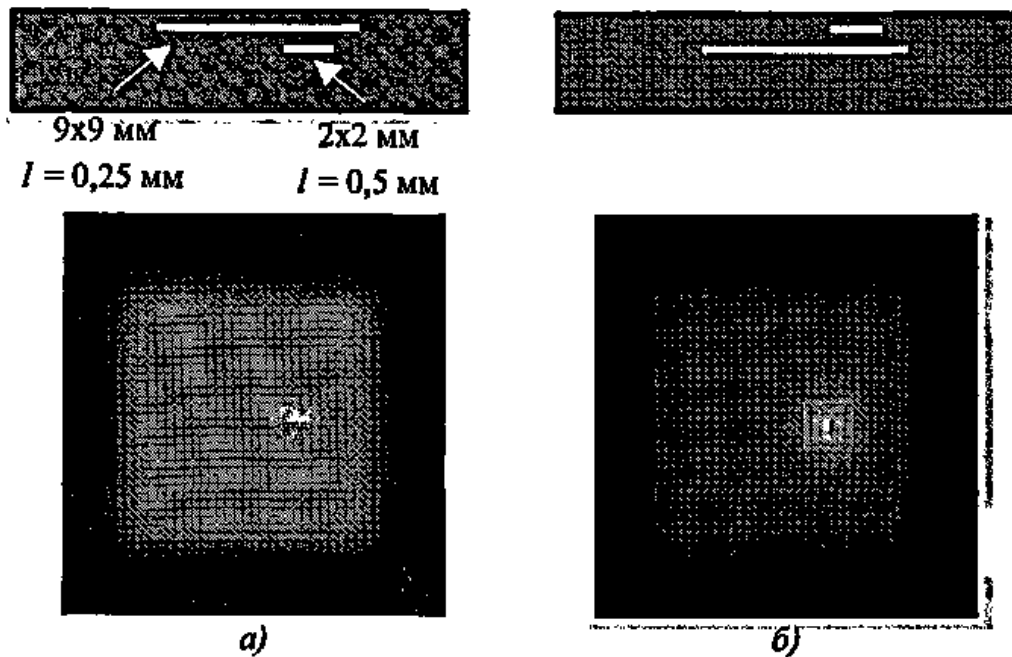


Рис. 3.30. Затенение одного дефекта другим.
(Углепластик; $L = 5$ мм; $l = 1$ мм; $d = 0,1$ мм; $Q = 10^5$ Вт/м²; $\tau_s = 0,01$ с; $\tau = 0,5$ с)

расположенных дефектов повышают среднюю температуру изделия в зоне их нахождения, и при недостаточном пространственном и/или температурном разрешении тепловизора множественные дефекты могут регистрироваться как один большой дефект.

Ситуация "дефект под дефектом". Анализ этой ситуации, впервые выполненный группой А. Бендада с соавторами [31], показал, что суммарное температурное распределение $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau)$ над группой малоразмерных дефектов может быть представлено как суперпозиция сигналов от каждого дефекта: $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau) = \sum \Delta T_i(x, y, \tau)$, причем суммирование производят как в пространстве, так и во времени. В ряде случаев идентификация дефектов возможна визуально. Например, в 1-м случае на рис. 3.30, а более глубокий малый дефект "просвечивает" сквозь большой дефект. Тем не менее, дефектометрия в таких случаях затруднительна, поскольку сигналы зачастую находятся на уровне шума. Строго говоря, сигнал от двух тонких дефектов, расположенных один под другим, ведет себя слегка иным образом, нежели сигнал от одного дефекта

двойной толщины, однако экспериментально возможность разделения таких дефектов не была продемонстрирована. Что касается второго случая на рис. 3.30, б, то оба дефекта могут быть оценены количественно, за исключением части большого дефекта, затененной малым дефектом.

3.9. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ. ПРИМЕРЫ

Выше отмечалось, что одной из основных целей теоретического анализа является оптимизация параметров экспериментальных процедур. В оптимальной процедуре испытаний дефект должен создать максимальное значение выбранного информативного параметра в определенный момент времени. В табл. 3.7–3.9 описаны 3 конкретных примера тепловых испытаний, которые иллюстрируют многие из вышеописанных особенностей ТК. Наряду с оптимальными параметрами обнаружения дефектов приводится максимальная избыточная температура нагреваемой поверхности в конце нагрева (для принятых значений поглощенной мощности).

В углепластике поперечные размеры практических дефектов слабо влияют на значения ΔT и S , по крайней мере, в тон-

3.7. Оптимальные параметры обнаружения воздушных дефектов в композиционном материале

(углепластик: $a = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,64 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

воздух: $a = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$)

Толщина изделия L , мм	Глубина дефекта l , мм	Радиус дефекта r_d , мм	Толщина дефекта d , мм	Максимальный контраст C_m^{run}	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{run})$, с
<i>Кратковременный нагрев ($\tau_b = 0,01 \text{ с}$; $T_{\max} \approx 11,3 \text{ }^\circ\text{C}$ для $Q = 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$)</i>					
1	0,25	5	0,05	0,50	0,27
			0,10	0,84	0,36
		10	0,05	0,50	0,27
			0,10	0,84	0,36
	0,50	5	0,05	0,22	0,50
			0,10	0,36	0,57
		10	0,05	0,22	0,50
			0,10	0,36	0,57
	0,75	5	0,05	0,077	0,69
			0,10	0,13	0,83
		10	0,05	0,077	0,69
			0,10	0,13	0,83
2	0,50	5	0,05	0,28	0,77
			0,10	0,49	1,00
		10	0,05	0,28	0,77
			0,10	0,50	1,01
	1,00	5	0,05	0,13	1,73
			0,10	0,22	1,92
		10	0,05	0,13	1,73
			0,10	0,22	1,94
	1,50	5	0,05	0,042	2,45
			0,10	0,076	2,69
		10	0,05	0,042	2,46
			0,10	0,077	2,72
5	1,25	5	0,05	0,12	3,40
			0,10	0,22	3,85
		10	0,05	0,12	3,62
			0,10	0,22	4,00
	2,50	5	0,05	0,047	8,70
			0,10	0,086	9,10
		10	0,05	0,054	9,70
			0,10	0,10	10,3
	3,75	5	0,05	0,014	12,54
			0,10	0,026	12,98
		10	0,05	0,018	14,13
			0,10	0,034	14,75

3.8. Оптимальные параметры обнаружения коррозии в стали
(сталь $\alpha = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 32 \text{ Вт}/(\text{м К})$)

Толщина изделия L , мм	Унос материала, %	Радиус дефекта r_d , мм	Максимальный температурный контраст $C_m^{\text{гип}}$	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{\text{гип}})$, с
<i>Кратковременный нагрев ($\tau_h = 0,01 \text{ с}$, $T_{\text{max}} \approx 8,4 \text{ }^\circ\text{C}$ для $Q = 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$)*</i>				
1	90	5	8,79	0,11
		10	8,89	0,15
		20	8,89	0,15
	50	5	0,99	0,14
		10	1,00	0,19
		20	1,00	0,19
	10	5	0,11	0,16
		10	0,11	0,22
		20	0,11	0,23
5	90	5	4,56	0,61
		10	4,78	1,23
		20	8,51	2,05
	50	5	0,58	1,06
		10	0,89	1,57
		20	0,99	2,51
	10	5	0,055	1,49
		10	0,097	1,97
		20	0,11	2,96
10	90	5	2,24	0,86
		10	4,68	2,42
		20	7,52	4,73
	50	5	0,24	3,14
		10	0,58	4,26
		20	0,89	6,25
	10	5	0,017	4,70
		10	0,053	5,51
		20	0,093	7,82
<i>Длительный нагрев ($\tau_h = 5 \text{ с}$)</i>				
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

Продолжение табл. 3.8

Толщина изделия L , мм	Унос материала, %	Радиус дефекта r_d , мм	Максимальный температурный контраст C_m^{run}	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{run})$, с
<i>Нагрев гармоническими тепловыми волнами**</i>				
10	90 ($f = 4$ Гц)	5	8,60	0,26
		10	8,78	0,26
		20	8,78	0,26
	50 ($f = 0,14$ Гц)	5	0,19	7,34
		10	0,50	7,59
		20	0,72	14,69
	10 ($f = 0,1$ Гц)	5	0,013	10,43
		10	0,043	10,93
		20	0,073	11,26

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

**Квазиоптимальная частота для обнаружения конкретного дефекта.

3.9. Оптимальные параметры обнаружения коррозионного уноса материала в алюминии (Al : $a = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 210 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$)

Толщина изделия L , мм	Унос материала, %	Радиус дефекта r_d , мм	Максимальный температурный контраст C_m^{run}	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{run})$, с
<i>Кратковременный нагрев ($\tau_h = 0,01$ с)</i>				
1 ($T_{max} \approx 5,57 \text{ }^\circ\text{C}$ для $Q = 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$)	90	5	8,27	0,02
		10	8,88	0,03
		20	8,91	0,04
	50	5	0,91	0,02
		10	0,99	0,04
		20	1,00	0,05
	10	5	0,10	0,03
		10	0,11	0,04
		20	0,11	0,06
2 ($T_{max} \approx 4,54 \text{ }^\circ\text{C}$ для $Q = 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$)	90	5	7,48	0,03
		10	8,78	0,05
		20	8,91	0,07
	50	5	0,83	0,04
		10	0,98	0,06
		20	1,00	0,09
	10	5	0,088	0,04
		10	0,108	0,07
		20	0,110	0,10

3.10. Оптимальные параметры обнаружения протяженных воздушных дефектов в различных материалах при кратковременном и длительном нагревах

L, мм	Нагрев	Оптимальные параметры обнаружения							
		Al		Сталь		Бетон		Углепластик	
		C_m (τ_m, c)	$\Delta T_m, ^\circ C$ (τ_m, c)	C_m (τ_m, c)	$\Delta T_m, ^\circ C$ (τ_m, c)	C_m (τ_m, c)	$\Delta T_m, ^\circ C$ (τ_m, c)	C_m (τ_m, c)	$\Delta T_m, ^\circ C$ (τ_m, c)
1	$\tau_h = 0,01 c$ $Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2$	8,7 (0,015)	3,60 (0,012)	7,8 (0,06)	1,9 (0,04)	2,80 (0,20)	2,80 (0,08)	1,65 (0,13)	3,70 (0,05)
	$\tau_h = 100 c$ $Q = 10^4 \text{ Вт/м}^2$	7,73 (0,05)	25,1 (98)	5,9 (0,15)	18,5 (100)	1,91 (0,4)	24,8 (80)	1,10 (0,36)	24,5 (50)
5	$\tau_h = 0,01 c$ $Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2$	8,7 (0,3)	0,72 (0,2)	7,8 (1,5)	0,38 (0,6)	2,72 (5)	0,56 (1,2)	1,61 (3,1)	0,73 (1,1)
	$\tau_h = 100 c$ $Q = 10^4 \text{ Вт/м}^2$	7,62 (1,2)	54,1 (75)	5,96 (6)	54,0 (100)	1,85 (10)	52,2 (55)	1,05 (8)	49,7 (50)
50	$\tau_h = 0,01 c$ $Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2$	8,8 (18)	0,072 (10)	7,14 * (80)	0,035* (25)	2,1 (200)	0,049 (100)	1,28 (130)	0,06 (90)
	$\tau_h = 100 c$ $Q = 10^4 \text{ Вт/м}^2$	7,99 (111)	65,7 (101)	7,35 (200)	36,0 (120)	2,21 (320)	48,4 (160)	1,30 (250)	57,1 (150)

*Приближенные значения

Примечание. Глубина залегания дефекта $l = 10\% L$, толщина дефекта $d = 10\% L$

ТФХ материалов Al — $\lambda = 210 \text{ Вт/(м К)}$, $a = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, сталь $\lambda = 32 \text{ Вт/(м К)}$, $a = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, углепластик $\lambda = 0,64 \text{ Вт/(м К)}$, $a = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, бетон $\lambda = 1,5 \text{ Вт/(м К)}$, $a = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; воздух $\lambda = 0,07 \text{ Вт/(м К)}$, $a = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент теплообмена на обеих поверхности: $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, программа Multilayer-3

ких изделиях (табл 3 7) Оптимальное время наблюдения, в основном, определяется глубиной залегания дефектов, тогда как температурные контрасты зависят как от глубины, так и от толщины дефектов

При выявлении коррозии на задней поверхности изделий из стали и алюминия (табл 3 8 и 3 9) глубина дефекта и его

толщина выражаются уносом материала, однако процедуры ТК сохраняют свои классические особенности поперечные размеры дефектов влияют главным образом на температурные контрасты, но не на оптимальные времена наблюдения Данные табл 3 8 также доказывают, что все три распространенных метода ТК (им-

пульсный, ступенчатый и гармонический нагрев) обеспечивают близкие значения параметров обнаружения, что является отражением общности физических принципов ТК

Следует заметить, что данные табл. 3 7 и 3 8 (кратковременный нагрев) хорошо описываются формулой инверсии (2 41), которая может быть также выражена через текущий контраст

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{C^{min}}{1 + C^{min}}, \quad C^{min} = \frac{\Delta L / L}{1 - \Delta L / L} \quad (3 70)$$

В выражениях (3 70) отсутствуют ТФХ объекта контроля, что делает данный подход весьма общим. Для трех значений уноса материала (90 %, 50 % и 10 %), представленных в табл. 3 8 и 3 9, соответствующие значения текущего контраста равны 9, 1 и 0,11 соответственно, что близко к табличным значениям, полученным численным методом.

В табл. 3 10 приведены сравнительные оптимальные параметры обнаружения протяженных (одномерных) воздушных дефектов в различных материалах при кратковременном и длительном нагревах. Данные таблицы могут быть использованы для ориентировочного прогнозирования возможностей ТК материалов с различной теплопроводностью.

3.10. РАЗВИТЫЕ МОДЕЛИ ТК

Все модели ТК, приведенные выше, можно считать *классическими* в том смысле, что особенности пространственного распределения и временного развития сигнала ΔT в зависимости от параметров этих моделей изучены достаточно хорошо, и многие из них практически используются в алгоритмах дефектометрии (см. главу 4). Дальнейшее углубление теоретических моделей связано 1) со специфическими задачами, в которых действуют другие факторы, влияющие на обнаружение дефектов (например, движение влаги в почве и ее испарение на поверхности могут существенно изменять величину ΔT над ми-

нами), 2) с анализом тонких эффектов, которые не играют решающей роли для обнаружения, но сказываются на физическом механизме контроля (например, анизотропия композитов приводит к искажению формы ΔT на поверхности), 3) с объединением чисто тепловых эффектов в объекте контроля с особенностями термографической регистрации температуры (например, связь угла зрения ИК-системы с индикатриссой коэффициента излучения), и т.п.

Для учета вышеперечисленных факторов в последнее время разрабатывают так называемые *развитые* (advanced) модели ТК, в которых анализируют следующие феномены:

- произвольную зависимость плотности потока нагрева от времени и координат $Q(x, y, z, \tau)$,
- анизотропию ТФХ изделия и изменение ТФХ во времени,
- фазовые превращения и массообмен в объекте контроля,
- шероховатость нагреваемой поверхности,
- конвективную и радиационную теплоотдачу как функцию времени,
- зависимость коэффициента излучения от состояния объекта и угла зрения тепловизора.

Анализ развитой модели ТК рассмотрен ниже на примере обнаружения противотанковых и волехотных мин в грунте (см. рис. 3 33). Номенклатура таких мин весьма широка, однако в теоретических моделях чаще всего их имитируют однородным диском, расположенным в почве на глубинах от 1 до 15 см. Почва нагревается солнечным излучением, суточный ход которого моделируют функцией (2 66) $Q(\tau) = Q_0[1 - \cos(\omega\tau)]$, где циклическая частота связана с суточным изменением солнечной освещенности ($\omega = 2\pi/24$ ч).

Большинство исследователей полагают, что обнаружение мины с помощью тепловизора возможно благодаря локальному возмущению ТФХ почвы, которое

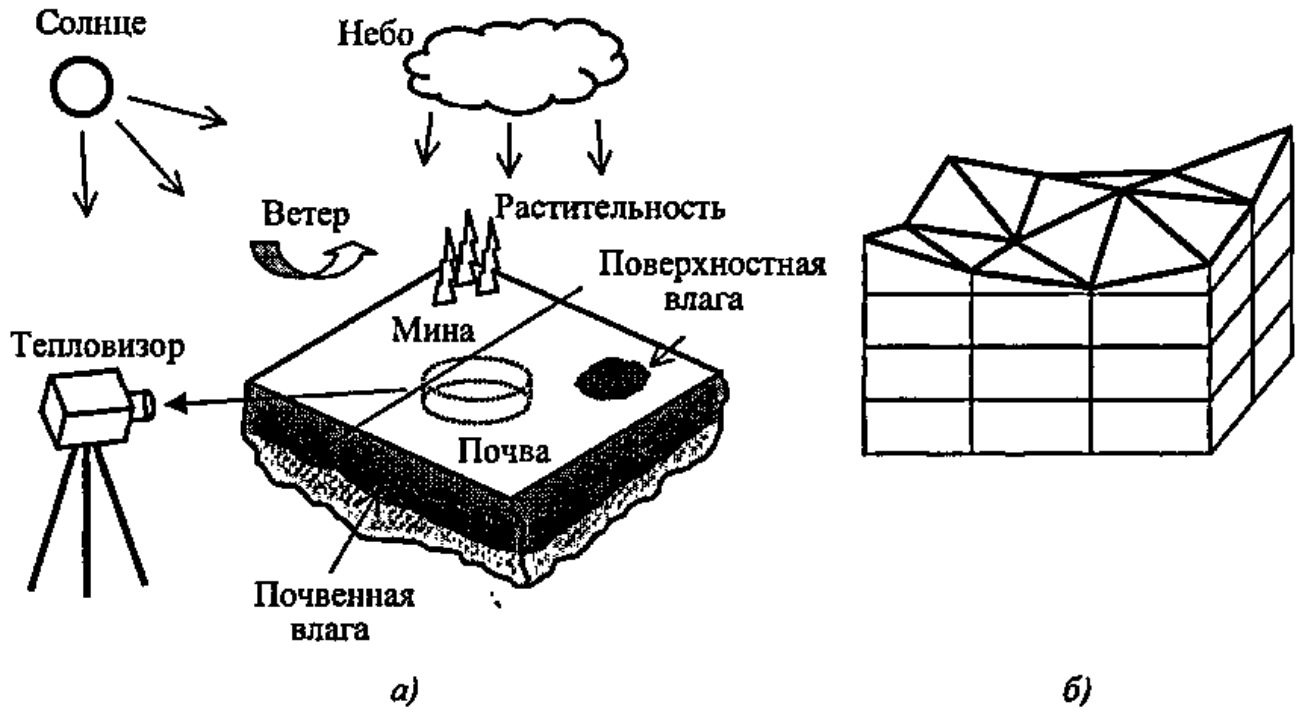


Рис. 3.31. Модель ТК мины, заглубленных в почве:
 а - схема контроля и граничные условия на поверхности почвы; б - дискретизация пространственной сетки на поверхности (моделирование шероховатости)

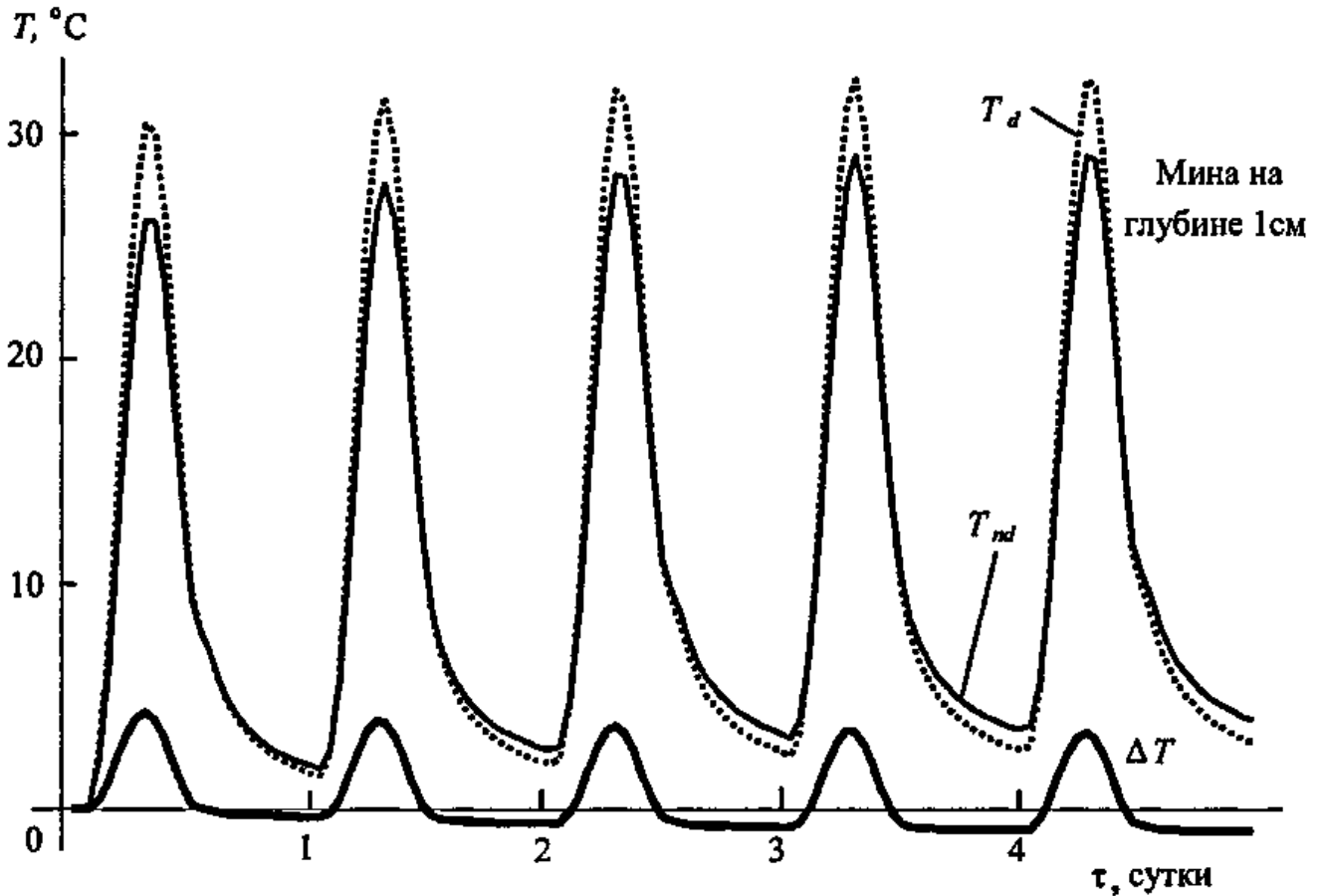


Рис. 3.32. Изменение температурных сигналов при обнаружении дискообразной безоболочочной мины в почве на глубине 1 см ($Q_m = 500 \text{ Вт/м}^2$; $r_d = 10 \text{ см}$; $d = 10 \text{ см}$; $l = 1 \text{ см}$; ТФХ почвы и тринитротолуола см. в табл. 2.2)

3.11. Оптимальные параметры обнаружения мин в грунте
(классическая модель; безоболочная мина из тринитротолуола;
ТФХ материалов см. в табл. 2.2)

Параметры модели				Оптимальные параметры обнаружения*	
Материал	Диаметр мины, см	Толщина мины, см	Глубина залегания, см	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}^{**}$	$\tau_m, \text{ч}^{***}$
Почва	5	1	1	+1,0	0***
			5	+0,2	+1,0
			10	+0,03	+2,0
		10	1	+1,5	+0,5
			5	+0,3	+1,25
			10	+0,05	+2,5
	20	1	1	+2,6	0
			5	+1,1	+1,25
			10	+0,4	+2,75
		10	1	+4,4	+0,75
			5	+1,8	+2,0
			10	+0,6	+3,5
Песок сухой	5	1	1	+0,33	+2,8
			5	+0,034	+5,0
			10	+0,0023	+7,2
		10	1	+0,60	+3,6
			5	+0,061	+5,6
			10	+0,0046	+8,2
	20	1	1	-0,54	-1
			5	+0,58	+5,3
			10	-0,15	+1
			5	+0,13	+7,8
			10	-0,036	+3,5
			10	+0,023	+14
		10	1	-1,36	+0,3
			5	+0,84	+7
			10	-0,41	+2,3
			5	+0,21	+12,5
			10	-0,10	+5,0
			10	+0,053	+21,3
Песок влажный	20	10	1	+8,68	+1
			5	-0,92	+11,5
			10	+2,69	+3,3
			10	+0,75	+6,3

* В ряде случаев в таблице приведены температурные сигналы обоих знаков (в частности для сухого песка, имеющего ТФХ, близкие к тринитротолуолу), возникающие в течение суток.

** Знаки + и - означают, что зона над дефектом соответственно теплее или холоднее окружающих участков.

*** Знаки + и - означают, что время максимального сигнала наступает соответственно позже или раньше максимума солнечного излучения.

**** С точностью до шага расчета.

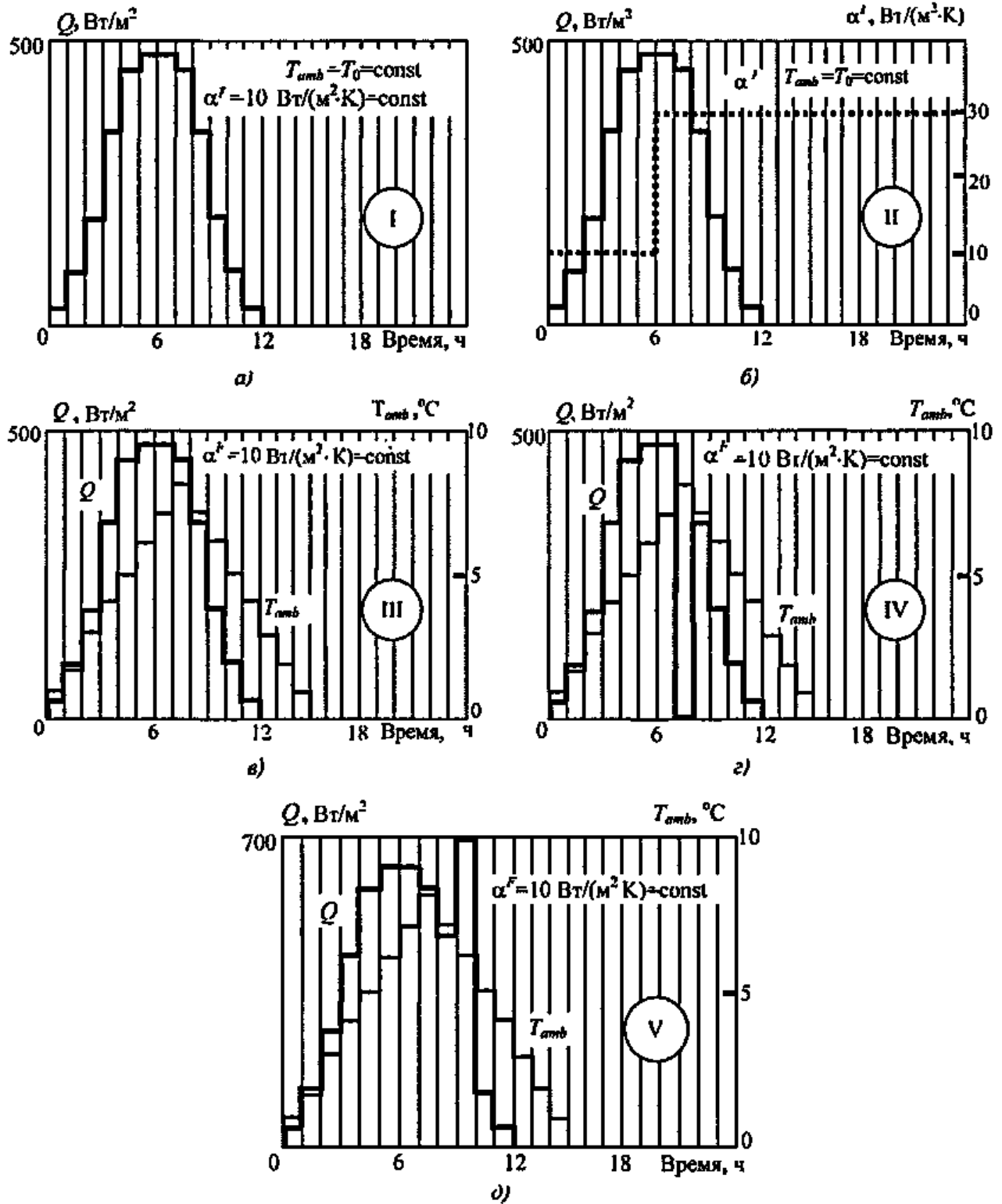


Рис. 3.33. Профили нагрева при обнаружении мин в почве:

а – нагрев лучистым потоком (солнечная инсоляция в безоблачный день; максимум инсоляции в 12-00 ч дня); *б* – моделирование возрастания скорости ветра, начиная с 12-00 ч; *в* – совместный нагрев лучистым потоком и изменяющейся температурой среды; *г* – совместный нагрев лучистым потоком и изменяющейся температурой среды (солнце за облаками: лучистый поток равен нулю с 13-00 до 14-00 ч); *д* – совместный нагрев лучистым потоком и изменяющейся температурой среды (включение дополнительного источника: лучистый поток увеличен на 500 Вт/м² с 15-00 до 16-00 ч)

3.12. Результаты численного моделирования ситуаций, возникающих при обнаружении мин в почве
(диаметр мины 20 см; толщина 10 см; ТФХ почвы и тринитротолуола см. в табл. 2.2; профили нагрева см. на рис. 3.33; программа ThermoHeat-3D Pro)

Ситуация	Оптимальные параметры обнаружения			
	Глубина залегания 5 см		Глубина залегания 10 см	
	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	$\tau_m, \text{ч}^*$ (сдвиг относительно максимума солнечной инсоляции при 12-00 ч)	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	$\tau_m, \text{ч}^*$ (сдвиг относительно максимума солнечной инсоляции при 12-00 ч)
I-рис. 3.33, а	4,26	1	1,61	2
II-рис. 3.33, б	3,92	0	1,20	0
III-рис. 3.33, в	4,55	1	1,58	2
IV-рис. 3.33, г	4,2	0	1,21	1
V-рис. 3.33, д	4,8	4	1,64	5

*С точностью до шага расчета по времени, равного 15 мин.

возникает при внесении мины в почву. Это доказывается четко фиксируемым в экспериментах суточным ходом ΔT , что хорошо согласуется с простейшей моделью ТК. Однако, термографический контраст в месте расположения мины зависит не только от температуры, но и от изменения коэффициента излучения почвы, обусловленного ее разрыхлением и изменением влажности. Дополнительным фактором является наличие растительности, которая затеняет истинную температуру поверхности почвы.

3.10.1. Классическая модель обнаружения мин в грунте. Пусть требуется обнаружить в почве противопехотные безоболочные мины на основе тринитротолуола. Классическая двумерная модель ТК в цилиндрических координатах позволяет получить зависимости сигнала ΔT от времени, глубины залегания, размеров мины, ТФХ и неровностей почвы (см. рис. 3.31 и табл. 3.11). Вследствие более низкой интегральной теплопроводности тринитротолуола по сравнению с типичными почвами, в дневное время над миной

имеет место локальное повышение температуры, т.е. $\Delta T > 0$, достигая почти $\Delta T_m \sim 5 ^\circ\text{C}$ в середине дня (рис. 3.32). Для неглубоко залегающих мин в ночное время может иметь место инверсия ΔT , когда участок почвы над миной характеризуется пониженной температурой. Как следует из табл. 3.11, в простейшей модели обнаружения мин наиболее сильным фактором, влияющим на ΔT , является глубина залегания мины l .

3.10.2. Развитая модель ТК (на примере обнаружения заглубленных мин). Пусть безоболочная мина из тринитротолуола диаметром 20 см находится в почве на двух глубинах: 1 и 5 см. Различные виды типов и профилей нагрева изображены на рис. 3.33. Отсчет времени ведется от 6-00 ч утра (соответствует 0 ч на рис. 3.33); максимум солнечной инсоляции приходится на 12-00 ч дня. Для численного анализа использована программа ThermoHeat-3DPro (фирма "Инновация", Россия), в которой все параметры модели можно задавать в табличной фор-

ме как функцию времени. Результаты моделирования приведены в табл 3 12

Профиль I моделирует нагрев косинусоидальным импульсом, который проанализирован в предыдущем параграфе (полная поглощенная энергия в течение 12 часов равна 3 кВтч/м^2). Сравнивая данные табл 3 11 и табл 3 12 видно, что оптимальные параметры обнаружения весьма близки (различия объясняются отклонениями ступенчатого профиля нагрева от гладкого и тем, что в программе Thermo-Heat-3DPro возможно моделировать дефекты прямоугольной формы в отличие от дискообразных дефектов в программе ThermoCalc-2D)

Влияние ветра. В рамках принятой модели изменение скорости ветра может быть сведено к изменениям коэффициента теплообмена $\alpha(\tau)$. Пример временного *профиля II* коэффициента теплообмена изображен на рис 3 33, б смоделировано увеличение интенсивности теплоотдачи, начиная с 12-00 ч, с 10 до $30 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что, согласно формуле (2 7), может быть следствием увеличения скорости ветра с 2 до 11 м/с. Очевидно, что усиление теплоотдачи с поверхности снижает сигнал от заглубленных мин. В особенности, этот эффект характерен для мины, расположенной на глубине 5 см, поскольку увеличение α произошло в период ее оптимального проявления.

Совместный нагрев солнечным излучением и средой. До сих пор мы рассматривали нагрев объекта контроля тепловым потоком мощностью Q , причем начальная температура T_0 была равна температуре окружающей среды T_{amb} , а граничное условие имело вид уравнения (3 43)

$$\frac{\partial T_1(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_1} + \frac{\alpha^F}{\lambda_1} T_1(z=0, \tau)$$

Нетрудно показать, что если температура среды изменяется, то это эквивалентно поступлению дополнительной энергии, которая будет нагревать тело,

если $T_{amb} > T_0$ и охлаждать его, если $T_{amb} < T_0$. В частности, при тепловом обнаружении мин температура воздуха подвержена суточным колебаниям, а солнечный поток существенно зависит от облачности. В таком случае следует рассматривать произвольную функцию нагрева солнцем и средой в виде

$$\frac{\partial T_1(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_1} - \frac{\alpha^F}{\lambda_1} \times T_{amb}(\tau) + \frac{\alpha^F}{\lambda_1} T_1(z=0, \tau) \quad (3 71)$$

Профиль III моделирует такой комбинированный способ нагрева, причем рост температуры среды T_{amb} происходит относительно начального момента, за который принято 6-00 ч утра. Поскольку даже в момент максимальной температуры среды (рост на 8°C в период с 13-00 до 14-00) эквивалентный дополнительный поток равен только $\alpha^F T_{amb} = 80 \text{ Вт/м}^2$, т.е. существенно меньше основного лучистого потока, приращение температурного сигнала вследствие дополнительного подогрева окружающей средой незначительно (см табл 3 12).

Уход солнца за облака. Пример суточной функции нагрева, моделирующей кратковременный уход солнца за облака (с 13-00 до 14-00 ч), показан на рис 3 33, а (*профиль IV*). Из данных табл 3 12 видно, что даже столь существенный спад инсоляции слабо влияет на температурные сигналы над заглубленными минами, поскольку основная мощность этих сигналов обусловлена солнечной энергией, поглощенной в течение первой половины дня.

Нагрев с помощью дополнительного источника. В рамках модели с произвольным нагревом возможен анализ возможности улучшения выявляемости мин путем использования искусственного источника нагрева. Функция нагрева для этого случая изображена на рис 3 33, в (*профиль V*), мощность лучистого потока с

15-00 до 16-00 ч увеличена на 500 Вт/м^2). Как и следовало ожидать, улучшение выявляемости заглубленного объекта наступает спустя некоторое время после включения источника, что в рассмотренном случае приводит к возрастанию временной задержки. Величина стимулированного ΔT зависит от мощности источника и в случае профиля V возрастает на 3 ... 5 %. Очевидно, что столь малое повышение сигнала связано с неоптимальным временем включения дополнительного источника, использование которого более эффективно при малых ΔT .

Неровности почвы. При обнаружении температурных отпечатков заглубленных мин существенную помощь оператору в идентификации мины оказывает ее правильная геометрическая форма, которая в идеальном случае однородного фона может искажаться только, если тепловизор визирует поверхность под углом, отличным от нормального (рис. 3.31, а). Однако в реальных ситуациях неровности почвы изменяют как глубину залегания дефекта, так и количество поглощаемой энергии, причем последняя изменяется по мере перемещения солнца по небосклону; например, многочисленные впадины сопоставимых с миной размеров создают на термограммах многочисленные температурные сигналы, которые могут быть интерпретированы как сигналы от мин. Численное моделирование произвольной шероховатости почвы с помощью метода конечных элементов описано И. Сендуrom и Б. Бартлейном [32] (см. рис. 3.31, б).

Влажность почвы. Влияние изменяющейся влажности почвы на выявляемость заглубленных в почву предметов существенно, но не изучено исчерпывающим образом, поскольку зависит от комбинации нескольких факторов, которые могут действовать на ΔT противоположным образом, а именно: 1) как правило, осадки имеют температуру ниже температуры поверхности почвы, что приводит к снижению и выравниванию температуры

поверхности после их выпадения; 2) наличие в почве влаги изменяет ее ТФХ; 3) испарение влаги на поверхности почвы изменяет баланс тепловых потоков; 4) влажная почва изменяет свой коэффициент поглощения (излучения).

Приблизительно можно считать, что в первые моменты времени после начала дождя, температура поверхностного слоя почвы становится близкой к температуре выпавшей воды, и температурные отпечатки заглубленных предметов полностью "смазываются".

Во многих случаях наличие влаги увеличивает *теплопроводность* пористой среды, тогда как зависимость *температуропроводности* почвы от влажности может иметь выраженный экстремум. Влияние влажности почвы на величину температурных контрастов зависит от того, как она влияет на отношение ТФХ заглубленного предмета и почвы. Так, для тринитротолуола во влажном песке температурный сигнал, по сравнению с сухим песком, изменяет знак (точнее, последовательность наступления сигналов обоих знаков), и возрастает по модулю в несколько раз благодаря существенному увеличению теплопроводности песка при его увлажнении (см. табл. 3.11).

Испарение влаги на поверхности почвы снижает эффективный тепловой поток, уходящий вглубь почвы и обуславливающий формирование ΔT над заглубленным сигналом. Анализ нагрева влажного тела окружающей средой, выполненный А.В. Лыковым [5], показал, что в случае постоянной скорости испарения действие испарения эквивалентно снижению температуры среды на величину ΔT_{amb} , зависящую от давления, влажности и температуры среды. В рамках обсуждаемой модели ТК это означает введение в правую часть граничного условия (3.71) теплового потока испарения $Q_{evap} = \alpha^F \Delta T_{amb}$, который действует со знаком, обратным знаку основного потока нагрева Q . Величины ΔT_{amb} можно найти из психромет-

рических таблиц. Поверхностное испарение влаги тем сильнее снижает температурные сигналы над заглубленными объектами, чем меньше стимулирующий тепловой поток, ниже влажность воздуха и выше температура среды.

Влияние влажности на изменение ко-

эффициента излучения представляется эффектом второго порядка, поскольку действует сразу на большие участки почвы. Наконец, более тонкие эффекты связаны, например, с преимущественным накоплением влаги в слое почвы непосредственно над миной.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ (ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ)

Обратные задачи ТК дефектов можно свести к определению функции распределения ТФХ в изделии, например, функции $\lambda(x, y, z)$. В настоящей главе будет рассмотрена *идентификация* (retrieving, identification, inversion) размеров $\{h_x, h_y, d\}$ и глубины залегания $\{l\}$ внутренних дефектов путем решения обратной задачи:

$$\{h_x, h_y, d, l\} = \{T(x, y, \tau)\}^{-1}, \quad (4.1)$$

которая следует из более общей обратной задачи (2.33), если в качестве исходной информации рассматривать нестационарную поверхностную температуру $T(x, y, \tau)$.

Очевидно, что алгоритмы решения одномерных обратных задач позволяют восстановить только значения $\{d, l\}$, тогда как оценка поперечных размеров дефектов $\{h_x, h_y\}$ требует анализа пространственной диффузии тепла, т.е. решения многомерных задач теплопроводности.

Существует несколько способов построения алгоритмов идентификации дефектов. В главах 2 и 3 показано, что непосредственная инверсия прямых решений, как правило, невозможна. Достаточно корректные решения можно получить, рассматривая невязку функционала, образованного экспериментальными данными и соответствующим теоретическим решением, что приводит к необходимости отыскивать глобальный экстремум функционала в многомерном пространстве параметров ТК. На практике наиболее простые решения обратных задач ТК получают путем инверсии численных результатов решения прямых задач и их аппроксимации теми или иными формулами. При

этом решения прямых задач могут быть как аналитическими, так и численными. Вид функций инверсии зависит от фантазии исследователя, хотя ряд общих указаний можно почерпнуть из решений прямых задач. Численные коэффициенты в формулах инверсии получают, используя метод наименьших квадратов. Соответствующие опции имеются во многих стандартных математических пакетах, таких как Mathematica, MatLab и др.

4.1. ДЕФЕКТОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО ОТКЛИКА НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

4.1.1. Метод "кажущейся" тепловой инерции (нагрев импульсом Дирака). Метод "кажущейся" тепловой инерции, описанный в п. 3.2.4, основан на том, что тепловая инерция полуограниченного тела, подвергнутого импульсному тепловому воздействию, в любой момент времени может быть определена по формуле (2.35): $e = W / [T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*}]$. Аналогичная формула справедлива и для пластины, если $Fo < 0,1$.

В случае однородного тела тепловая инерция, определенная по (2.35), не зависит от времени, поэтому возможные отклонения экспериментального значения e от эталонного значения следует трактовать как наличие в теле областей с неоднородными ТФХ [6, 33–34].

Кривую изменения поверхностной температуры во времени строят в координатах " $\ln(T) - \ln(\tau)$ ". В идеальном случае однородного адиабатического полубесконечного тела это должна быть прямая ли-

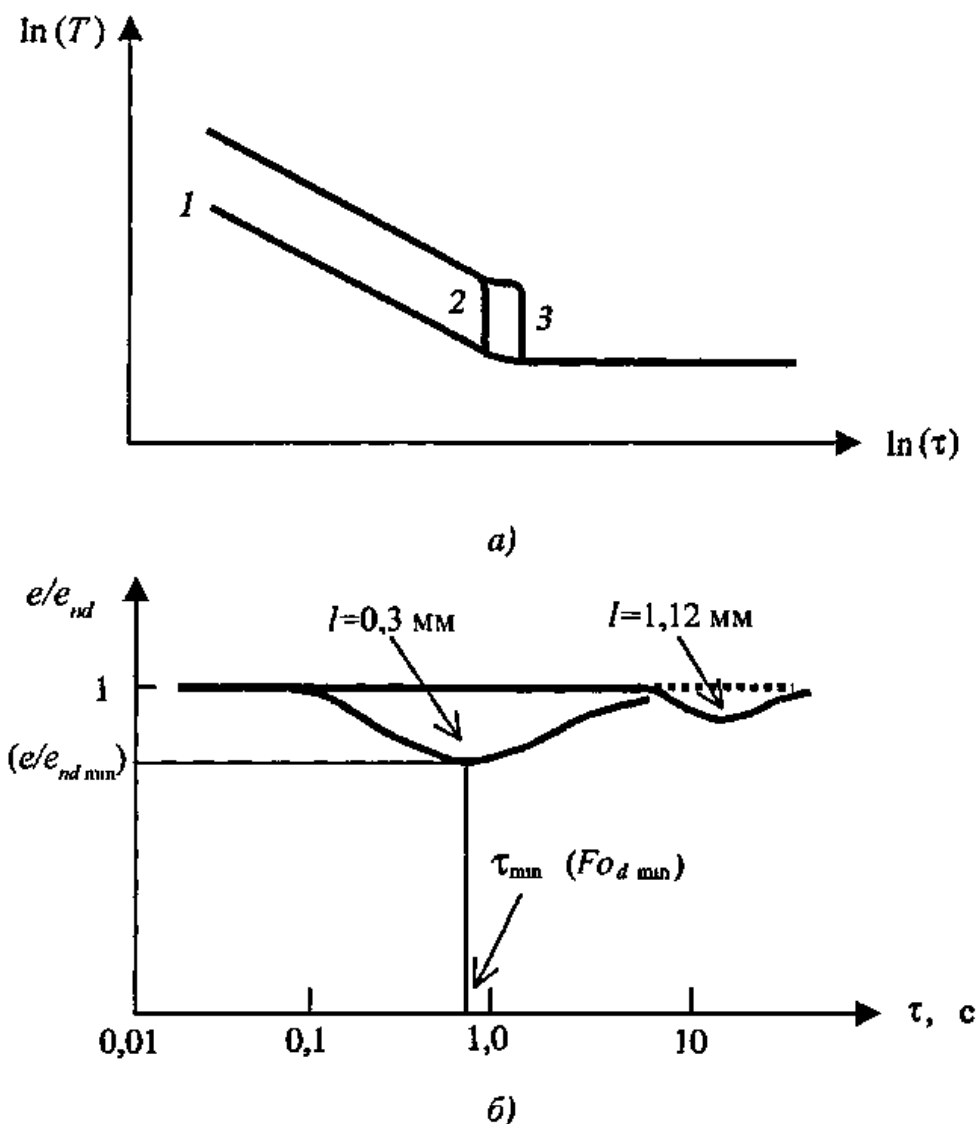


Рис. 4.1. Метод "кажущейся" тепловой инерции:

a – изменение поверхностной температуры изделия после импульсного нагрева (*1* – однослойное изделие, *2* – двухслойное изделие с идеальным тепловым контактом, *3* – двухслойное изделие с дефектом между слоями), *б* – изменение экспериментального значения тепловой инерции для изделия из углепластика с двумя фторопластовыми вставками размером $20 \times 20 \text{ мм}$

ния (кривая *1* на рис 4 1, *a*) На практике конечная длительность импульса, конечная толщина изделия и потери тепла в окружающую среду искажают прямолинейный вид температурной функции (см поведение кривой *1* на рис 4 1, *a* в конце процесса) Двухслойное изделие с идеальным тепловым контактом между слоями характеризуется кривой *2*, тогда как наличие внутреннего дефекта приводит к кривой *3* (рис 4 1, *a*)

С целью исключить влияние возмущающих факторов рассматривают бездефектную (эталонную) зону с тепловой

инерцией e_{nd} Тогда отношение текущего значения тепловой инерции к эталонному e/e_{nd} выражается прямой линией, параллельной оси времени везде, кроме дефектных участков Пример экспериментальных данных приведен на рис 4 1, *б* В полном соответствии с теорией, изложенной в главе 3, чем глубже дефект, тем позже возникает соответствующее искажение функции e/e_{nd} и тем меньше амплитуда этого искажения Дефект можно характеризовать двумя безразмерными параметрами $Bi_d = l/(\lambda R_d)$ и $Fo_d = \alpha t/l^2$ Каждому

дефекту с теплопроводностью ниже теплопроводности основного материала на кривой $e/e_{nd}(\tau)$ соответствует точка с координатами $Fo_{d\min}$ и $(e/e_{nd})_{\min}$, которые связаны с параметрами дефекта следующими формулами

$$\begin{aligned} (e/e_{nd})_{\min} &= Fo_{d\min}^{-0,528}, \\ Fo_{d\min} &= 1 + 0,62 Bi_d^{-1} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Формулы для определения глубины залегания и теплового сопротивления дефекта предложены в следующем виде

$$\begin{aligned} l &= \sqrt{\alpha \tau_{\min}} (e/e_{nd})_{\min}^{0,95}, \\ R_d &= (1,161/e_{nd}) \sqrt{\tau_{\min}} (e/e_{nd})_{\min}^{0,95} \times \\ &\times [(e/e_{nd})_{\min}^{-1,89} - 1] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Очевидно, что точка минимального значения $(e/e_{nd})_{\min}$ соответствует максимальному температурному сигналу ΔT_m в рамках теории, рассмотренной в главе 3, поэтому решение обратной задачи ТК в виде (4.3) может быть также получено для времени $\tau_{1/2}$ или других характерных времен теплопередачи

Описанный метод был использован для идентификации дефектов в углепластике. Погрешность метода оценена на уровне 20% по глубине залегания дефектов и 40% по их толщине [33–34]

Формулы (4.3) были уточнены Ж Крайз и Д Балажа [35], которые рекомендовали оценивать параметры дефектов по следующим простым формулам

$$l = \sqrt{a_z \tau_{\min}} C_{\min}^{inv}{}^{0,97}, \quad (4.4)$$

$$R_d = 0,0286 \frac{l}{\lambda_z} (C_m^{run})^{0,952 + 0,0362 [\log_{10} C_m^{run}]^2},$$

где инвертированный относительный контраст определен как $C^{inv} = T_{nd}/T_d$

Формулы (4.4) являются более общими, нежели (4.3), однако и они справедливы только для одномерных дефектов, да-

леко отстоящих от задней поверхности изделия

4.1.2. Использование ранних времен наблюдения. Термин "раннее время наблюдения" (early detection method) был предложен группой Д Балажа для определения момента времени, когда температурный сигнал $\Delta T(\tau)$ начинает превышать уровень шума (см также пп 1.3 и 5.2). Очевидно, что отношение сигнал/шум при этом ниже, чем в момент оптимального наблюдения, но форма скрытых дефектов воспроизводится более точно вследствие слабой объемной диффузии тепла. Кроме того, тепловое сопротивление (толщина) дефектов при ранних временах наблюдения практически не влияет на поверхностную температуру в дефектной зоне, поэтому метод раннего времени наблюдения пригоден для оценки глубины залегания дефектов [35]

$$l = \sqrt{a_z \tau(C^{run}) \ln(2/C^{run})}. \quad (4.5)$$

где $\tau(C^{run})$ – момент времени, когда регистрируют контраст C^{run} . Ошибка определения l по формуле (4.5) не превышает 4% для дефектов с высоким тепловым сопротивлением R_d . Точность инверсии тем выше, чем раньше регистрируют различие между дефектным сигналом и бездефектным уровнем. Фактически авторы предлагают применять формулу (4.5) для сигналов, величина которых начинает превышать уровень шума, в частности, рекомендуется выбирать $C^{run} \sim 1.3\%$

Для дефектов с низким значением R_d предложена другая формула инверсии

$$C^{run} = 200 \exp[-1/Fo^*] \left(1 - \frac{2Fo^*}{R^* + 2Fo^*} \right), \quad (4.6)$$

где $Fo^* = a_z \tau/l^2$, $R^* = R_d \lambda_z/l$. Поскольку выражение (4.6) содержит R^* в неявном виде, его следует использовать в итера-

тивном процессе совместно с формулой (4.4) для R_d . Наилучшая точность (~2%) была получена для низких значений контраста

4.1.3. Дефектометрия тонких теплопроводных образцов при импульсном нагреве. Ф. Делпеш и др. предложили следующую аппроксимацию температуры передней поверхности двухслойной пластины с резистивным дефектом в случае тонких теплопроводных изделий, нагреваемых импульсом Дирака [21]

$$T^F(\tau) = \beta_1 e^{-\beta_2 \tau} + \beta_3 e^{-\beta_4 \tau} \quad (4.7)$$

Вариационный анализ показал, что коэффициенты β_1 и β_2 , в основном определяемые первым корнем трансцендентного уравнения (2.51), слабо зависят от параметров внутренних дефектов, причем параметр β_2 связан с интенсивностью теплоотдачи α . Коэффициенты β_3 и β_4 , определяемые вторым корнем трансцендентного уравнения, связаны соответственно с глубиной залегания дефекта l и его тепловым сопротивлением R_d . Особенности итеративной оценки коэффициентов β в данном алгоритме описаны в п. 4.6

4.2. "ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ" ФУНКЦИИ ИНВЕРСИИ

В.П. Вавилов с соавторами предложили способ решения обратных задач ТК, основанный на аппроксимации набора численных решений прямых задач полиномиальными функциями [36]. Термин "индивидуальный" означает, что анализируют ограниченный круг материалов и процедур их испытаний (в идеальном случае, один материал и одну выбранную процедуру испытаний). Очевидно, что таким образом можно обеспечить наивысшую точность инверсии.

В частности, для идентификации параметров воздушных расслоений в углепластике толщиной 5 мм предложены следующие формулы инверсии

$$l = -0,005 + 0,177 \tau_m [s] + 0,00424 \tau_m^2,$$

$$d = 0,0162 \left[\frac{C_m^{norm}}{1 - \exp(-r_d/6)} \right]^{0,487} \times \left[\frac{\tau_m}{1 - \exp(-r_d/4)} \right]^{1,363}, \quad (4.8)$$

где l , r , d выражены в мм. В (4.8), в отличие от (4.3–4.6), использован не текущий, а *нормализованный* контраст C^{norm} (см табл. 1.1), максимум которого совпадает с максимумом ΔT . Использование C^{norm} обусловлено тем, что в импульсных процедурах ТК часто используют операцию *нормализации* экспериментальных данных, которая позволяет снизить влияние неравномерности нагрева (см п. 5.11).

Для изделий из углепластика погрешность инверсии составляет ~5% по l и ~25% по d , тем не менее ограниченность формул (4.8) очевидна. Кроме того, в выражение для толщины расслоений введены их поперечные размеры, которые должны быть оценены дополнительно. Тем не менее, для расслоений в углепластике, представляющих практический интерес ($h > 10$ мм), экспоненциальным членом можно пренебречь, придав, таким образом, к одномерному случаю

4.3. ОБОБЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ИНВЕРСИИ

В программе ThermidgePro (фирма "Инновация", Россия) формулы инверсии предложены для объектов контроля, нагреваемых прямоугольным импульсом произвольной длительности. Вид формул зависит от используемого информативного параметра, а также от того, внутри или за импульсом нагрева находится экстремум выбранного параметра.

Внутри импульса нагрева ($\tau \leq \tau_h$) для текущего контраста температуры

$$l [м] = 0,4066 (\alpha \tau_m)^{0,4885} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,1903} \times (L / \lambda)^{0,07884} Fo_h^{0,1208} C_{lum}^{-0,2869},$$

$$R_d [M^2 K B^{-1}] = 1,2390 (\alpha \tau_m)^{0,4043} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{-0,04380} (L / \lambda)^{0,1193} \times \\ \times FO_h^{-0,1681} C_{ин}^{0,2255},$$

для нормализованного контраста температуры

$$I [M] = 0,1694 (\alpha \tau_m)^{0,4937} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,3591} \times \\ \times (L / \lambda)^{0,2699} FO_h^{0,4137} C_{norm}^{-0,7348}, \quad (4.9)$$

$$R_d [M^2 K B^{-1}] = 1,9106 (\alpha \tau_m)^{0,4208} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,1341} (L / \lambda)^{0,2222} \times \\ \times FO_h^{-0,002878} C_{norm}^{-0,01405}$$

За импульсом нагрева ($\tau > \tau_h$) для текущего контраста температуры

$$I [M] = 0,7076 [\alpha (\tau_m - \tau_h)]^{0,4564} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,2849} (L / \lambda)^{0,05359} \times \\ \times FO_h^{0,05227} C_{ин}^{-0,1511},$$

$$R_d [M^2 K B^{-1}] = 4,3682 [\alpha (\tau_m - \tau_h)]^{0,3432} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{1,2647} (L / \lambda)^{0,2862} \times \\ \times FO_h^{-0,05300} C_{ин}^{0,4256},$$

для нормализованного контраста температуры

$$I [M] = 0,1694 (\alpha \tau_m)^{0,4937} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,3591} \times \\ \times (L / \lambda)^{0,2699} FO_h^{0,4137} C_{norm}^{-0,1269},$$

$$R_d [M^2 K B^{-1}] = 4,9209 [\alpha (\tau_m - \tau_h)]^{0,03140} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{1,3705} (L / \lambda)^{0,2961} \times \\ \times FO_h^{0,04242} C_{ин}^{0,4071}$$

В случае $\tau \leq \tau_h$ погрешность дефектометрии по I и R_d , как правило, не превышает 2–3 % для обоих параметров. Если экстремумы информативных параметров наступают после окончания нагрева ($\tau > \tau_h$), то погрешность определения I составляет 8 и 13 % соответственно для нормализованного и текущего контраста, для R_d погрешность в среднем составляет 36 и 60 % для указанных параметров.

Универсальность формул (4.9) состоит в том, что они справедливы для любых материалов и процедур импульсного ТК.

4.4. УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ИНВЕРСИИ

4.4.1. Определение глубины залегания и теплового сопротивления дефекта, расположенного между двумя высокотеплопроводными пластинами. Пусть дефект представляет собой резистивный слой, расположенный между двумя высокотеплопроводными пластинами толщиной l_1 и l_2 . Метод тепловых дефектометрии, предложенный в Управлении по авиации Франции (ONERA), основан на предположении, что в любой момент времени температура в каждой точке пластины одинакова вследствие высокой теплопроводности пластин, тогда как основной температурный градиент имеет место в дефектном слое [34]. Температура передней поверхности адиабатического изделия после воздействия импульса Дирака равна

$$T(z=0, \tau) = \frac{W}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \\ \times \left[1 + \frac{C_2 \rho_2 l_2}{C_1 \rho_1 l_1} \exp\left(-\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau\right) \right], \quad (4.10)$$

где $\frac{W}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} = T_\infty$ — температура изделия в конце тепловых процесса.

Для прямоугольного импульса длительностью τ_h решение получено с помощью интеграла Дюамеля

$$\frac{T(z=0, \tau)}{T_\infty} = \left\{ 1 + \frac{R_d}{\tau_h} \frac{(C_2 \rho_2 l_2)^2}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \right. \\ \times \left[\exp\left(\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h\right) - 1 \right] \times \\ \left. \times \exp\left(-\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R_d C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau\right) \right\} \quad (4.11)$$

В однородном материале

$$\frac{T(z=0, \tau)}{T_\infty} = \frac{R_d}{\tau_h} \frac{C\rho(L-l)^2}{L} \times \left[\exp\left(\frac{L}{R_d C\rho l(L-l)} \tau_h\right) - 1 \right] \times \exp\left(-\frac{L}{R_d C\rho l(L-l)} \tau\right) \quad (4.12)$$

Процедура определения R_d и l состоит в следующем. Функция изменения температуры во времени представляет собой уравнение прямой линии

$$\ln[T(z=0, \tau)/T_\infty] = \ln[T(z=0, \tau=0)/T_\infty] + p\tau$$

с наклоном

$$p = -\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \quad (4.13)$$

и начальным значением

$$\frac{T(z=0, \tau=0)}{T_\infty} = \frac{R_d}{\tau_h} \frac{(C_2 \rho_2 l_2)^2}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \left[\exp\left(\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h\right) - 1 \right] \quad (4.14)$$

Если

$$k = \exp\left(\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h\right) - 1, \quad (4.15)$$

то

$$\frac{T(z=0, \tau=0)}{T_\infty} \frac{p}{k} = \frac{C_2 \rho_2 l_2}{C_1 \rho_1 l_1} \frac{1}{\tau_h} \quad (4.16)$$

Два неизвестных параметра l_1 и R_d связаны следующими уравнениями

$$l_1 = \frac{L}{1 + \frac{C_1 \rho_1}{C_2 \rho_2} \frac{p \tau_h [T(z=0, \tau=0)/T_\infty]}{k}}, \quad (4.17)$$

$$R_d = \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{p C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2}$$

Если глубина дефекта известна, то его тепловое сопротивление находят из

второго уравнения, в противном случае необходимо итеративно решать систему из двух уравнений, причем параметры p и $T(z=0, \tau=0)/T_\infty$ должны быть определены из эксперимента. Обычно достаточно трех итераций, если начать со значения $l_1 = L/2$.

Решение для однородной пластины имеет вид

$$l = \frac{L}{1 + \frac{p \tau_h [T(z=0, \tau=0)/T_\infty]}{\exp\left(\frac{\tau_h}{R C \rho (1-l/L)}\right)}}, \quad (4.18)$$

$$R_d = \frac{1}{p C \rho l (1-l/L)}$$

Описанный метод был применен для оценки параметров клевого слоя между металлами и композитами [34]. Результатом процесса обработки были *глубинограммы* и *толщинограммы*. Погрешность тепловой дефектометрии составила 10...14% по l и 10...95% по R_d .

4.4.2. Определение глубины залегания дефекта по моменту его оптимального проявления. Если момент оптимального наблюдения $\tau_m(\Delta T_m) \gg \tau_h$, то приближенную оценку глубины залегания дефекта, свойства которого резко отличаются от свойств основного материала, можно получить путем инверсии формулы (2.43)

$$l = \sqrt{a \tau_m} \quad (4.19)$$

Формула (4.19) рекомендуется для оценки глубины залегания газонаполненных дефектов на глубинах значительно меньших полной толщины объекта контроля.

Если длительность нагрева соизмерима, но меньше τ_m , то реалистичные оценки можно получить по следующей формуле

$$l = \sqrt{a(\tau_m - \tau_h)} \quad (4.20)$$

4.4.3. Определение теплового сопротивления дефектов с использованием момента температуры нулевого порядка. Алгоритм предложен Д. Боше и др. на основе анализа задачи нагрева пластины, нагреваемой тепловым импульсом [37]. Моментом температуры нулевого порядка (zero-order temporal moment) на-

зван интеграл $M = \int_0^{\infty} T(\tau) d\tau$, который

стремится к бесконечности в адиабатическом процессе $\{T(\tau \rightarrow \infty) \rightarrow T_{\infty}\}$. При наличии в теле дефекта с тепловым сопротивлением R_d на глубине l , "бездефектную" температурную функцию $T(\tau)$ заменяют "дефектной" функцией $T_d(\tau)$, которая отклоняется от основной функции в течение некоторого периода времени (времени "видности" дефекта). Аналитически показано, что изменение момента

$$\Delta M = \int_0^{\infty} [T_d(\tau) - T_{nd}(\tau)] d\tau = W R_d (1 - l/L)^2, \quad (4.21)$$

где W – поглощенная энергия. Уравнение (4.21) содержит два неизвестных параметра R_d и l . В случае, когда $l \ll L$ (толстый образец или неглубокий дефект)

$$\Delta M = W R_d \quad (4.22)$$

Практическое использование (4.22) возможно путем последовательного сложения термограмм в последовательности, что также приводит к снижению уровня некоррелированных шумов в \sqrt{N} раз (N – число термограмм), однако необходимость измерять поглощенную энергию делает формулу (4.22) непрактичной.

4.5. ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ЛАПЛАСА

Как отмечалось выше, применение преобразования Лапласа является основным методом решения задач нагрева многослойных изделий. При этом решения

получают в громоздком, но явном виде. Тем не менее, инверсия "многослойных" решений в явном виде невозможна. А. Деджиованни и сотрудники предложили оказавшуюся весьма плодотворной идею определения параметров резистивных дефектов в пространстве Лапласа, т.е. без возвращения в пространство оригиналов (см. п. 3.1.2). Оказалось, что, поскольку соответствующие выражения в пространстве Лапласа (см. формулы (3.15)) являются алгебраическими, то они могут быть решены относительно искомого величин l и d (R_d).

Вид решений (3.15) подсказывает, что практическая процедура тепловой дефектометрии включает применение преобразования Лапласа к экспериментальным значениям нормализованных температурных сигналов $\Delta T/T_{\infty}$ (нормализацию проводят на стационарное значение температуры образца T_{∞} , считая его адиабатическим). Имея дело с двумя неизвестными параметрами дефектов, необходимо либо использовать решения для обеих поверхностей изделия, либо использовать решения для одной из поверхностей, но для двух моментов времени τ_1 и τ_2 , которые соответствуют двум значениям переменной Лапласа в пространстве изображений p_1 и p_2 . Известно, что система двух уравнений с двумя неизвестными имеет однозначное решение в случае линейной независимости уравнений. Авторы описываемого подхода установили, что, строго говоря, уравнения $\Delta \Theta^F(p_1)$ и $\Delta \Theta^F(p_2)$ не являются абсолютно независимыми, но это не мешает использовать их в процедуре дефектометрии.

4.5.1. Анализ температурной функции на задней поверхности. Установлено, что решение для задней поверхности пластины нечувствительно к параметру $x^* = l/L$ в середине пластины и обнаруживает слабую зависимость $\Delta \Theta^R(p)$ для других значений глубины дефекта, что также следует из приведенной в главе 3

зависимости $\Delta T^R(l)$ Аналитически переменную x^* можно исключить для особого случая $p_2^* = 4 p_1^*$, используя свойства гиперболических функций, что позволяет прийти к следующему выражению для определения теплового сопротивления дефекта

$$\frac{R_d}{L/\lambda} = \frac{M_1^2 [1 + \alpha_2 \operatorname{sh}(\alpha_2) M_2]}{[1 + M_1 \alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_1)]} \times \frac{\operatorname{sh}(\alpha_1) \operatorname{th}(\alpha_1)}{[-M_1 + M_2 \operatorname{ch}(\alpha_1)] - 1,5 M_1 M_2 \alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_2)}, \quad (4.23)$$

где $M_{1,2}$ — суть Лаплас-образы нормализованного экспериментального температурного сигнала $\Delta T^R/T_\infty$, индексы 1 и 2 относятся к двум выбранным моментам времени, $\alpha = \sqrt{p^*}$, $p^* = L^2 p/a$

Приведенные соображения подкрепляют ранее сделанный вывод о том, что двусторонняя процедура позволяет оценивать тепловое сопротивление (толщину) дефекта, но не его глубину залегания, это, в частности, делает невозможной двустороннюю тепловую томографию

4.5.2. Анализ температурной функции на передней поверхности. Основываясь на ранее полученных результатах, например, анализируя формулы инверсии (4.8), можно предсказать, что односторонняя процедура весьма чувствительна к глубине залегания дефектов и слабо чувствительна к их тепловому сопротивлению. Исключая R_d для p_1^* и $p_2^* = 4 p_1^*$, можно получить следующее трансцендентное уравнение для определения l

$$\alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_2) \operatorname{sh}(u_1) [4 \operatorname{ch}(u_1) \operatorname{ch}(\alpha_1 - u_1) - \operatorname{ch}(\alpha_1)] + 2 \operatorname{sh}(\alpha_1 - u_1) \left[\frac{1}{M_1} \operatorname{ch}^2(\alpha_1) - \frac{1}{M_2} \operatorname{ch}^2(\alpha_1 - u_1) \right] = 0, \quad (4.24)$$

где $u_1 = \alpha_1 l/L$. Для малых значений R_d последнее уравнение может быть записано в явном виде

$$l/L = 1 - \frac{1}{\alpha_1} \ln \left\{ \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/2} \operatorname{ch}(\alpha_1) + \left[\frac{M_2}{M_1} \operatorname{ch}^2(\alpha_1) - 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (4.25)$$

4.5.3. Покрытие на подложке: двусторонняя процедура ТК. Пусть ТФХ покрытия равны $l_1, C_1, \rho_1, \lambda_1$, подложки — $l_2, C_2, \rho_2, \lambda_2$. В одномерном приближении температурный сигнал между областью с покрытием (d) и без него (nd) определяют по выражению

$$\Delta T = T_d / \frac{W}{C_1 \rho_1 \lambda_1 + C_2 \rho_2 \lambda_2} - T_{nd} / \frac{W}{C_2 \rho_2 \lambda_2}. \quad (4.26)$$

Задачу идентификации решают, используя выражение для температуры на задней поверхности пластины. Следуя подходу, описанному выше, Лаплас-образ $\Delta \Theta^R$ функции ΔT^R имеет вид [18]

$$\Delta \Theta^R = \frac{l_2^2}{a_2} \Delta \Theta^{R*}, \quad (4.27)$$

$$\Delta \Theta^{R*} = \frac{1}{s} \left[\frac{1 + k_1 k_2}{k_2 \operatorname{sh}(k_1 s) \operatorname{ch}(s) + \operatorname{sh}(s) \operatorname{ch}(k_1 s)} - \frac{1}{\operatorname{sh}(s)} \right],$$

где

$$s = \sqrt{p^*}, \quad p^* = l_2^2 p/a_2, \quad k_1 = \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}},$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{C_1 \rho_1 \lambda_1}{C_2 \rho_2 \lambda_2}}$$

Фактически имеет место двухпараметрическая обратная задача $\Delta T^R(\tau, k_1, k_2)$, в которой функция $\Delta T^R(\tau)$ известна из эксперимента. Неизвестные параметры k_1 и k_2 могут быть определены в случае, если

коэффициенты чувствительности $x_1(\tau, k_1, k_2) = \partial \Delta T / \partial k_1$ и $x_2(\tau, k_1, k_2) = \partial \Delta T / \partial k_2$ являются линейно-независимыми

Поскольку анализ коэффициентов чувствительности k_1 и k_2 показал их сильную взаимозависимость, их оценка из эксперимента невозможна. Тем не менее, авторы предложили использовать ряд других искусственных коэффициентов, например, k_2 и $k_3 = k_1 k_2$, которые являются независимыми и, следовательно, могут быть определены в результате решения обратной задачи.

4.6. ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛА НЕВЯЗКИ (МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ)

4.6.1. Использование классических решений. При анализе экспериментальных данных функционал невязки определяют как разность двух цифровых последовательностей $\{T_i(\tau_i) - T_i(q_j, \tau_i)\}$ ($i=1 \dots N$), одна из которых является результатом эксперимента, а вторая следует из теоретической модели, зависящей от подлежащих определению параметров q_j ($j=1 \dots M$). Используя итеративный процесс приближения к глобальному минимуму в M -мерном пространстве параметров q_j , можно оценить их значения. Для ряда параметров ТК, например для толщины дефектов, глобальный минимум соответствующего функционала является достаточно "плоским", поэтому точность оценки таких параметров может быть низкой, а в некоторых случаях обратная задача может не иметь корректного решения. Очевидно, что метод минимизации функционала требует использования разумного нулевого приближения, является времяемким и может быть реализован с помощью относительно мощных компьютеров, особенно, если речь идет об обработке полноформатных изображений.

Используя в качестве базисных функций $T_i(q_j, \tau_i)$ классические решения теории теплопроводности, можно оценивать значения ТФХ материалов и параметры процесса теплообмена. Э. Гринцато и С. Маринетти применили такой подход, названный ими методом *нелинейной фильтрации* (non-linear filtration), для анализа процесса нагрева пластины известной толщины и теплопроводности [38]. В качестве теоретической модели были использованы решения задачи нагрева неадиабатической пластины и полуограниченного неадиабатического тела прямоугольным тепловым импульсом. Для минимизации среднеквадратических отклонений был применен метод Левенберга-Маркуорда (Levenberg-Marquardt), который хорошо проявил себя на практике и сейчас является стандартным приемом перемещения в пространстве признаков с использованием нелинейного метода наименьших квадратов.

В работе [38] искомым параметром при анализе двусторонней процедуры ТК пластины из углепластикового композита был коэффициент температуропроводности a , значение которого сравнивали с полученным по методу Паркера. Был сделан вывод о том, что точность определения a с помощью нелинейной фильтрации выше, чем при использовании других алгоритмов, главным образом, благодаря учету поверхностного теплообмена.

Была также продемонстрирована возможность оценки температуропроводности в односторонней процедуре, хотя сходимость итеративного процесса в этом случае была хуже и сам процесс расчета был более длительным.

На рис. 4.2 в качестве иллюстрации показано пространство двух параметров, по которым производили нелинейную фильтрацию коэффициента температуропроводности a и теплообмена α . Очевидно, что наиболее устойчивым и точным является анализ температуры на задней поверхности итеративный процесс, нача-

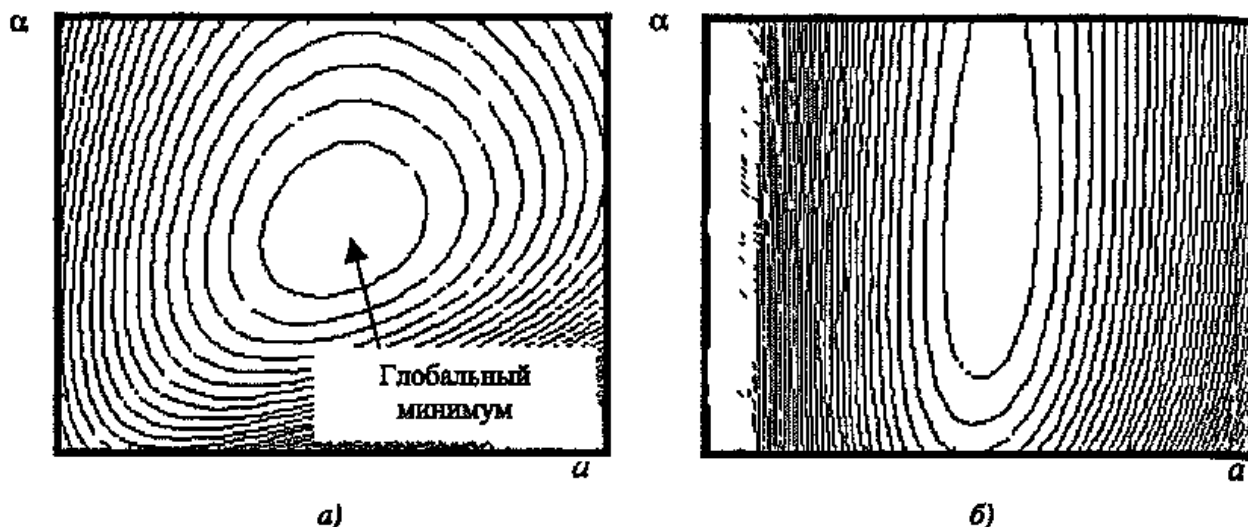


Рис. 4.2. Иллюстрация к методу нелинейной фильтрации с использованием классического решения задачи нагрева неадиабатической пластины на задней (а) и передней (б) поверхностях

тый с любой пары начальных значений $\{a, \alpha\}$ приводит к глобальному минимуму, который отчетливо виден на графике в виде центральной "впадины" (рис 4 2, а). В то же время на передней поверхности в силу того, что минимум имеет форму "каньона", возможен пропуск корректного значения a при перемещении в вертикальном направлении вдоль значений α (рис 4 2, б)

Используя решение для полуограниченного тела, в односторонней процедуре ТК одновременно определяли тепловую инерцию e и отношение поглощенной плотности мощности нагрева к коэффициенту теплоотдачи Q/α

Алгоритм нелинейной фильтрации оказался более устойчивым к высокочастотным шумам, чем полиномиальная аппроксимация и сглаживание данных с помощью стандартных фильтров

Сходный алгоритм идентификации был применен Ф Делпешем и др при дефектометрии тонких теплопроводных изделий, нагреваемых прямоугольным импульсом [21]. Использовано два метода идентификации согласно упрощенному решению (4 7), в котором два коэффициента (β_3 и β_4) связаны соответственно с глубиной залегания дефекта l_1 и его теп-

ловым сопротивлением R_d . Метод Левенберга-Маркварда, в принципе пригодный для оценки всех четырех коэффициентов β , в силу своей громоздкости был использован на практике лишь для отдельных точек. Более быстрым оказался метод анализа взвешенных временных интегралов, примененный к экспериментальным термограммам в случае адиабатической модели ($\beta_2 = 0$). Точность использования данной модели при дефектометрии двух стальных пластин толщиной 1 мм каждая и разделенных воздушным зазором толщиной 34 мкм составила 5 % [21]

Более сложную одномерную модель двухслойной пластины с резистивным дефектом использовали Ж Крапе и П Съело [39]. Моделировали равномерный нагрев пластины тепловым потоком, который проникал на определенную глубину согласно закону Ламберта-Бера. Аналитическое решение задачи $T_i(q, \tau_i)$ было получено с помощью функций Грина в весьма громоздком виде, тем не менее, инверсия данных занимала всего 20 с машинного времени. Такой подход может быть реализован также в рамках многомерных моделей ТК.

Метод нелинейной фильтрации в последнее время представляется наиболее

надежным при идентификации нескольких неизвестных параметров, если анализируемый процесс поддается корректному моделированию

4.6.2. Использование многомерных численных решений. В 1988 г Д В Куц, Д А Рапопорт и О Н Будадин применили метод минимизации функционала для анализа двумерных температурных функций, образованных в результате строчного сканирования изделия. Примечательно, что "прямолинейная" минимизация потребовала до 56 итераций и 168 мин процессорного времени на компьютере ЕС-1055, который по тем временам был одним из лучших в СССР [40]. Погрешность определения параметров дефектов была на уровне 20 %. С целью сократить вычисления, авторы проанализировали связи температурных сигналов с параметрами ожидаемых дефектов в конкретном материале, благодаря чему удалось сократить время вычислений до 3 .. 5 мин

Ж Крапе, П Съело и К Малдаг использовали двумерную цилиндрическую модель, подобную той, которая описана в п. 3.3.2 [41]. Входными экспериментальными параметрами были

- максимальный текущий контраст $C_{тк}^{гил}$,
- время "половины нарастания максимального сигнала" (half-rise time) $\tau_{1/2+}$, которое определяли на нарастающей ветви функции температурного сигнала над дефектом $\Delta T(\tau)$,
- время "половины спада максимального сигнала" (half-drop time) $\tau_{1/2-}$, которое определяли на спадающей ветви функции температурного сигнала над дефектом $\Delta T(\tau)$,
- видимый поперечный размер дефекта, определяемый по максимуму поверхностного градиента $\Delta T(r)$ (см п 4.7)

Выходными (определяемыми) параметрами были

- нормализованная глубина залегания дефекта,
- нормализованное тепловое сопротивление дефекта,
- поперечный размер дефекта,
- коэффициент теплообмена

Как и в случае одномерной модели, метод наименьших квадратов был применен в комбинации с методом Левенберга-Маркуорда. Данный алгоритм решения обратной задачи ТК обеспечил погрешность определения глубины залегания и поперечных размеров дефектов на уровне 10 %

Будучи примером вполне строгой реализации принципов решения многопараметрических обратных задач, описываемый подход может найти возрастающее применение, в особенности, благодаря лавинообразному увеличению мощности компьютеров

4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ

4.7.1. Использование пространственных профилей температуры. В отличие от глубины залегания и толщины поперечные размеры дефектов поддаются простой визуальной оценке по тем температурным отпечаткам, которые дефекты создают на контролируемой поверхности (в ТК речь, как правило, идет о дефектах значительной поперечной протяженности). Размещая на поверхности объекта маркер известных размеров, хорошо видимый в ИК-диапазоне, например полоску алюминиевой фольги, процесс определения h_x, h_y можно автоматизировать. В большинстве практических случаев ошибка простой визуальной оценки размеров дефектов не превышает 30 %. При автоматизации этого процесса, необходимо установить температурный порог принятия решения ΔT_{th} , амплитуда которого, как мы увидим ниже, существенно влияет на оценку h_x, h_y

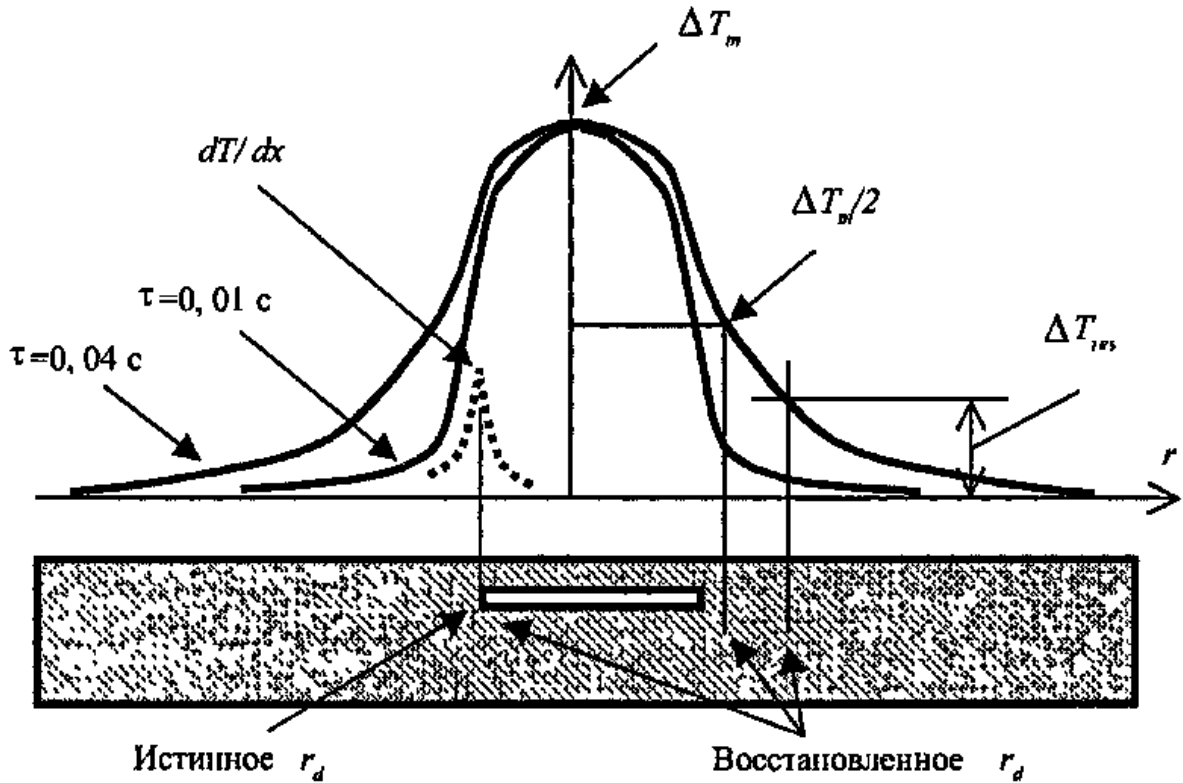


Рис 4.3. Нормализованные профили температуры над воздушным дефектом в алюминиевой пластине ($L = 2$ мм, $l = 0,5$ мм, $r_d = 0,2$ мм, $Q = 10^6$ Вт/м², $\tau_h = 0,01$ с)

Другая процедура, названная в англоязычной литературе Full Width Half Maximum – FWHM ("полная ширина на половине высоты"), предусматривает определение геометрических размеров дефекта по проекции точек, соответствующих половине максимального температурного перепада $\Delta T_m/2$ [24]

В свою очередь, В.П. Вавилов и В.В. Ширяев показали, что экстремумы производных от $T(x, y)$ по любой из поверхностных координат в точности соответствуют проекциям границ внутренних дефектов на контролируемую поверхность [42]

Три описанных подхода проиллюстрированы на примере расчетного профиля на рис 4.3, полученного для дефекта радиусом $r_d = 1$ мм в алюминии на глубине 0,5 мм. В табл. 4.1 приведены оценки радиуса дефекта как в случае ТК алюминия, так и углепластика толщиной 5 мм. Видно, что с точностью до радиального шага пространственной сетки, использование экстремума первой производной $(\partial T / \partial r)_{extr}$

обеспечивает точное определение r_d в обоих материалах (к сожалению, этот прием неприменим для зашумленных сигналов). Достаточная для практики точность обеспечивается оценкой по $\Delta T_m/2$. В алюминии точные оценки имеют место при малых временах наблюдения, в то время как при больших временах происходит существенное расплывание температурного отпечатка. В углепластике отмечена возможность как переоценки, так и недооценки r_d , последний эффект назван Д. Альмондом и другими "сжатием" (shrinkage) дефекта [24]. Отметим, что предлагаемый прием интерполяции оценки $r_d(\tau)$ до момента $\tau = 0$ не приведет к повышению точности дефектометрии в случае углепластика (см. табл. 4.1). Наконец, оценка r_d по размерам зоны, занимаемой сигналом $\Delta T(r) > \Delta T_{thr} = 0,01$ °C, приводит к существенным разбросам оценок в зависимости от времени наблюдения.

Определение поперечных размеров скрытых дефектов проиллюстрируем на

примере ТК иконы, выполненной по средневековой технологии на деревянной доске толщиной 20 мм (образец предоставлен Э. Гринцато, Италия) Имитатор иконы представлял собой многослойную конструкцию, включающую слой лака, клей на гипсовой основе, холст и подложку из дерева. Более подробно ТК изделия рассмотрен в главе 9. В данном контексте анализ ограничен рассмотрением дефекта в виде полоски из тефлона размером 27×4 мм, размещенной на глубине около 1 мм. ИК-термограмма в оптимальный момент наблюдения показана на рис 4.4, а (См цветную вкладку). Масштаб термограммы 0,84 мм/пиксель. Горизонтальный профиль температуры через данный дефект показан на рис 4.4, б, а его производная на рис 4.4, в. Поскольку исходная термограмма весьма зашумлена, что характерно для неоднородных фонов, возникающих при контроле предметов искусства, оценка размеров дефекта непосредственно по термограмме затруднена. Протяженность дефекта по критерию $\Delta T_m/2$ составила 45 пикселей или 37,8 мм. Применение критерия $(\partial T / \partial r)_{ext}$ оказалось невозмож-

ным, поскольку операция производной привела к усилению шумов (рис 4.4, в).

На рис 4.4, г показана таймограмма изделия, полученная с помощью алгоритма тепловой томографии (см п 5.3). Известно, что распределение характеристических времен теплопередачи имеет значительно большую крутизну на краях дефектов по сравнению с обычной термограммой. Этот эффект отчетливо виден на рис 4.4, г, где определение размеров дефекта возможно простым подсчетом пикселей, занимаемых изображением дефекта 45×8 пикселей. Таким образом, оценка размера дефекта по таймограмме составляет $37,8 \times 6,7$ мм, т.е. совпадает с оценкой по $\Delta T_m/2$.

В данном примере видно, что реконструированные размеры данного дефекта существенно не совпадают с запроектированными, что характерно для дефектов, образованных внесением инородного материала между слоями основного изделия. В случае дефектов типа пазов, засверловки и т.п. точность применения описанных выше приемов является более высокой.

4.1. Реконструкция поперечных размеров дискообразного дефекта

Время наблюдения, с	Истинный радиус дефекта, мм	Реконструированный радиус дефекта, мм		
		по критерию $(\partial T / \partial r)_{ext}$	по критерию $\Delta T_m / 2$	по критерию $\Delta T_m = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$
<i>Алюминий</i> $L = 2 \text{ мм}, l = 0,5 \text{ мм}, d = 0,2 \text{ мм}, Q = 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$				
0,005	1,0	1,0*	1,0	2,5
0,01		1,0*	1,0	3,0
0,05		1,0*	2,4	1,8
<i>Углекластик</i> $L = 5 \text{ мм}, l = 1,5 \text{ мм}, d = 0,5 \text{ мм}, Q = 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$				
1,0	5,0	5,0*	5,4	4,0
2,5		5,0*	4,6	7,0
5,0		5,0*	4,3	7,5

*С точностью до одного радиального шага численной сетки

4.7.2. Функция точечного источника и инверсия размеров внутренних дефектов в пространстве Фурье. Общий подход к определению размеров и формы внутренних дефектов по экспериментальным температурным сигналам разработан Р Фавро [43] и др для импульсных процедур ТК и Г Вальтером и др [44] для процедур с использованием тепловых волн Предлагаемый метод заимствован из астрономии и оптики и предполагает независимость оценок от времени и параметров дефектов

Пусть форма внутреннего дефекта в направлении, параллельном контролируемой поверхности, описывается функцией $F(x, y, l)$, а функция $G(x, y, l, \tau)$ обозначает поверхностный температурный отклик от точечного дефекта, расположенного на той же глубине l (нагрев импульсом Дирака) Функция G является аналогом функции Грина, широко используемой для решения дифференциальных уравнений, ее более точное название – функция точечного источника (ФТИ) Эту функцию можно определить как в общем случае, так и для конкретных материалов, дефектов и типов нагрева Очевидно, что поверхностный температурный сигнал от произвольного дефекта при произвольном нагреве можно получить *сверткой* (convolution) следующих функций

$$\Delta T(x, y, l, \tau) = W(x, y, \tau) ** F(x, y, l) ** \times G(x, y, l, \tau), \quad (4.28)$$

где $W(x, y, \tau)$ – функция источника нагрева, а знак (**) обозначает свертку

Если определить ФТИ для конкретного типа нагрева, последнее уравнение приобретает более простой вид

$$\Delta T(x, y, l, \tau) = F(x, y, l) ** G(x, y, l, \tau) \quad (4.29)$$

Свертку в пространстве оригиналов заменяют простым произведением в пространстве Фурье

$$\Theta(u, \zeta, \tau, l) = \Phi(u, \zeta, l) \Gamma(u, \zeta, \tau, l) \quad (4.30)$$

Здесь функции-оригиналы заменены соответствующими образами Фурье Функция формы дефекта может быть определена обратным преобразованием Фурье, примененным к отношению $\Theta(u, \zeta, \tau, l) / \Gamma(u, \zeta, \tau, l)$

$$F(x, y, l) = \text{Fourier}^{-1}[\Theta(u, \zeta, \tau, l) / \Gamma(u, \zeta, \tau, l)] \quad (4.31)$$

При практическом применении уравнения (4.31) возникают следующие проблемы

- ФТИ должна быть определена "наилучшим" образом для конкретных дефектов (например, неясно как G должна учитывать влияние толщины дефекта);
- поскольку функция F не должна зависеть от времени, неясно как выбирать момент времени τ для расчета отношения двух Фурье-образов в выражении (4.31),
- деление на значения Γ , близкие к нулю, должно вызвать появление значительного шума в спектре Фурье функции F ,

любые шумы в исходных изображениях имеют тенденцию к усилению при использовании вышеописанных процедур.

ФТИ можно найти аналитически или численно Р Фавро и др получили выражение ФТИ для импульсного ТК в следующем виде, используя приближение Борна первого порядка, т е пренебрегая многократными отражениями импульсных тепловых волн в пространстве между поверхностями изделия и дефекта [43]

$$G(x, y, \tau, l) = -\frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\pi a \tau}} \frac{\partial}{\partial l} \times \frac{\exp \left\{ -\left[\sqrt{x^2 + y^2 + l^2} + l \right]^2 / 4a\tau \right\}}{\sqrt{x^2 + y^2 + l^2}}, \quad (4.32)$$

где C – постоянный коэффициент (производная по l не выполнена с целью представить выражение в компактном виде) Авторы метода полагают, что формула (4.32) удовлетворительно описывает рас

пространение и рассеяние импульсных тепловых волн. Тем не менее, проблема выбора оптимального момента времени для выполнения операции (4.31) остается нерешенной (авторы предлагают выбирать τ эмпирически).

Для случая точечного гармонического нагрева (фототермический метод ТК), предложено следующее выражение для ФТИ, записанное в цилиндрических координатах [44]

$$G(r, \tau, l) = \frac{\pi \sigma^2}{2\sqrt{r^2 + l^2}} \exp\left[-\sigma\left(l + \sqrt{r^2 + l^2}\right)\right] \times \left[B + \frac{Al}{\sqrt{r^2 + l^2}} \left(1 + \frac{1}{\sigma\sqrt{l^2 + l^2}}\right)\right], \quad (4.33)$$

где $A = \Delta\lambda/\lambda$ и $B = \Delta(C\rho)/(C\rho)$ названы параметрами "тепловой мощности" (thermal strength) точечной неоднородности, $\sigma^2 = 2l/\mu$ — волновое число, μ — длина тепловой диффузии, r, l — расстояния между дефектной точкой и точкой нагрева соответственно по горизонтали и вертикали. По структуре выражения (4.32) и (4.33) подобны, однако в формуле (4.33) отсутствует время в силу квазистационарного характера контроля.

В заключение следует заметить, что как отыскание ФТИ, так и всю процедуру инверсии согласно выражению (4.31), целесообразно проводить в численном виде. Описанный метод позволяет получить более резкие изображения размытых дефектных отпечатков, однако при этом возрастает высокочастотный шум. Подавление шума производят путем его фильтрации в пространстве Фурье.

4.7.3. Лапласиан и восстановление размытых границ. Определение контуров внутренних дефектов, будь то простое дифференцирование (п. 4.7.1) или использование ФТИ (п. 4.7.2), может быть объяснено с позиций обработки изображений Лапласовским фильтром, обладающим

"свойством обострения" (sharpening) границ областей, которые были размыты вследствие процессов диффузии [45].

Лапласиан является линейным дифференцирующим оператором

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (4.34)$$

который инвариантен относительно вращения, поэтому, в отличие от дифференцирующих фильтров первого порядка, применение Лапласа инвариантно в отношении направления прохождения границ $\Delta T(x, y)$.

Можно показать, что Лапласиан связан с процессом диффузии тепла, описываемого уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T. \quad (4.35)$$

Принимается, что температурное распределение в нулевой момент времени $T(x, y, \tau = 0)$ отображает форму скрытого дефекта (в главе 3 показано, что воспроизведение формы дефектов улучшается при коротких временах наблюдения). Соответственно, функция $T(x, y, \tau > 0)$ описывает размытое (blurred) изображение дефекта. Разлагая функцию $T(x, y, \tau > 0)$ в ряд Тейлора вблизи точки τ^* , можно получить

$$T(x, y, 0) = T(x, y, \tau) - \tau^* \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\tau^{*2}}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} - \quad (4.36)$$

Игнорируя члены ряда второго порядка и выше

$$T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau = 0) - a \tau^* \nabla^2 T$$

Соответственно в цифровой форме следует выполнить фильтрацию следующего вида

$$T(i, j) - \nabla^2 T(i, j) = 5T(i, j) - [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)] \quad (4.37)$$

4.7.4. Использование решения трехмерной адиабатической задачи ТК. Метод "термического четырехполюсника", предложенный А. Деджиованни для решения одномерных задач теории теплопроводности, был распространен на случай трехмерных задач [28]. Это позволило ввести в рассмотрение, помимо глубины залегания дефектов l и их теплового сопротивления R_d , также их размеры $b \times c$ в поперечном направлении. Принципы решения прямой задачи ТК с использованием преобразования Лапласа и Фурье описаны в п. 3.5. В аспекте дефектометрии наиболее простые алгебраические выражения получают для дефектов с малым R_d . Для определения размеров дефекта необходимо использовать результаты как од-

но-, так и двухстороннего ТК. Двухсторонняя процедура позволяет определить термическое сопротивление дефекта, а односторонняя — его глубину, причем в обоих случаях используют так называемый *локально-одномерный подход*, описанный в п. 3.1.2. Затем вводят концепцию *пространственно-усредненного контраста Лапласа*, который определяют по экспериментальным данным. Как показано в [28], значение этого контраста пропорционально $b \times c$. Данный алгоритм определения поперечных размеров дефектов является достаточно громоздким и представляет скорее теоретический интерес, однако и он может стать практическим по мере роста мощности компьютеров.

Глава 5

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ

Алгоритмы обработки динамических температурных функций в ТК связаны с анализом изменения температуры в бездефектной и дефектной областях (рис 5 1), для чего необходимо обрабатывать пиксельные функции $T(i, j, \tau)$ последовательностей экспериментальных термограмм Стандартный подход состоит в выборе *временных интервалов* (time gates), в которых регистрируют дифференциальный сигнал $\Delta T(\tau)$, причем положение выбранного интервала зачастую определяет способ ТК (некоторые способы ТК представлены на рис 5 1)

5.1. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В импульсном ТК используют различные вариации метода, который может быть назван "методом оптимального наблюдения" Его сущность очевидна и сводится к тому, что температурное поле объекта контроля следует наблюдать в момент τ_m максимума сигнала ΔT_m или другого выбранного информативного параметра (более корректно выбирать τ_m в момент максимального отношения сигнал/шум) При этом "оптимальную" термограмму либо выбирают из записанной последовательности, либо непосредственно фиксируют в момент τ_m , который определяют *a priori* В англоязычной литературе с этим методом связано несколько терминов *метод синхронной регистрации сигнала, метод временных ворот, ИК-радиометрия с временным разрешением* и т.п. (synchronous, lock-in, box-car, time-resolved technique)

Важное значение имеет положение оптимального момента наблюдения относительно окончания нагрева τ_h Типичной

рекомендацией импульсного ТК является необходимость соблюдать условие $\tau_m > \tau_h$, в противном случае, при использовании оптического нагрева, возникает проблема отраженного излучения нагревателя

В рамках метода ИК-радиометрии с временным разрешением в Университете Джонса Гопкинса (США) предложено нагревать изделие лазерным излучением с длиной волны, находящейся вне полосы спектральной чувствительности тепловизора, например, нагревать объект излучением видимого диапазона, а температуру регистрировать в диапазоне 7 - 14 мкм [26] С точки зрения обеспечения максимального текущего контраста над дефектом такой способ уступает кратковременному нагреву, но в ряде практических задач он может оказаться если не оптимальным, то приемлемым

5.2. МЕТОД РАННЕГО НАБЛЮДЕНИЯ

Метод раннего наблюдения, предложенный Ж Крапе и Д Балажа [35], предусматривает регистрацию сигнала ΔT в моменты времени $\tau \ll \tau_m$ (см п 4 1 2) Очевидно, что при этом отношение сигнал/шум меньше, чем при оптимальном наблюдении, следовательно, данный способ применим для дефектов, создающих сигналы $\Delta T(\tau)$ достаточно большой величины (т.е. для больших или неглубоко расположенных дефектов) Его основным преимуществом является хорошее воспроизведение формы дефектов в их проекции на контролируемую поверхность вследствие относительно низкой интенсивности объемной диффузии тепла Применительно к алюминиевым и углепластиковым самолетным конструкциям метод раннего наблюдения обеспечивает качество термо-

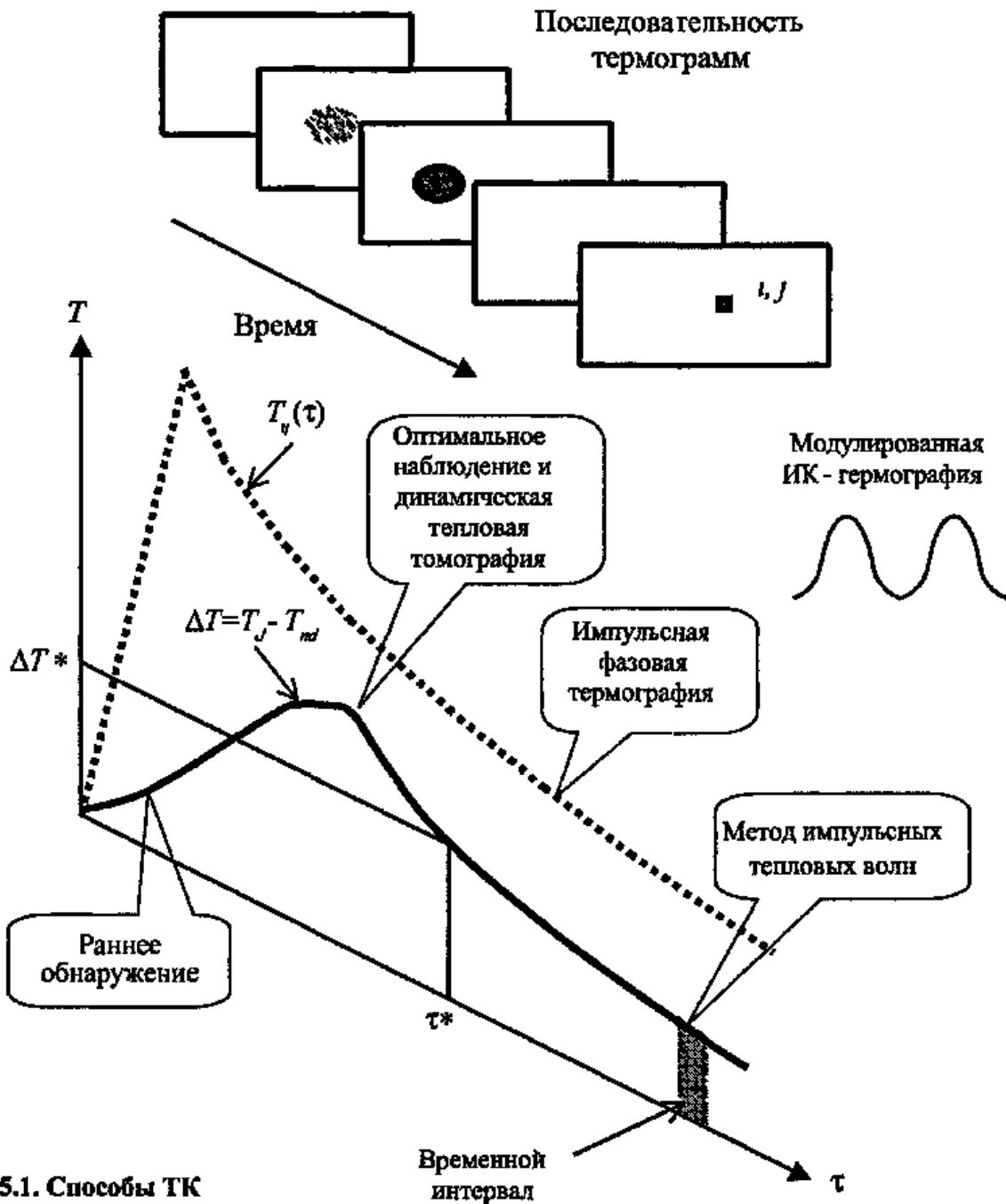


Рис. 5.1. Способы ТК

грамм, близкое к ультразвуковым изображениям, полученным методом С-сканирования

5.3. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕПЛОЙ ТОМОГРАФИИ (МАКСИГРАММЫ И ТАЙМОГРАММЫ)

5.3.1. Физические принципы. Идея динамической тепловой томографии была предложена В.П. Вавиловым и В.В. Ширяевым в 1986 г. на волне большого инте-

реса к томографическому представлению результатов путем "просвечивания" твердых тел с помощью физических полей и потоков частиц [46–48]. Первая тепловая томограмма построена В.П. Вавиловым в сотрудничестве со специалистами из Университета Уэйна (США) в 1989 г. путем соответствующей обработки экспериментальной последовательности ИК-термограмм, полученной при импульсном ТК углепластикового композита [46].

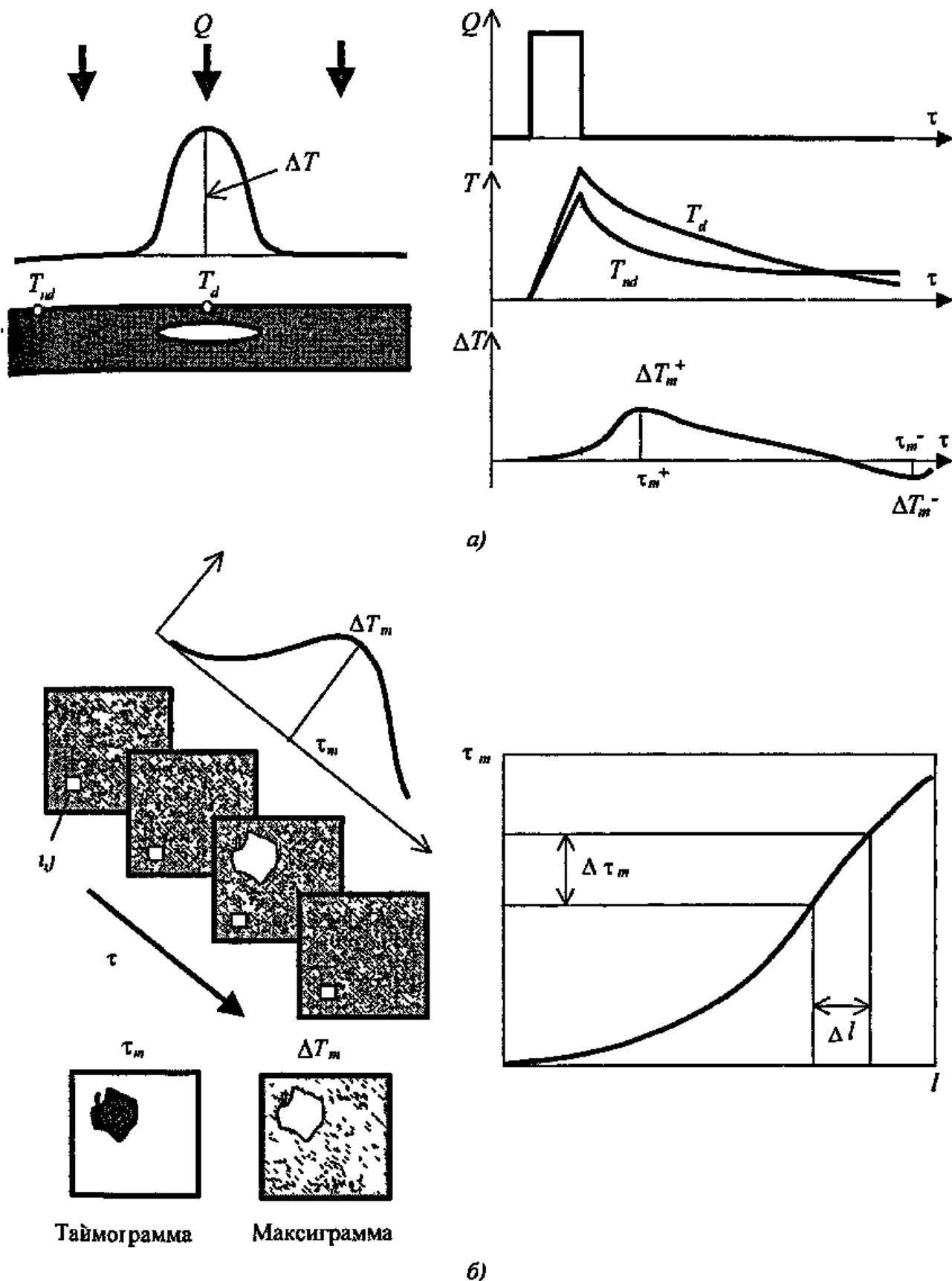


Рис. 5.2. Динамическая тепловая томография:
 а – положение характерных точек и развитие температурных сигналов во времени,
 б – синтез таймограммы и максиграммы (справа – калибровочная кривая)

В России параллельные работы проводила группа Д.А. Рапопорта, которая искала подходы к тепловой томографии на основе итеративного решения обратных задач ТК [40]

Изобретение компьютерной рентгеновской томографии и ее применение в медицинской и технической диагностике оказалось столь же революционным, как и само открытие рентгеновских лучей. В НК радиационная томография позволяет наблюдать слабоконтрастные дефекты, что достигается просвечиванием изделия под различными углами зрения. В отличие от потока корпускулярных частиц и квантов оптического излучения тепловая энергия распространяется путем диффузии, поэтому чисто геометрические принципы классической томографии заменены в ТК анализом изменения поверхностной температуры во времени. Г. Буссе и Ф. Ренк из Штуттгартского Университета (Германия) еще в 1984 г. предлагали упрощенную схему двусторонней проективной тепловой томографии, которая не получила практического применения [49]

В России разрабатывали эмиссионную тепловую томографию для анализа пространственного распределения температуры раскаленных газов, полупрозрачных для ИК-излучения. Материал настоящего раздела относится к динамической тепловой томографии, основанной на том факте, что температурные отклики более глубоких слоев контролируемого материала проявляются на нагреваемой поверхности с возрастающей временной задержкой.

Из теории ТК, изложенной в главе 4, следует, что тепловая томография возможна только в односторонней процедуре, поскольку в двусторонней процедуре ТК зависимость $\Delta T(\tau)$ от l неоднозначна (см. п. 3.2.3). Тепловую томографию следует рассматривать как способ особого представления результатов ТК, в котором использована инвертированная зависимость $l(\tau^*)$, где τ^* обозначает характерное время теплопередачи, выбранное в качестве информативного параметра.

Тепловая томография позволяет

- выполнять послойный анализ объекта контроля, хотя при этом происходит "затенение" более глубоких дефектов (см. п. 3.2.3),

- снижать влияние поверхностных шумов на качество термограмм,

- улучшать выявляемость скрытых дефектов,

- определять глубины залегания дефектов с приемлемой точностью (до 15 %).

Тепловая томография использует стандартную процедуру ТК, изображенную на рис. 5.2, а. На нагреваемой поверхности оператор выбирает эталонную (бездефектную) точку (l_{ref}, J_{ref}) , после

чего все другие точки (пиксели) термограмм проверяют относительно эталонной точки (пикселя) на предмет их принадлежности к дефектным зонам. Иными словами, каждый пиксель характеризуется температурным сигналом $\Delta T_{ij}(\tau^*) = T_{ij}(\tau^*) - T_{ref}(\tau^*)$, определенным для любого характерного времени τ^* .

В тепловой томографии часто рассматривают случай $\tau^* = \tau_m$. Каждый пиксель (i, j) можно охарактеризовать двумя параметрами $\Delta T_{m,ij}$ и $\tau_{m,ij}$, которые формируют изображения, названные В.В. Ширяевым соответственно *максиграммой* и *таймограммой*. В зависимости от типа дефекта и амплитуды эталонного сигнала, величина $\Delta T_{m,ij}$ может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Существенной особенностью такого подхода является то, что исходную последовательность экспериментальных термограмм заменяют всего двумя изображениями, причем максиграмма показывает дефекты в их оптимальном проявлении, а таймограмму можно рассматривать как закодированное изображение глубин слоев (рис. 5.2, б).

Наилучшие результаты по точности определения координат отдельных слоев получают путем предварительного расчета калибровочной функции $\tau_m(l)$ для кон-

кретного изделия, после чего любому интервалу оптимальных времен наблюдения Δt_m ставят в соответствие интервал глубин дефекта Δl (рис 5.2, б) и строят *тепловую томограмму*. Простые оценки координат слоев можно также получить, используя приближенную формулу (4.20). Необходимо отметить, что калибровка $\tau_m(l)$ привязана к определенному типу дефектов, а использование формулы (4.20) возможно в случаях, когда коэффициент отражения тепловой волны на поверхности дефекта близок к единице (газонаполненные дефекты в твердых материалах)

5.3.2. Максиграмма, таймограмма и томограмма. Максиграмма показывает проявление структурных неоднородностей объекта контроля по отношению к эталону в их *оптимальном проявлении* и, как правило, характеризуется *максимальным отношением сигнал/шум*. Иными словами, максиграмма обладает большей информативностью о наличии дефектов по всей глубине изделия по сравнению с любыми отдельными термограммами в исходной последовательности. Максиграммы являются искусственными изображениями, поскольку амплитуда сигнала в отдельных пикселях представлена в различные моменты времени. Как и термограммы, максиграммы характеризуются *сглаженной (гауссовской) формой температурных сигналов над дефектами ΔT* .

Таймограмма отражает распределение характерных времен теплопередачи в объекте также по отношению к эталону. Каждый пиксель таймограммы содержит номер изображения в последовательности, которому соответствует максимальное значение ΔT . По сравнению с соответствующей максиграммой, таймограмма характеризуется более крутым фронтом пространственного распределения сигнала $\tau_{m,j}$ и поэтому лучше отражает истинные размеры дефектов. Важной особенностью таймограмм является почти "плоское" поведение сигнала $\tau_{m,j}$ в центральной части дефекта и наличие характерного выброса с

большими значениями времени задержки по краям дефектов, что приводит к появлению артефактов.

Следует отметить, что максиграммы внешне подобны термограммам, которыми они по сути и являются. В свою очередь, таймограммы являются результатом нелинейной обработки исходной температурной информации, поэтому их вид может быть непредсказуемым и не отражать наличия внутренних дефектов в случае неправильного выбора эталонной точки.

Тепловые томограммы получают "расслаиванием" таймограммы. Иными словами, в томограмме отражены только те пиксели таймограммы, которые характеризуются значением τ_m в выбранном интервале $\tau_{m1} \dots \tau_{m2}$. В ряде случаев производят *бинаризацию* томограмм, превращая их в карты дефектов. Теоретически, максимальное число слоев, которые можно выделить в твердом теле, должно быть равно числу изображений в последовательности, однако на практике, в силу шумов и конечного температурного разрешения тепловизора, толщина выделяемого слоя увеличивается с возрастанием глубины, и число различаемых слоев, как правило, не превышает 4-6.

5.4. АДАПТИВНАЯ ТЕПЛОВАЯ ТОМОГРАФИЯ

Алгоритм адаптивной тепловой томографии, предложенный В. П. Вавиловым с соавторами, основан на послойном адаптивном профилировании ТФХ объекта [50]. Алгоритм предполагает, что

- экспериментальные функции изменения температуры во времени регистрируют с малым интервалом Δt ,
- ТФХ основного материала *a priori* известны,
- для первого шага по времени глубина проникновения тепловой энергии мала, и изделие рассматривают в качестве полуграниченного бездефектного тела,
- экспериментальные значения температуры считают шаг за шагом с ин-

тервалом Δt , сравнивают с расчетными данными и модифицируют на каждом шаге и в каждом пикселе, варьируя значения температуропроводности

Алгоритм, основанный на явной численной схеме решения уравнения теплопроводности, использует предложенную рекуррентную формулу, которая включает определенные на предыдущих временных шагах значения толщины и температуропроводности слоев. На каждом четном шаге определяют толщину очередного слоя, а на каждом нечетном шаге рассчитывают температуропроводность данного слоя. Таким образом, продвигаясь вглубь изделия, возможно построение пиксельных распределений температуропроводности в пределах отдельных слоев. Для разбиения изделия на N слоев требуется иметь последовательность из $2N-1$ термограмм.

Данный алгоритм не получил дальнейшего развития из-за ограничений на шаги по времени и пространству. Фактически удавалось выделить только 3-4 слоя, после чего алгоритм расходился. Применение неявной численной схемы оказалось невозможным из-за необходимости перебирать на каждом шаге все слои изделия вплоть до задней поверхности.

5.4. МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОВОЙ ТЕРМОГРАФИИ (ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ)

5.5.1. Общие принципы. Метод импульсной фазовой термографии (pulse phase thermography), предложенный К. Малдагом и С. Маринетти [51], основан на применении преобразования Фурье к функции изменения температуры во времени $T_p(\tau)$. Фазовая термография является обобщением метода модулированных (импульсных или периодических) тепловых волн, которые распространяются в глубь изделия от точки теплового возбуждения и претерпевают пространственные и

временные искажения в месте наличия внутренних дефектов. В п. 3.7 было показано, что при периодическом нагреве температура над дефектом является периодической функцией той же частоты, что и возбуждающая тепловая волна, и характеризуется определенной фазой и амплитудой. Простой оценкой максимальной глубины обнаруживаемого дефекта служит длина тепловой диффузии $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$. Очевидно, более глубокие дефекты следует обнаруживать с помощью более медленных волн. В ТК значения μ находятся в диапазоне от микрометров до миллиметров. Применение волн более низких частот возможно, но это удлинит эксперимент, поскольку обычно регистрируют несколько периодов тепловой волны.

Медленные тепловые волны возникают в результате суточных колебаний температуры земной поверхности. Суточные температурные волны проникают в низкотеплопроводные материалы на глубину до 5-15 см, что позволяет обнаруживать скрытые объекты в почве и строительных сооружениях.

Сверхдлинные годовые волны температуры проникают в почву на глубины более метра. В ТК эти волны не применялись из-за очевидной трудности выделения столь низкой частоты.

Импульсная фазовая термография есть воплощение идеи учета *тотальных* различий в процессах временного развития температуры в бездефектных и дефектных зонах. Известно, что поглощенная поверхностью твердого тела импульсная тепловая энергия любой формы (предпочтительнее иметь дело с прямоугольными импульсами или импульсами Дирака) характеризуется спектром частот, которые проникают в глубь тела, претерпевая рассеяние по энергии (амплитуде) и запаздывание во времени (сдвиг по фазе). Отдельные частотные компоненты конкурируют сложным образом, участвуя в создании колоколообразного сигнала в зоне дефек-

та В главе 3 упоминалось, что этот процесс можно трактовать как распространение тепловых пакетов, перемещающихся между поверхностями изделия и дефекта С ростом глубины проникновения теплового пакета количество высокочастотных компонент в спектре динамической температуры уменьшается Таким образом, слой изделия выполняют роль своеобразных частотных фильтров Качественно это означает, что приповерхностная область изделия может зондироваться относительно высокочастотными волнами, что используется в методе тепловых волн, а глубинные дефекты предпочтительно выявлять низкочастотными волнами При этом специфическую информацию несет также сдвиг фазы между возбуждающей и регистрирующей волной

Феноменологически предпочтительность использования импульсной термографии для одностороннего ТК можно проиллюстрировать следующим рассуждением Известно, что 1) более глубокие дефекты характеризуются более слабыми температурными сигналами, 2) в спектре Фурье прямоугольных или им подобных импульсов низкочастотные компоненты несут больше мощности, чем высокочастотные С учетом того, что обнаружение глубоких дефектов требует волн более низких частот, вышесказанное означает, что стимуляция изделия прямоугольным импульсом (или импульсом Дирака) является оптимальной для обнаружения скрытых дефектов по всей глубине изделия Очевидно, что на практике возможны ограничения, связанные с технологически доступной мощностью нагрева, спектральным составом потока нагрева, допустимым перегревом образца, шумами и т.п.

Основное отличие Фурье-анализа, используемого в ТК, от стандартных процедур обработки двумерных изображений заключается в его "одномерности", поскольку оно применяется к временному развитию сигналов Таким образом, Фурье-анализ в ТК используют для исследования динамических последовательностей

ИК-изображений Определенная трудность в интерпретации изображений фазы (*фазограмм*) и амплитуды (*модулограмм*) в Фурье-пространстве состоит в том, что результаты преобразования Фурье зависят как от величины интервала оцифровки температурных данных, так и от числа этих интервалов Тем самым подвергается сомнению возможность получения обобщенных калибровочных зависимостей, которые позволили бы, например, осуществлять тепловую томографию путем анализа сдвига фаз

Рассмотрим как практически осуществляют Фурье-преобразование временной последовательности термограмм Используем преобразование Фурье F_s , принятое в физике

$$F_s = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N f_n e^{2\pi j(n-1)(\tau-1)/N}, \quad (5.1)$$

где f_n — дискретная исходная функция, содержащая N отсчетов (N термограмм в последовательности), τ — частота, j — мнимая единица, n — номер отсчета

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

- нулевой момент времени $\tau = 0$ соответствует (\leftrightarrow) *точке 1*,
- момент времени $\tau = 0 + \Delta\tau \leftrightarrow$ *точке 2*,
- момент времени $\tau = 0 + 2\Delta\tau \leftrightarrow$ *точке 3*,
- момент времени $\tau = 0 + 19\Delta\tau \leftrightarrow$ *точке 20*,

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

Последовательность T изображена на рис 5.3, а Модуль M и аргумент (фаза) Φ преобразования Фурье для данной последовательности приведены на рис 5.3, б, в

Важно подчеркнуть, что, в отличие от ряда других алгоритмов ТК, например, метода оптимального наблюдения или динамической тепловой томографии, им-

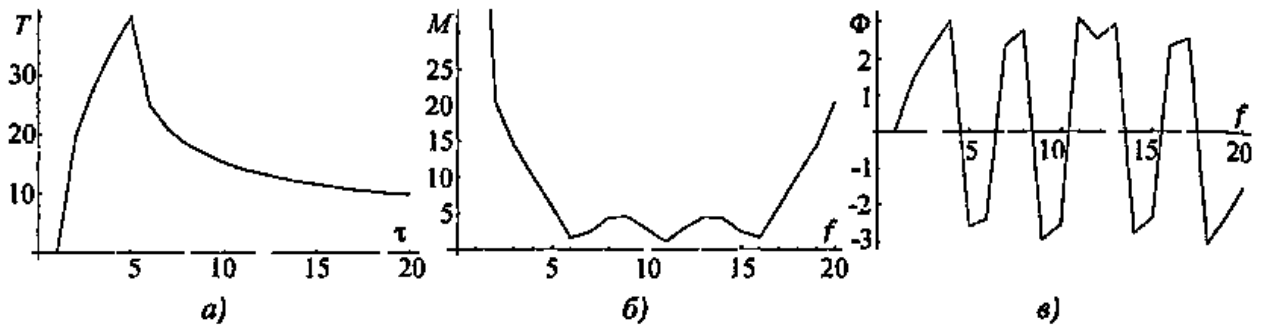


Рис. 5.3. Типичная функция изменения поверхностной температуры во времени (а) и параметры ее Фурье-образа (б) и (в)

пульсная фазовая термография требует накопления информации в течение длительного времени, что позволяет анализировать низкие частоты, необходимые для обнаружения глубоколежащих дефектов. С другой стороны, интервал времени между соседними термограммами должен быть мал, чтобы обеспечить высокие частоты в спектре Фурье, необходимые для обнаружения приповерхностных дефектов (при выполнении этого условия, центральная часть спектра на рис 5.3, б спадает почти до нуля). Поэтому импульсная фазовая термография обычно имеет дело с последовательностями, состоящими из нескольких сотен изображений.

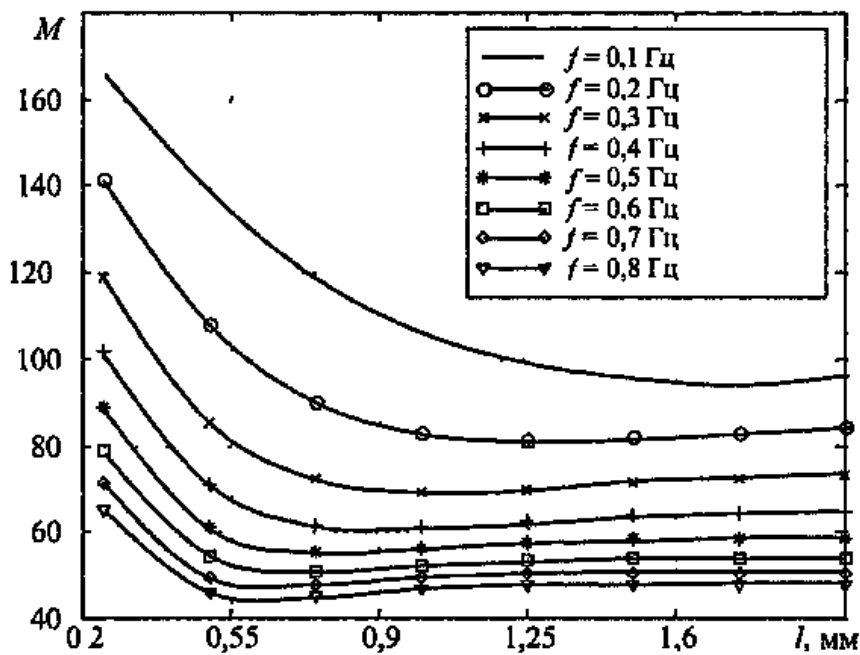
К настоящему времени, преимущества импульсной фазовой термографии были продемонстрированы в основном на качественном уровне, однако чувствительность метода к структурным дефектам настолько высока, что его используют в качестве тестового при проверке других алгоритмов.

5.5.2. Количественный подход к фазовой термографии. Экспериментальной иллюстрацией количественного подхода к данному методу может служить ТК ударного повреждения в углепластиковом композите толщиной 2 мм. Нагрев осуществляли тремя импульсными лампами с общей энергией 9 кДж и длительностью импульса 10 мс [52]. Переходный тепловой процесс записывали в течение 5 с с интервалом 66,7 мс (74 термограммы в

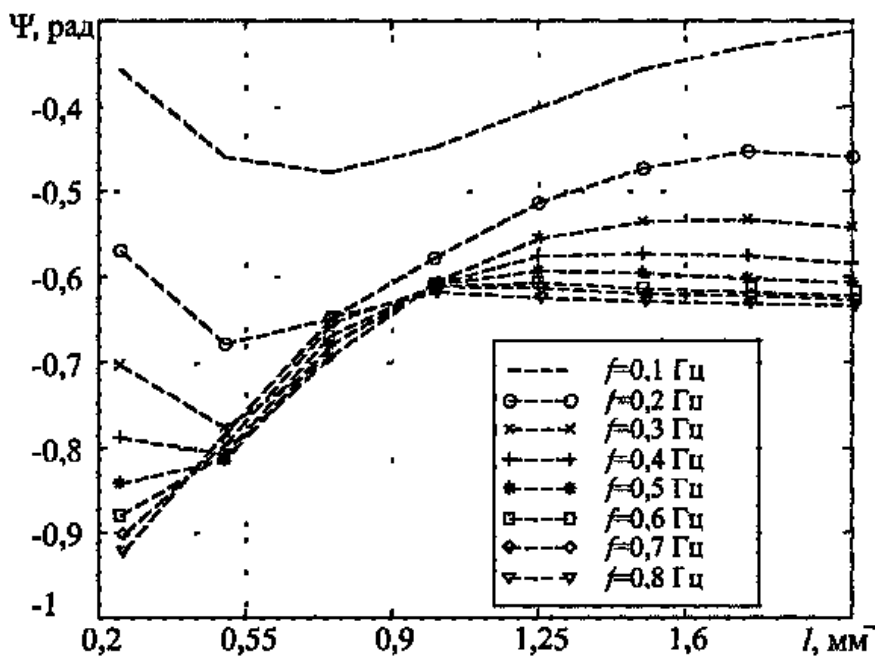
последовательности). Это позволило проанализировать следующие частоты в спектре Фурье 0 Гц, 0,202 Гц, 0,404 Гц и т.д. Исходная термограмма, полученная через 1,3 с после окончания импульса нагрева, дана на рис 5.4, а, иллюстрируя известную форму ударного повреждения в виде "бабочки" (См цветную вкладку). На ультразвуковой С-скеннограмме можно обнаружить до пяти дефектов, расположенных на различных глубинах и развернутых по направлениям волокон углепластика. Результаты тепловой томографии данного образца позволили обнаружить четыре дефектные зоны, две из которых, расположенные на глубинах от 0,3 до 0,7 мм (зона А на рис 5.4, а) и от 1 до 1,5 мм (зона В на рис 5.4, а), хорошо видны даже в исходных изображениях.

Кривая изменения температуры в бездефектной зоне $T_{ef}(i, j, \tau)$ показана для данной последовательности на рис 5.4, б. Нулевой отсчет температуры был сделан перед нагревом, когда температура изделия была равна температуре окружающей среды.

Спектры модуля M и фазы Φ преобразования Фурье, полученные для функции на рис 5.4, б, показаны на рис 5.4, в, г. Ниже рассмотрены, в основном, фазовые характеристики, хотя дальнейшее развитие данного метода может потребовать использование амплитудных спектров с последующим возвращением в область реального времени.



a)



б)

Рис. 5.5. Модуль (а) и фаза (б) тепловой волны на различных частотах в зависимости от глубины залегания дефекта в углепластике толщиной 2 мм

В данном примере преобразование Фурье применено только к спадающей части температурного сигнала, следующей за импульсом нагрева (на практике, длительность импульса нагрева 10 мс была слишком малой для его уверенной регистрации с использованной частотой выборки 15 Гц) Тем не менее, вид Фурье-образов изменяется в зависимости от того, имеют-

ся ли в исходной последовательности отсчеты перед нагревом (сравнить графики на рис 5.4, б-г) В частности, наличие первого отсчета перед скачком температуры приводит к появлению отчетливого экстремума в зависимости фазы от частоты (рис 5.4, г), наличие которого позволило синтезировать изображения максимальной фазы в ряде работ [51]

Применяя преобразование Фурье к результатам компьютерного моделирования процесса нагрева пластины из углепластика с расслоением, были рассчитаны калибровочные зависимости модуля и фазы Фурье-образов от глубины дефектов l , изображенные на рис 5 5 Видно, что

- модули образов Фурье быстро спадают с ростом глубины и достигают плато для глубоких дефектов (рис 5 5, а), при этом возникает слабый минимум, который имеет то же происхождение, что и на рис 3 10 (см п 3 2 3), амплитуда плато, по-видимому, связана с толщиной изделия и соответствует переходу к полубесконечной геометрии,

- в общем случае, фазы образов Фурье обнаруживают два экстремума (рис 5 5, б), приближенно можно считать, что на любой частоте фаза уменьшается в пределах определенного приповерхностного слоя, достигая минимального значения, которое сдвигается в сторону более глубоких дефектов для более медленных тепловых волн, затем фаза вновь возрастает и достигает плато аналогично модулю,

- наличие плато в обеих рассмотренных выше зависимостях доказывает, что зондирование материала может быть осуществлено только в пределах определенных глубин

Наличие экстремумов в зависимости фазы от глубины дефекта может сделать тепловую дефектometriю затруднительной. Предельную глубину обнаружения дефектов можно оценить путем анализа модуля и/или фазы. Пусть максимальная глубина зондирования соответствует началу плато в соответствующих зависимостях. Такое предположение кажется приемлемым в отношении модуля (рис 5 5, а), но может вызвать сомнение в случае фазы из-за специфического характера полученных зависимостей. Для профилирования глубины дефектов можно использовать как нарастающую, так и спадающую части зависимости фазы от глубины (рис 5 5, б), однако нарастающая часть

данной зависимости является менее чувствительной к глубине дефектов, особенно в области низких частот. Принимая во внимание вышесказанное, можно заключить, что фазовые компоненты спектра, в зависимости от частоты и типа материала, проникают в объект контроля глубже, чем амплитудные. Применяя метод наименьших квадратов, получены следующие оценки для максимальной глубины проникновения фазы L_{\max}^{Phase} и модуля амплитуды L_{\max}^{Ampl} [52]

$$\begin{aligned} L_{\max}^{\text{Ampl}} &\approx 0,82\sqrt{\alpha} f^{-0,44}, \\ L_{\max}^{\text{Phase}} &\approx 1,27\sqrt{\alpha} f^{-0,34} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Уравнения (5.2) были получены для углепластика. Тем не менее, они приблизительно справедливы и для других материалов. В общем виде соотношение глубин проникновения фазы и модуля амплитуды определяется следующей формулой:

$$L_{\max}^{\text{Phase}} / L_{\max}^{\text{Ampl}} \approx 1,55 f^{0,1}, \quad (5.3)$$

которая показывает, что фаза проникает на 55 % глубже модуля амплитуды, причем это соотношение слабо зависит от частоты.

С помощью функций, изображенных на рис 5 5, б, можно получить калибровочные зависимости глубины залегания дефекта от фазы [52]. На рис 5 6, а приведена фазограмма образца из углепластика, полученная на частоте 0,2 Гц, близкой к оптимальной для рассматриваемого случая (См цветную вкладку). По сравнению с исходной термограммой на рис 5 4 фазограмма характеризуется лучшим визуальным восприятием формы дефекта. Предпочтительность фазограммы была доказана путем определения отношения сигнал/шум S для зоны Б, которое составило $S = 7,2$ в фазограмме и $S = 2$ соответственно в исходном изображении.

5.5.3. Фазовая томография. Фазовые томограммы были получены выделением на фазограмме рис 5 6 пикселей,

характеризующихся определенными значениями фаз, что соответствовало определенным координатам слоев [52] Почти линейный характер полученной зависимости позволил преобразовать фазу в глубину простым пропорциональным пересчетом. Например, томограмма на рис 5 б, б показывает приповерхностную часть дефекта в интервале фаз $\Phi = 1,35 \dots 1,45$ рад, что соответствует глубинам дефекта в диапазоне $l = 0,82 \dots 0,94$ мм Томограммы на рис 5 16, в, г относятся соответственно к слоям $l = 0,94 \dots 1,06$ мм и $l > 1$ мм

5.6. МЕТОД ВЕЙВЛЕТ (ВОЛНОВЫХ)-ОБРАЗОВ

Метод *вейвлет-образов* (wavelet transforms), первоначально разработанный в 80-х годах прошлого столетия для обнаружения крагковременных сигналов на шумовом фоне, например отраженных от цели сигналов радиолокационных станций, в ТК был впервые использован К Малдагом с сотрудниками в качестве альтернативы преобразованию Фурье, недостатком которого является потеря информации о характерных временах процесса [53, 54]

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

$$U(u, b) = \frac{1}{w(u)} \int_{-\infty}^{+\infty} g\left(\frac{\tau - b}{u}\right) f(\tau) d\tau, \quad (54)$$

где u – параметр сжатия (dilation), b – параметр положения (location), $w(u)$ – весовая функция, которая позволяет визуализировать результат преобразования Вейвлет-преобразование можно рассматривать как кросс-корреляцию сигнала с набором *волновых функций* (wavelets) различной "ширины" Обычно полагают $w(u) = u$ или $w(u) = \sqrt{u}$ Иногда вейвлет-преобразование называют *математическим микроскопом*, в котором u^{-1} и b соот-

ветствуют усилению (magnification) и положению (location) сигнала Иными словами, вейвлет-преобразование позволяет выявлять периодические структуры, связанные с конечным диапазоном u

Дискретная форма представления уравнения (54) для временной последовательности $x(i)$ имеет вид

$$U(u, b) = \frac{1}{w(u)} \sum_{i=1}^N g\left(\frac{i-b}{u}\right) x(i) \quad (55)$$

Пользователь обладает определенной свободой выбора вида вейлет-функции, но при этом должны соблюдаться следующие условия

- волновая функция должна обладать конечной энергией, т.е. $\int |g(\tau)|^2 d\tau < \infty$,
- если $G(\omega)$ – преобразование Фурье от $g(\tau)$, то $\int |G(\omega)|^2 (1/|\omega|) d\omega < \infty$, т.е. волновая функция не должна иметь нулевой частоты (постоянного уровня сигнала)

Комплексные волновые функции должны также отвечать следующему условию

- Фурье-преобразование должно быть действительной функцией и становиться пренебрежимо малым при $\omega \leq 0$

Часто используют вейвлет-функцию типа "мексиканской шляпы"

$$g(y) = (1 - y^2)^2 e^{-y^2/2} \quad (56)$$

Дискретное выражение вейвлет-преобразования с использованием "мексиканской шляпы" имеет простой вид

$$U(u, b) = \frac{1}{w(u)} \sum_{i=1}^N x(i) \left[1 - \left(\frac{i-b}{u}\right)^2 \right] \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{i-b}{u}\right)^2\right] \quad (57)$$

В ТК используют базисную функцию Морле, а вышеуказанные параметры раз-

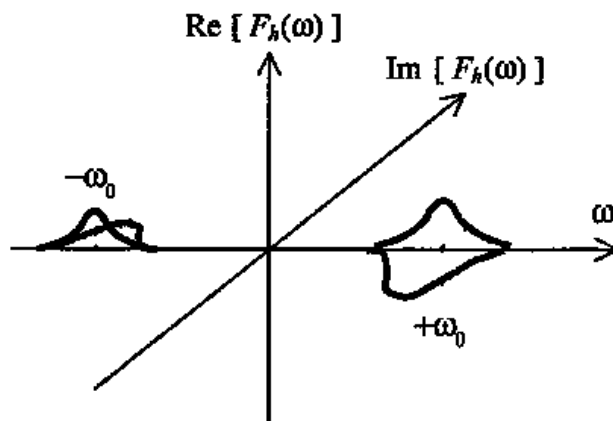


Рис. 5.7. Преобразование Фурье от функции Морле

ложения называют *фактором трансляции* Tr (translation) и *масштабирующим фактором* S (scale)

$$W(S, Tr) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\tau) h_{STr}(\tau) d\tau, \quad (5.8)$$

где W — обозначает вейвлет-преобразование, и h_{STr} является дочерней функцией, которая связана с материнской функцией выражением

$$h_{STr}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{S}} h\left(\frac{\tau - Tr}{S}\right) \quad (5.9)$$

Поскольку масштабирующий фактор связан с частотой, а фактор трансляции — со временем, в методе вейвлет-функций не теряется информация о времени, необходимая для оценки глубины залегания дефектов

Вейвлет-преобразование можно рассматривать как корреляцию между сигналом и отмасштабированной материнской функцией. Так, если $F_T(\omega)$ — Фурье-образ сигнала $T(\tau)$, а $F_h(\omega)$ — Фурье-образ функции $h(\tau)$, то вейвлет-преобразование можно рассматривать как обратное преобразование Фурье от произведения указанных образов

$$W(S, Tr) = \frac{\sqrt{S}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_T(\omega) F_h(\omega) e^{-j\omega Tr} d\omega \quad (5.10)$$

Произведение интервалов времени и частоты должно удовлетворять *принципу неопределенности Гайзенберга*

$$\Delta\tau \Delta\omega \geq 0,5 \quad (5.11)$$

Материнскую функцию Морле определяют как

$$h(t) = e^{-j\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (5.12)$$

где ω_0 — размер волновой функции Морле. Функция Морле — произведение базы преобразования Фурье, ответственного за частотный анализ, на окно Гаусса, описывающего временные параметры. На рис. 5.7 показан образ Фурье от функции Морле, который включает две гауссовские функции, сдвинутые на ω_0 и $-\omega_0$. Таким образом, масштабирующий фактор позволяет исследовать различные частоты при временах, определяемых фактором трансляции. С учетом принципа Гайзенберга, каждый вейвлет-образ определен внутри прямоугольника $\Delta\tau\Delta\omega$ вокруг S и Tr . Указанное ограничение точности позиционирования вейвлет-функций влияет на выбор ω_0 . Неопределенность значений ΔTr и глубины залегания дефекта l возрастает с увеличением ω_0 и уменьшением $\Delta\omega$.

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

время наблюдения с глубиной залегания дефекта и длиной тепловой диффузии с частотой

$$\tau = l^2/a \quad \text{и} \quad \mu = \sqrt{2a/\omega} \quad (5.13)$$

Комбинация этих выражений при $l = \mu$ приводит к условию

$$\tau = 2/\omega \quad (5.14)$$

Фактор трансляции Tr соответствует времени наблюдения τ , а масштабирующий фактор $S = \omega_0/\omega$. Связь этих двух параметров дается соотношением

$$S = \frac{\omega_0}{2} Tr \quad (5.15)$$

Использование последнего выражения позволяет сохранить размерность анализируемого сигнала, рассчитывая значение масштабирующего фактора S для каждого значения Tr . Значения Tr ограничены временем измерения, поэтому

$$W(S, Tr) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\tau) \frac{1}{\sqrt{0,5 \omega_0 Tr}} h\left(\frac{\tau/Tr - 1}{0,5 \omega_0}\right) d\tau \quad (5.16)$$

Как и в случае образа Фурье, вейвлет-образ содержит действительную и мнимую часть и поэтому позволяет определять фазовые характеристики в пространстве образов (что и позволило отнести данный метод к импульсной фазовой термографии). Вейвлет-образы характеризуются теми же особенностями, что и Фурье-образы. Фазу вейвлет-преобразования используют для обнаружения дефектов, в частности, для сегментации дефектов применяют оператор Собеля [54]. В свою очередь, калибровка фактора трансляции (разность пиксельных значений Tr) позволяет оценить глубину залегания дефектов.

Фактор трансляции, будучи по сути аналогом времени, обеспечивает максимум "видности" дефектов определенного размера на определенной глубине. Для того, чтобы не вводить двойную калибровку по размерам дефекта и глубине, предложено использовать ранние времена наблюдения, при которых, как показано в главе 3, температурные сигналы слабо зависят как от поперечных размеров дефектов, так и от толщины дефектов, сохраняя сильную зависимость от их глубины залегания.

В ТК метод вейвлет-функций является малоизученным, а его преимущества —

дискуссионными, поскольку изменение сигналов от дефектов $\Delta T(\tau)$ во времени носит не импульсный, а сглаженный характер.

5.7. ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ

В главе 4 были рассмотрены алгоритмы тепловой дефектометрии, позволяющие с помощью математических приемов определить требуемые параметры изделий и внутренних дефектов. Очевидно, что точность тепловой дефектометрии тем выше, чем больше параметров модели известно с требуемой точностью.

Приближенно можно констатировать, что 1) поперечные размеры внутренних дефектов могут быть непосредственно оценены по поверхностным температурным "огпечаткам" этих дефектов или путем простого анализа поверхностных профилей с погрешностью 5–10%, 2) глубину залегания дефектов можно определять с точностью 20–30%, 3) толщину дефектов, или их тепловое сопротивление, можно оценивать с точностью 30–60%. Практически применяют две группы способов решения задач дефектометрии: 1) использование формул инверсии, 2) итерационные способы сближения расчетных и экспериментальных данных (метод минимизации функционала).

Как результат дефектометрии, возможно построение искусственных изображений, в которых каждый пиксель выражает в единицах оцениваемого параметра, например, при оценке глубины и толщины скрытых дефектов были предложены термины "глубинограмма" и "толщинограмма".

Тепловая дефектометрия (на основе формул (4.9), т.е. синтезе максиграмм и таймограмм) приведена на рис. 5.8 (см цветную вкладку). Углепластиковая панель толщиной 2 мм имела ребра жесткости на задней поверхности, два расслоения и одну зону утонения материала (рис. 5.8, а). Термограмма в оптимальный момент времени показана на рис. 5.8, б. С помощью

программы ThermidgePro получены глубинограмма и толщинограмма изделия, приведенные на рис 5 8, в, г. В бездефектной области глубинограммы пиксельное значение равно 2 мм, что соответствует толщине изделия (на толщинограмме соответствующее значение равно нулю). Толщина материала в зоне утонения была равна 1 мм, что хорошо соответствует пиксельному отсчету на глубинограмме, равному 0,94 мм (следует заметить, что соответствующий отсчет на толщинограмме не имеет смысла ввиду того, что принятая модель не описывает утонения). Наконец, глубина обоих расслоений составила 1,3 мм, что было подтверждено разрушением изделия.

Формулы дефектометрии, будучи примененными к зашумленным экспериментальным данным, могут приводить к нереалистичным оценкам дефектных параметров. Поэтому на практике вначале определяют зоны интереса (Regions of Interest – ROI) и устанавливают соответствующие пороговые значения, как это сделано в случае данных на рис 5 8, хотя при этом возможен пропуск малых дефектов.

5.8. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СКРЫТОЙ КОРРОЗИИ

Количественная оценка локальной коррозии (уноса материала) есть одно из направлений дефектометрии и выделена в отдельный параграф ввиду практической важности этого приложения. ТК В п 2 7 3 была приведена простая формула (2 41) инверсии экспериментальных данных $\Delta L/L = 1 - T_{nd}/T_d$, позволяющая оценивать относительный унос материала $\Delta L/L$ по контрасту температуры T_{nd}/T_d . Формула хорошо работает в случае тонких изделий, прежде всего металлических, в которых размеры зон коррозии существенно превышают толщину изделий.

Более общий подход к оценке коррозии был описан в работе [55]. При уменьшении размеров зон коррозии диффузия тепла в поперечных направлениях начина-

ет снижать амплитуду сигнала ΔT и размывать его форму. Таким образом, точность оценки $\Delta L/L$ по формуле (2 41) зависит от момента наблюдения и отношения поперечного размера зоны коррозии к толщине изделия h/L . При малых значениях h/L существует момент времени, когда погрешность оценки коррозии минимальна, поэтому ее следует производить тогда, когда разность температур $\Delta T(\tau)$ в зоне коррозии и в бездефектных зонах достигает максимума. Ориентировочно это происходит при

$$\tau = (0,5 - 2)L^2/a, \quad (5 17)$$

причем значение численного коэффициента возрастает с ростом теплопроводности материала.

Для учета трехмерной диффузии тепла в формулу (2 41) вводят поправочные коэффициенты, которые зависят от видимого размера зоны коррозии.

5.9. ИК-ТЕРМОГРАФИЯ НА ТЕПЛОВЫХ ВОЛНАХ

5.9.1. Синхронная оптическая стимуляция. Как отмечалось выше, периодические тепловые волны проникают тем глубже в твердое тело, чем ниже их частота. Тем не менее, дефекты определенного типоразмера могут потребовать оптимизации зондирующей частоты. В классической фототермии (photothermal radiometry) используют тепловые волны высоких частот, типичная глубина проникновения которых не превышает долей миллиметра. Снижение частоты и получение тепловых изображений большого формата при поточечной схеме сканирования потребовало бы недопустимо длинных времен контроля, например получение изображения изделия, состоящего из 320×240 точек при реалистичном времени анализа каждой точки 10 с составило бы 9 суток.

С появлением компьютерной ИК-термографии стал возможным ТК доста-

точно больших площадей путем синхронизации полученных пиксельных отсчетов с периодической функцией нагрева (равномерный нагрев больших зон) Метод тепловых волн в ИК-термографическом контроле предложен Д. Карломаньо и П. Берарди еще в 1976 г. [56] и практически усовершенствован другими исследователями [57–61]. Метод получил название *синхронной оптической термографии* (optical lock-in thermography). Очевидно, что его наилучшие возможности реализуются при обработке данных в фазовой области. Фазограммы получают с помощью преобразования Фурье, однако запатентованная Г. Буссе и др. технология контроля предусматривает более простой способ, при котором исходную последовательность термограмм заменяют четырьмя эквидистантными изображениями S_{1-4} , а фазограммы синтезируют согласно выражению [57]

$$\Phi = \arctg \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \quad (5.18)$$

Использование отношения амплитуд позволяет существенно снизить влияние неоднородного нагрева на результаты ТК, что вообще характерно для фазовой обработки тепловизионных сигналов. Коммерческая аппаратура, реализующая данный метод, в течение некоторого времени выпускалась германским филиалом фирмы AGEMA Infrared Systems (ныне FLIR Systems), однако большого распространения не получила, в том числе и ввиду отсутствия явных преимуществ по сравнению с процедурой импульсного ТК. Тем не менее, лабораторные исследования ИК-термографии на тепловых волнах продемонстрировали ряд ее полезных свойств, например, возможность оценивать структурную целостность больших участков фюзеляжей самолетов, которые в силу непланарной геометрии подвержены сильному влиянию неоднородного нагрева при стандартной процедуре импульсного на-

грева [58] (следует отметить, что обработка сигнала во временной области приводит к тем же результатам, что и частотный анализ). Для нагрева использовали 6 ламп мощностью 1 кВт каждая, излучение которых модулировали с частотой 0,015 Гц. Расслоения между стрингерами и корпусом обнаруживали в течение 4 мин при обследовании зоны площадью до нескольких кв. м. Метод позволил получить информативное изображение горизонтального стабилизатора самолета Do-328 с расстояния 3 м, хотя идентификация скрытых дефектов потребовала тщательного анализа отдельных термограмм. Аналогичная система ТК была использована для оценки теплового сопротивления контакта двух металлов: чугуна (2 мм) – алюминия (3 мм) [61]. Частоту модуляции изменяли от 0,01 Гц до нескольких Гц, запись термограмм производили с частотой 15 Гц в течение 20–200 с. Полученные результаты были достаточно обнадеживающими для того, чтобы сделать вывод о перспективности использования данного метода для оценки теплового сопротивления между прокладкой и блоком цилиндра в двигателях внутреннего сгорания.

5.9.2. Синхронная ультразвуковая стимуляция (периодическая и импульсная). Оптимальная стимуляция объекта в ТК должна повышать его температуру только в случае наличия дефекта. Подобную процедуру можно реализовать при ультразвуковом (УЗ) возбуждении материалов, поскольку источником существенного повышения температуры является внутреннее трение стенок дефектов при их облучении УЗ-волнами. При этом удается реализовать как принцип оптимального нагрева, так и преимущества метода синхронизации функции нагрева и регистрируемых температурных отсчетов. Данный метод разрабатывается независимо группой Г. Буссе (Штутгартский университет, Германия) под названием "*синхронная ультразвуковая термография*" (ultrasonic

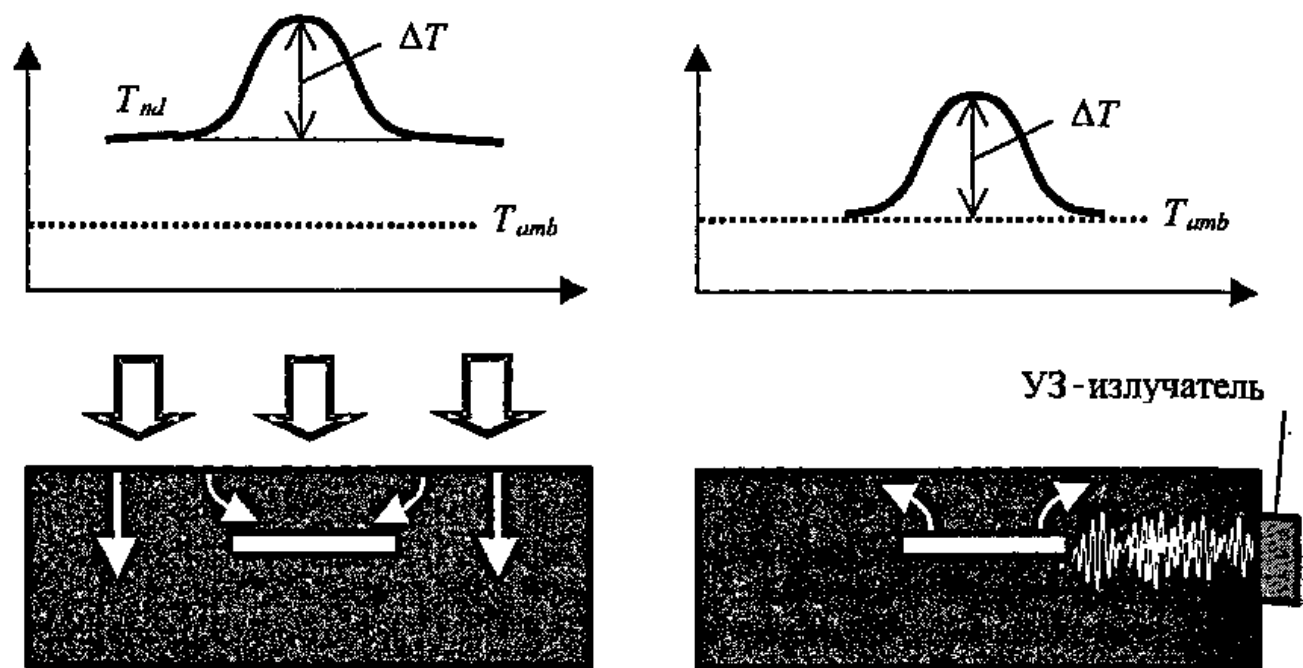


Рис. 5.9. Метод гелевых волн (ультразвуковая стимуляция)

lock-in thermography) [62–64], а также Р Томасом, Л Фавро и др (Университет Уэйна, США) [65], которые используют термин "звуковое ИК-видение" (sonic IR imaging), или "термозвуковой метод" (thermosonics)

Различие в способах поверхностного оптического и объемного УЗ-нагрева проиллюстрировано на рис 5.9 При поверхностном нагреве избыточный температурный сигнал возникает не только над дефектом, но и в бездефектных зонах, что приводит к появлению шумового текущего контраста, обусловленного неоднородностями поверхности. Ультразвуковая стимуляция создает преимущественно температурный сигнал только в зоне дефекта, а температура бездефектных участков остается близкой к температуре окружающей среды, что получило название "принцип темного поля" (dark field). В результате при прочих равных условиях возрастает вероятность правильного обнаружения дефектов (снижаются требования к квалификации операторов). Следует заметить, что форма температурного сигнала при УЗ-стимуляции далеко не всегда совпадает с формой сигнала, возникающей

при поверхностном нагреве (см рис 5.9), во многих случаях только отдельные участки внутренних дефектов генерируют заметное количество тепловой энергии вследствие трения стенок, поэтому топография поверхностного температурного сигнала может быть связана с зонами развивающихся трещин и не отражать уже "сложившихся" дефектов.

Авторами метода [63, 64] описана экспериментальная установка, в которой УЗ-возбуждение изделий осуществляли упругими волнами частотой 20 кГц и мощностью несколько сотен Вт, амплитуду которых модулировали с частотой до 1 Гц. Для регистрации температуры использовали тепловизор Jade II фирмы CEDIP (Франция), который обеспечивал запись термограмм форматом 320 × 240 частотой кадров до 200 Гц в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Время одного теста достигало 3 мин. Объектами исследования были композиционные материалы (углестеклопластики) и керамики, для которых продемонстрированы такие преимущества ультразвуковой стимуляции как селективность в отношении дефектов и эффектив-

ность использования энергии возбуждения. В частности, весьма эффективным оказалось обнаружение трещин и расслоений в стрингерах элеронов, изготовленных из углепластика, на частоте 0,4 Гц. Другим контролируемым материалом явился армированный углеродными волокнами карбид кремния, который используют в космических челноках, тормозах высокоскоростных поездов и т.п., т.е. там, где необходимо противостоять быстрым и мощным изменениям температуры.

Авторы исследования [63] полагают, что УЗ-стимуляция позволяет обнаруживать те зоны, где развиваются трещины, тогда как поверхностное оптическое возбуждение хорошо выявляет относительно большие участки с аномальными ТФХ. Применительно к заклепочным соединениям алюминиевых листов, широко применяемым в авиации, установлено, что обычные термограммы отражают влияние заклепок на транспорт тепловой энергии и малочувствительны к трещинам. Картина температурного поля при модулированной УЗ-нагрузке более привязана к относительным перемещениям соединенных листов под нагрузкой. В частности, при проверке данных вихретокового контроля, обнаружившего трещину вдоль ряда заклепок, УЗ-термография показала, что данная трещина хорошо выявляется на частоте 0,06 Гц (мощность УЗ-стимуляции 600 Вт) и по сравнению с вихретоковым контролем ее отметка имеет большую длину как на фазограмме, так и на модулограмме.

Дальнейшее повышение конкурентоспособности метода УЗ-термографии связано с увеличением вводимой энергии и, соответственно, расширением зоны контроля, которая в настоящее время составляет около 1 м² (в целом в течение нескольких минут удается проконтролировать несколько квадратных метров поверхности самолета). При выборе параметров УЗ-нагревателя необходимо пре-

дотвращать образование стоячих волн, в узлах которых возможен пропуск дефектов (на термограммах стоячие волны видны в виде регулярных полос).

Одним из основных недостатков метода периодической УЗ-стимуляции является необходимость сохранять хороший контакт между изделием и УЗ-стимулятором в течение нескольких минут, необходимых для проявления достаточно глубоких дефектов. Поэтому, по аналогии с оптическим возбуждением, предложено использовать для нагрева изделий короткие УЗ-импульсы (с определенной несущей частотой), а поверхностное температурное поле исследовать с помощью тепловизора на стадии охлаждения (phase angle thermography with ultrasound burst excitation) [64]. Экспериментальные результаты получены при обнаружении трещины, проходившей по ряду заклепок в алюминиевом стрингере авиационной панели. Длительность УЗ-импульса мощностью 2 кВт составляла 100 мс. Стадию охлаждения исследовали в течение 3 с при частоте записи термограмм 15 Гц. Трещина была видна при 270 мс вследствие трения ее стенок, однако интерпретация исходных термограмм была затруднена наличием шумов, а также нагревом изделия вблизи УЗ-системы. Оптимальные результаты получены в результате Фурье-обработки сигналов и формирования фазограмм.

Как и в случае поверхностного оптического нагрева, импульсное возбуждение позволяет стимулировать изделия на частотах, которые трудно или невозможно получить с использованием периодических тепловых волн. При этом можно построить большое количество фазограмм и модулограмм, соответствующих спектру Фурье импульса УЗ-стимуляции. Основным недостатком импульсного УЗ-возбуждения является необходимость прикладывать большую по сравнению с модулированным УЗ-сигналом мощность, что ставит под сомнение неразрушающий характер испытаний и требует дополнительных мер по обеспечению безопасности персонала.

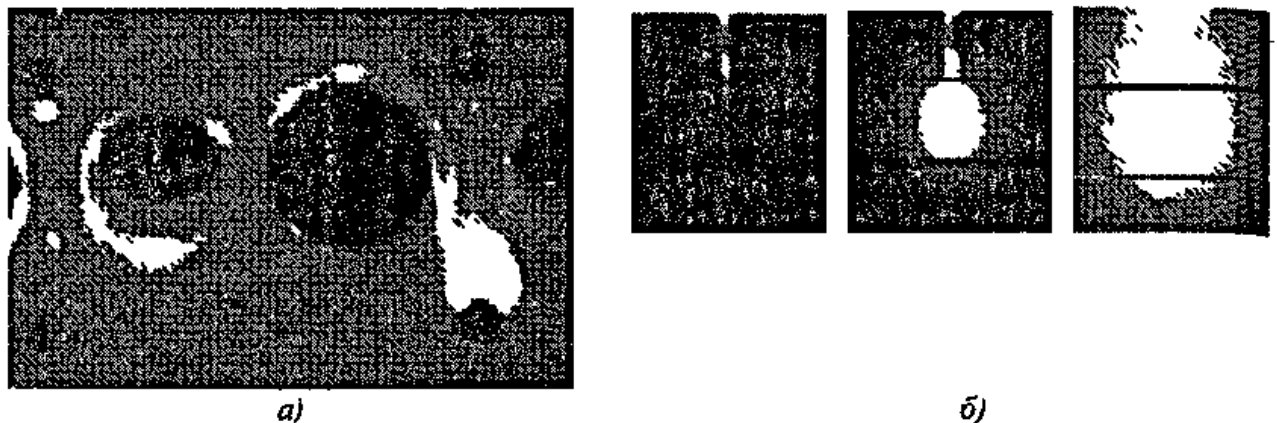


Рис. 5.10. Импульсная ультразвуковая ИК термография (данные Р. Томаса, США):

а – термограмма многочисленных трещин (светлые зоны) в алюминиевой панели блока цилиндра двигателя внутреннего сгорания, *б* – развитие трещины в зоне пропила в алюминиевой пластине толщиной 3 мм (длина трещины менее 1 мм)

В работе [63] приведены сравнительные данные по оптическому и импульсному УЗ-возбуждению при испытаниях изделий авиакосмической техники. Используются УЗ-импульсы мощностью до 600 Вт и длительностью 100 мс (несущая частота 20 кГц). Результаты УЗ-термографии признаны наиболее информативными при контроле композиционных материалов, керамических покрытий на турбинных лопатках и заклепочных соединений.

Исследования в Университете Уэйна направлены на обнаружение трещин при импульсном УЗ-возбуждении [65]. Используют "УЗ-пушку" для сварки (ultrasonic gun) фирмы Branson, которая генерирует импульс мощностью 1 кВт и длительностью 30–200 мс с несущей частотой 20 кГц. Импульс вводится путем прямого контакта через стальной рупор диаметром 1,3 см, используя иммерсионную пасту, процесс развития температуры наблюдают в течение нескольких секунд. Подповерхностные трещины проявляются в виде зон локального повышения температуры на фоне практически "холодного" изделия (см. рис. 5.10, *а*).

Особенно отчетливо эффекты генерации тепла в области трещин проявляются при записи последовательностей термограмм и их просмотре в виде ИК-фильма

(пример термограмм растущей трещины длиной 1 мм приведен на рис. 5.10, *б*).

Метод УЗ-термографии является перспективным, однако его особенности до сих пор изучены слабо, например, в некоторых случаях, где интуитивно следует ожидать возникновения динамических температурных сигналов, такие сигналы не регистрировались, по крайней мере, с помощью аппаратуры типа ThermoSonic фирмы Indigo Systems (см. табл. 7.1). Динамический отклик объекта контроля зависит от энергии возбуждения, способа закрепления объекта контроля и свойств материала. Частота УЗ-стимуляции должна быть близкой к собственным частотам изделия с целью повысить эффективность генерации тепла.

5.10. АППРОКСИМАЦИЯ И СГЛАЖИВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФУНКЦИЙ

Техника аппроксимации и сглаживания (fitting) пиксельных функций развития температуры во времени $T_p(\tau)$ становится все более популярной в силу следующих факторов:

- в результате сглаживания полностью подавляется высокочастотный шум;
- облегчается применение разнообразных математических операций, например, деления,

- последовательности ИК-изображений произвольной длительности заменяют изображениями коэффициентов разложения, число которых, как правило, не превышает шести, при этом сохраняется возможность восстановления исходной последовательности, не содержащей высокочастотного шума,

- параметры дефектов могут быть связаны с отдельными коэффициентами разложения подобно зависимостям компонент Фурье-спектра от глубины залегания дефектов

Идея подгонки температурных экспериментальных данных под соответствующие математические модели была использована П Верно еще в 1937 г в экспериментах по определению ТФХ мате-

риалов, включая человеческую кожу [2] Процедуры нелинейной фильтрации позволяют получить оптимальные оценки сразу нескольких параметров ТК, таких как размеры и глубина залегания дефектов, ТФХ, поглощенную энергию и интенсивность поверхностной теплоотдачи (см п 4 б)

В качестве аппроксимирующих функций используют комбинации экспоненциальных функций [66] и полиномы различной степени [67]

5.10.1. Полиномиальная аппроксимация. Вид аппроксимирующих функций может быть позаимствован из классических решений теории теплопроводности (табл 5 1)

5.1. Полиномиальная аппроксимация в ТК

Классическое решение, используемое в качестве ядра аппроксимации	Полиномиальное представление временного развития температуры
<p style="text-align: center;">Логарифмическая аппроксимация (ЛА)</p> <p>Адиабатический импульсный нагрев полуграниченного тела</p> $\frac{T}{W} = \frac{1}{e \sqrt{\pi \tau}}$ <p>T – поверхностная температура, W – плотность поглощенной энергии, $e = \lambda / \sqrt{a}$ – тепловая инерция, λ – коэффициент теплопроводности, a – коэффициент температуропроводности, τ – время</p>	$T(\tau) \rightarrow \ln(T) = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 +$ $(x = \ln(\tau))$ $T = e^{A_0 + A_1 x} \quad (x = \ln(\tau))$ <p style="text-align: right;">(5 19)</p>
<p style="text-align: center;">Квадратичная аппроксимация (адиабатический случай) (КАА)</p> <p>Адиабатический нагрев полуграниченного тела прямоугольным импульсом</p> $\frac{T}{Q/\lambda} = 2\sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} - 2\sqrt{\frac{a(\tau - \tau_h)}{\pi}},$ <p>τ_h – длительность нагрева</p>	$T(\tau) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2$ $(t = \sqrt{\frac{\tau}{\tau_h}} - \sqrt{\frac{\tau}{\tau_h} - 1})$ <p style="text-align: right;">(5 20)</p>

Продолжение табл 5 1

Классическое решение, используемое в качестве ядра аппроксимации	Полиномиальное представление временного развития температуры
<p style="text-align: center;">Квадратичная аппроксимация (неадиабатический случай) (КАНА)</p> <p>Неадиабатический нагрев полуограниченного тела прямоугольным импульсом</p> $\frac{T}{Q/h} = e^{H^2 a(\tau - \tau_h)} \operatorname{erfc}(H \sqrt{a(\tau - \tau_h)}) - e^{H^2 a \tau} \operatorname{erfc}(H \sqrt{a \tau}),$ <p>α – коэффициент теплоотдачи, $H = \alpha/\lambda$</p>	$T(\tau) = A_0 + A_1 \frac{1}{\sqrt{\tau}} + A_2 \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_h}} + A_3 \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} + A_4 \frac{1}{(\sqrt{\tau - \tau_h})^3} + A_5 (\sqrt{\tau})^3 + A_6 (\sqrt{\tau - \tau_h})^3 + A_7 (\sqrt{\tau})^5 + A_8 (\sqrt{\tau - \tau_h})^5$ <p style="text-align: right;">(5 21)</p>

Можно ожидать, что формулы в табл 5 1 расположены в порядке возрастания степени их пригодности для аппроксимации "бездефектных" температурных кривых. Тем не менее, на практике эффективность аппроксимации зависит от ряда дополнительных факторов формы импульса нагрева, интенсивности трехмерной диффузии тепла, зависимости коэффициента теплоотдачи от времени и, в особенности, от наличия отраженного излучения и остаточного нагрева после выключения оптических нагревателей. Простейшая графическая иллюстрация относится к методу логарифмической аппроксимации. В п 4 1 было показано, что изменение температуры в адиабатической бездефектной области после воздействия импульса Дирака описывается прямой линией в координатах $\ln(T) - \ln(\tau)$, а отклонения экспериментальной функции от прямой линии могут рассматриваться в качестве сигналов от внутренних дефектов.

Точность аппроксимации при использовании метода наименьших квадратов определяется критерием "хи-квадрат" χ^2

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \left[\frac{T_k - T_f(\tau = \tau_k)}{\sigma_k} \right]^2, \quad (5 22)$$

где T_k – экспериментально измеренное значение температуры в k -й точке, T_f – значение аппроксимирующей функции в момент времени τ_k , σ_k – стандартное отклонение температуры в k -й точке.

На практике часто принимают, что величина стандартного отклонения во всех точках постоянна. Тогда оценка точности аппроксимации примет вид

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N [T_k - T_f(\tau = \tau_k)]^2 \quad (5 23)$$

Неочевидно, что аппроксимирующая функция, обеспечивающая минимальное значение χ^2 , является оптимальной для ТК.

В табл 5 2 приведены результаты аппроксимации температурных функций как для бездефектных (БД), так и для дефектных (Д) зон углепластикового образца толщиной 1 мм (воздушное расслоение на глубине 0,5 мм). Видно, что для трех алгоритмов в табл 5 2 не существует системы формирования знака и величины полиномиальных коэффициентов для обеих зон, поэтому применение этих коэффициентов для тепловой дефектометрии представляется затруднительным.

5.2. ТК углепластика толщиной 1 мм (воздушное расслоение толщиной 0,1 мм на глубине 0,5 мм, нагрев в течение 1 с, шаг записи 0,1 с; полное время контроля 10 с; анализируется только стадия охлаждения)

Алгоритм	Зона	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
ЛА	Д*	-0,056	-0,145	0,0359	0,0156	-0,0099	-0,002	0,00082
$\chi^2 = 2,2 \cdot 10^{-7}$	БД**	-0,231	-0,045	0,0266	-0,015	-0,0024	0,0012	-0,0001
КАА	Д	-0,241	13,9	-73,2	197	-271	182	-46,5
$\chi^2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$	БД	0,148	6,82	-31,7	82	-126	111	-42,8
КАНА	Д	4,98	-0,0094	0,575	-48,7	-39,5	4,48	0,225
$\chi^2 = 1,3 \cdot 10^{-9}$	БД	-0,49	0,00676	-0,348	42,0	33,7	-2,43	-3,12

*Д – дефектная зона, **БД – бездефектная зона

При анализе набора полиномиальных коэффициентов можно провести определенную аналогию со спектральным анализом коэффициенты более низкого порядка несут больше "спектральной энергии", тогда как коэффициенты более высокого порядка ответственны за малые отклонения $T(i, j, \tau)$ от "нормального" поведения

Нормализация данных. Важной характеристикой алгоритма ЛА является автоматическая нормализация данных при формировании изображений полиномиальных коэффициентов порядка выше A_0 . На рис 5 11 приведены результаты логарифмической аппроксимации данных, полученных при моделировании процесса ТК иконы на дереве (См цветную вкладку) Красная зона на поверхности образца моделирует двойной уровень поглощения излучения нагрева по сравнению с черной зоной (рис 5 11, а) Шесть дефектов расположены на двух глубинах 1 и 2 мм Интерпретация результатов контроля таких изделий затруднительна вследствие "пятнистого" характера термограмм В частности, изображение коэффициента A_0 (рис 5 11, б) сохраняет все особенности исходных термограмм, тогда как изображение A_1 выравнивает амплитуды сигнала

сигнала в обеих зонах, выполняя нормализацию данных

В отличие от алгоритма ЛА, алгоритм КАА оперирует с истинными температурами и измененной шкалой времени, поэтому он не обеспечивает нормализации данных Например, изображения обоих коэффициентов A_0 и A_1 отражают эффекты неоднородного нагрева (рис 5 12, а, б) дереве (См цветную вкладку) Наилучшая "видность" всех шести дефектов имеет место в изображении коэффициента A_2 (рис 5 12, в), тогда как изображение коэффициента A_6 на рис 5 12, г характеризуется весьма искаженными "отпечатками" дефектов, иллюстрируя такую важную черту изображений полиномиальных коэффициентов как изменение знака сигналов от дефектов, расположенных на различных глубинах

Выявляемость дефектов. После выполнения того или иного алгоритма полиномиальной аппроксимации дальнейшую обработку можно применять как к восстановленной последовательности, очищенной от шумов, так и к изображениям коэффициентов $A_k(i, j)$, $A_1(i, j)$, $A_2(i, j)$ Как отмечалось выше, полиномиальные коэффициенты можно до некоторой степени отождествить с компонентами спектра

5.3. Характеристики обнаружения трех дефектов в иконе на дереве

Изображение	S
Изображение A_2 (КАА, полином 2-й степени)	3,3
Изображение A_1 (КАА, полином 2-й степени)	2,5
Изображение A_3 (КАА, полином 4-й степени)	0,8 *
Изображение A_2 (ЛА, полином 2-й степени)	2,6
Изображение A_1 (ЛА, полином 2-й степени)	0,2 *
Изображение A_3 (ЛА, полином 4-й степени)	0,8 *
Изображение χ^2 (полином 1-й степени)	3,8
Максиграмма	4,4

* Низкие значения S объясняются тем, что при полиномиальной аппроксимации дефекты могут выглядеть как "теплее", так и "холоднее" фона

частот, поэтому следует ожидать, что выявление дефектов определенного вида можно улучшить, анализируя изображения определенных коэффициентов. Результат будет зависеть от выбранного коэффициента и общего числа коэффициентов, использованных для аппроксимации. Трехмерный график на рис 5 13 изображает зависимость отношения сигнал/шум S от степени полинома и номера коэффициента при обнаружении самого глубокого дефекта 1 в иконе, термограмма которой показана на рис 5 14, а (См цветную вкладку) Нагрев в течение 5 с тепловым потоком с плотностью энергии 3 кВт/м² повышал температуру поверхности иконы на 7–10 °С. Икона содержала ряд искусственных и естественных дефектов, расположенных в первом слое гипса толщиной 2,2 мм. Согласно графику на рис 5 13, оптимальные условия обнаружения обеспечиваются изображением коэффициента A_1 при выборе полинома 3-й степени. Соответствующее изображение приведено на рис 5 14, б

Выше отмечалось, что полиномиальная аппроксимация низкой степени хорошо описывает эволюцию температуры в

бездефектных зонах, тогда как полином более высокой степени пригоден для анализа дефектных зон. Отсюда следует, что, согласно выражению (5 23), изображение, содержащее значения критерия χ^2 в отдельных пикселях, также должно показывать дефекты. Очевидно, что значения χ^2 должны быть больше в зоне более "мощных" дефектов вследствие более сильных отклонений от "бездефектного" поведения. Изображение χ^2 (i, j) на рис 5 14, в соответствует максимальному значению $S = 9,9$ при выявлении наиболее глубокого дефекта 1. В данном случае критерий χ^2 определен для разности между экспериментальной последовательностью и аппроксимирующим полиномом 1-й степени.

Одно из отличий изображений полиномиальных коэффициентов, так же как фазограмм спектра Фурье, от термограмм состоит в том, что сигналы от физических однотипных дефектов могут иметь различные знаки в зависимости от глубины дефектов. Это создает трудности при оценке степени оптимальности изображений коэффициентов. Например, в табл. 5

приведены значения отношения сигнал/шум S для всех трех дефектов, которые обнаруживаются с помощью ТК в иконе на дереве (рис 5 14, а) 1) разница в значениях S для изображений χ^2 и A_2 , хорошо заметная на рис 5 14, уменьшается, если рассмагивать все три дефекта. 2) дефекты на изображениях коэффициентов могут выглядеть как "теплее", так и "холоднее" фона, поэтому, несмотря на то, что эти дефекты надежно обнаруживаются, значения S , усредненные по всем дефектам, могут быть низкими, если при расчете S использованы не абсолютные значения ΔT (рис 5 15, а), 3) самое большое значение S обеспечено максимумом (рис 5 15, б) (См цветную вкладку)

"Безэталонная" томография. Эффективность "классической" тепловой томографии, описанной в п 5 3 зависит от степени однородности нагрева или качества нормализации входных данных, поскольку необходимо выбирать эталонное значение температурного сигнала

Очевидно, что любые количественные оценки невозможны без эталона, тем не менее можно ввести в рассмотрение тепловую модель поведения температуры в бездефектных зонах, которая будет одной и той же для всех пикселей изображения. При этом анализу подлежат только отклонения экспериментальных значений температуры от значений, предписанных моделью

Для модели ТК иконы на дереве (рис 5 14) "классические" значения температурных сигналов T и ΔT , рассчитанные для косинусоидального импульса нагрева, показаны на рис 5 16, а. Максимальное значение $\Delta T_m = 0,45$ °C имеет место при $\tau^* = \tau_m = 6,8$ с. Эволюция бездефектных и дефектных сигналов во времени была аппроксимирована с помощью двух полиномов 2-й и 6-й степени, дифференциальный сигнал был определен как $\Delta T_{yf} = T^{(6)}_{yf} - T^{(2)}_{yf}$, где верхний ин-

декс обозначает степень полинома. Очевидно, что такая операция может быть применена к каждому пикселю и не требует выбора эталонной точки (предполагается, что полином 2-й степени описывает эволюцию бездефектных значений температуры, а полином 6-й степени дополнительно описывает отклонения сигнала в дефектных областях). Соответствующие кривые показаны на рис 5 16, б, включая значение $\Delta[\Delta T_{df} - \Delta T_{ndf}]$, максимум которого, равный $0,16$ °C, имеет место при $\sqrt{\tau/\tau_h} - \sqrt{(\tau/\tau_h) - 1} = 0,34$, что соответствует $\tau = 13,5$ с, если считать от начала нагрева, или $\tau = 8,5$ с, если считать от окончания импульса нагрева. Поскольку во временном развитии дифференциального сигнала возникают локальные экстремумы (рис 5 16, б), обусловленные наличием скрытых дефектов, данный подход может быть использован для осуществления "безэталонной" томографии

Принцип безэталонной томографии рассмотрим на примере анализа искусственной последовательности на рис 5 11. Термограммы данной последовательности отличаются существенной неоднородностью нагрева. Алгоритм $\Delta T_{yf} = T^{(6)}_{yf} - T^{(2)}_{yf}$ применен к каждому пикселю, причем полученные зависимости сигнала от времени аналогичны рис 5 16, б. На рис 5 17, а показана тепловая томограмма слоя, который содержит дефекты на различных глубинах (См цветную вкладку). Эталонным значением служит нулевой уровень сигнала, поскольку соответствующие функции, аналогично рис 5 16, б, уже являются дифференциальными. Выбранный слой можно разделить на два слоя, чтобы показать семейства дефектов, расположенных на различных глубинах (рис 5 17, б, в). Данные на рис 5 17, а, б получены без введения амплитудного порога. Томограммы рис 5 17, г-е получены с помощью классического алгоритма тепловой томографии с использованием поро-

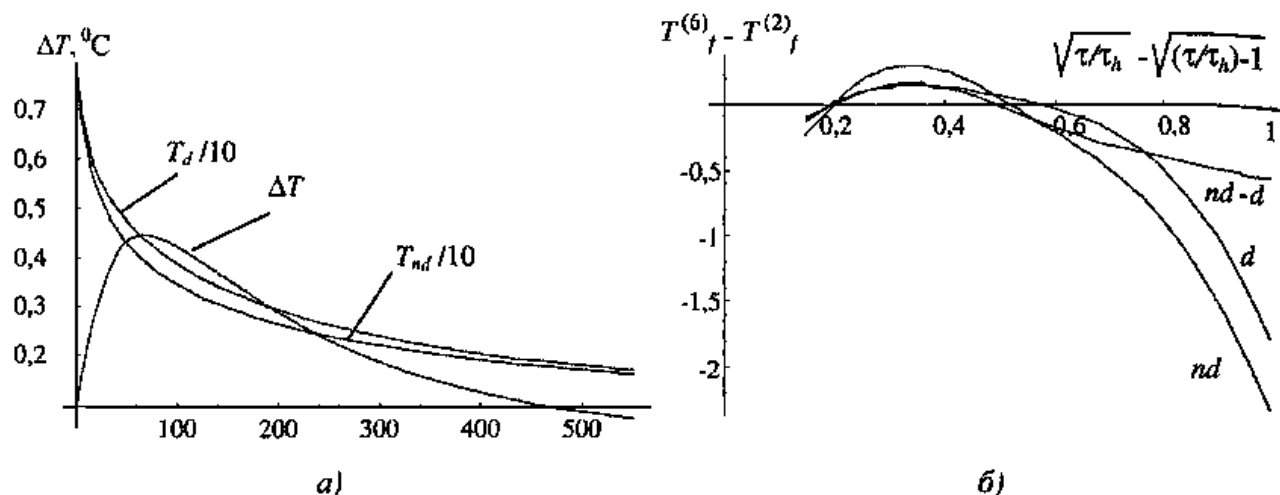


Рис. 5.16. Изменение дифференциальных сигналов во времени при ТК иконы на дереве

($Q = 3000 \text{ Вт/м}^2$, $\tau_h = 5 \text{ с}$, $L = 20 \text{ мм}$, глубина дефекта 2,2 мм, толщина дефекта 0,2 мм)

а – сигналы T и $\Delta T(\tau)$, б – сигналы $T_f^{(6)} - T_f^{(2)}$ (КАА алгоритм)

говой отсечки сигнала, что является стандартной процедурой при анализе зашумленных данных. Томограмма рис 5 17, г аналогична томограмме рис 5 17, а. Видно, что "классическая" томограмма содержит артефакты, которые имеют место как вокруг дефектов ("корона"), так и в зоне перехода между двумя областями с различной поглощенной энергией. Изображения дефектов, расположенных под зоной перехода, также больше искажено в "классической" томограмме. Соответственно, томограмма на рис 5 17, д аналогична томограмме рис 5 17, б. Данная томограмма содержит большое число ложных сигналов, поскольку при ее формировании не был введен амплитудный порог. Использование порога существенно улучшило качество изображения (см рис 5 17, е).

5.10.2. Экспоненциальная аппроксимация (тонкие теплопроводные изделия). Температурный отклик на передней поверхности тонких теплопроводных изделий после воздействия прямоугольного импульса (или импульса Дирака) может быть аппроксимирован функцией (4 7)

$$T^F(\tau) = \beta_1 e^{-\beta_2 \tau} + \beta_3 e^{-\beta_4 \tau}, \quad (5 24)$$

причем коэффициенты β_3 и β_4 связаны соответственно с глубинами залегания дефектов l и их тепловыми сопротивлениями R_d . Таким образом, возможно построение изображений данных коэффициентов, в которых пиксельные значения будут отражать значения соответствующих дефектных параметров [66].

5.10.3. Временные производные и "синтетическая" обработка данных импульсного ТК. При одностороннем импульсном ТК температурные сигналы над типичными дефектами на стадии охлаждения изменяются медленнее, нежели в бездефектных зонах, из-за менее интенсивного отвода тепла в глубь изделия через дефект. Поэтому, наряду с анализом температурных функций $T(\tau)$, представляет интерес исследование временного развития первой $(\partial T(\tau)/\partial \tau)$ и второй $(\partial^2 T(\tau)/\partial \tau^2)$ производной от температуры по времени. Преимущества производных как чисто математических функций очевидны, тем не менее, С Шепард и др сделали попытку объяснить их роль с точки зрения анализа диффузии тепла [67]. Разработанный авторами подход не является абсолютно строгим, однако он лег в основу метода *синтетической обработки* (synthetic processing) данных импульсного ТК

который реализован в коммерческой аппаратуре фирмы Thermal Wave Imaging

Согласно данному методу, в бездефектных зонах тепловой поток, не возмущенный влиянием дефектов, является однородным и описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (5.25)$$

решение которого для поверхности равномерно нагреваемого полуограниченного тела имеет канонический вид (см табл. 2.4)

$$T(z=0) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (5.26)$$

Над слаботеплопроводным дефектом, тепловой поток попадает в своего рода "ловушку" и начинает преимущественно распространяться в поперечных направлениях в сторону более низких "бездефектных" температур. Тогда диффузию тепла в дефектных зонах можно считать двумерной согласно уравнению

$$\nabla_{x,y}^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (5.27)$$

Таким образом, происходит условное разделение трехмерного процесса диффузии тепла на "нормальную" и "поперечную" фазы. Переход из одной фазы в другую связан с концепцией оптимального времени наблюдения (optimal observation time, peak slope time), причем в рамках метода синтетической обработки время наблюдения определяют по поведению производных.

Поскольку применение операции взятия производной от зашумленной функции увеличивает шум (за счет расширения частотного спектра сигнала), существенным моментом метода является полиномиальная аппроксимация экспериментальных функций $T(\tau)$ с использованием ЛА аппроксимации. Логарифмическое представление 1) снижает влияние конечной длительности импульса нагрева, 2) приводит поведение "бездефектных" пикселей к линейной функции с наклоном $-0,5$, 3) действует как фильтр низких час-

тот, подавляя высокочастотный шум ИК системы и оставляя неизменными низкочастотные эффекты, связанные с дефектами. Вторым шагом процедуры является восстановление последовательности с помощью определенных полиномиальных коэффициентов по формуле (5.19). Это дает следующие преимущества:

1) "синтетические" функции $T(\tau)$ свободны от высокочастотных шумов,

2) к ним легко применимы операции взятия производных, интегрирования, преобразования Фурье и т.п.,

3) характерные точки во времени развития синтетического сигнала могут анализироваться алгебраически,

4) за счет использования небольшого числа полиномиальных коэффициентов обработка данных проходит быстрее и сами данные требуют меньше компьютерной памяти.

Несмотря на то, что данный метод обработки данных ТК применим в основном к металлическим изделиям с покрытиями и без них, а отношение сигнал/шум через цепочку предлагаемых операций до конца не исследовано, синтетическая обработка сигнала позволила получить весьма качественные изображения внутренней структуры ряда объектов контроля, например, турбинных лопаток, алюминиевых панелей самолетов и т.п.

5.11. НОРМАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕРМОГРАММ

В ТК термин *нормализация* означает деление динамических термограмм с целью подавить эффект неравномерного нагрева. Этот термин появился в работах А. Деджиованни и позднее был использован в программе ThermidgePro. Различают два типа нормализации: 1) нормализация всех изображений в последовательности на выбранное изображение, которое называют "нормализующим", 2) трехмерную (3D) нормализацию, которая предусматривает деление двух последовательностей, из которых одна является экспериментальной, а вторая – расчетной.

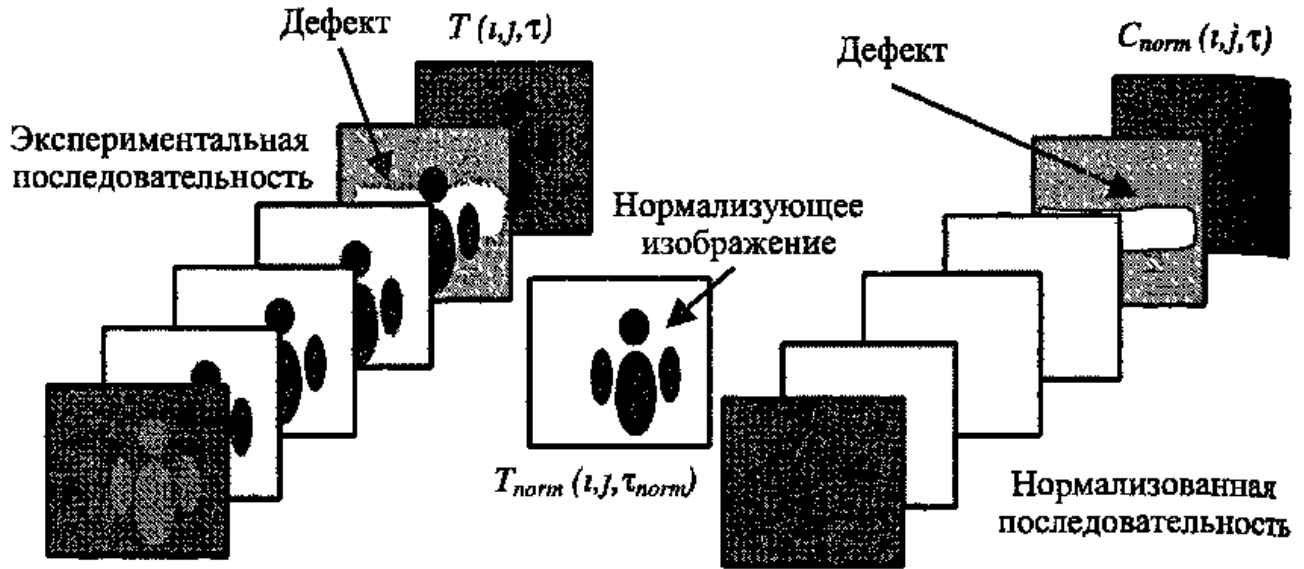


Рис. 5.18. Нормализация динамической последовательности на одно изображение

5.11.1. Нормализация на одно изображение. Пусть в импульсной процедуре ТК (длительность нагрева τ_h) зарегистрирована последовательность ИК-изображений $T(i, j, \tau)$. Во многих случаях оптимальной будет процедура ТК, при которой дефекты проявляются только на стадии охлаждения, т.е. когда $\tau_m > \tau_h$. Формула нормализации на одно изображение имеет следующий вид

$$C_{norm}(i, j, \tau) = \frac{T(i, j, \tau) - T_{amb}(i, j)}{T_{norm}(i, j, \tau_{norm}) - T_{amb}(i, j)}, \quad (5.28)$$

где $C_{norm}(i, j, \tau)$ – нормализованный контраст, $T_{amb}(i, j)$ – начальная температура, которая в общем случае может изменяться от точки к точке, $T_{norm}(i, j, \tau_{norm})$ – нормализующее изображение. Видно, что нормализованный контраст фактически представляет собой отношение между двумя избыточными температурами. Если нормализующее изображение выбрано таким образом, что поверхностные сигналы от внутренних дефектов еще не успели развиться, то в идеальном случае все нормализованные изображения должны пред-

ставлять собой равномерный фон с температурными отпечатками от дефектов в моменты времени, близкие к τ_m . Например, при импульсном ТК, в качестве нормализующей часто выбирают термограмму в конце нагрева. Схема нормализации на одно изображение показана на рис. 5.18.

Пример нормализации последовательности термограмм, зарегистрированной при импульсном ТК углепластикового композита, представлен на рис. 5.19. (См. цветную вкладку). В конце нагрева исходная термограмма показывает неравномерный нагрев двумя лампами, из которых более мощный поток создается левой лампой (см. верхнюю левую термограмму на рис. 5.19). Температурный отпечаток неравномерного нагрева сохраняется до момента оптимального контроля $\tau = \tau_m$. Нормализация проведена на термограмму конца нагрева ($\tau = \tau_h$). При этом нормализованный контраст при $\tau = \tau_h$ становится равным единице (см. нижнее левое изображение), в то время как нормализованная термограмма при $\tau = \tau_m$ показывает дефекты более отчетливо по сравнению с исходной.

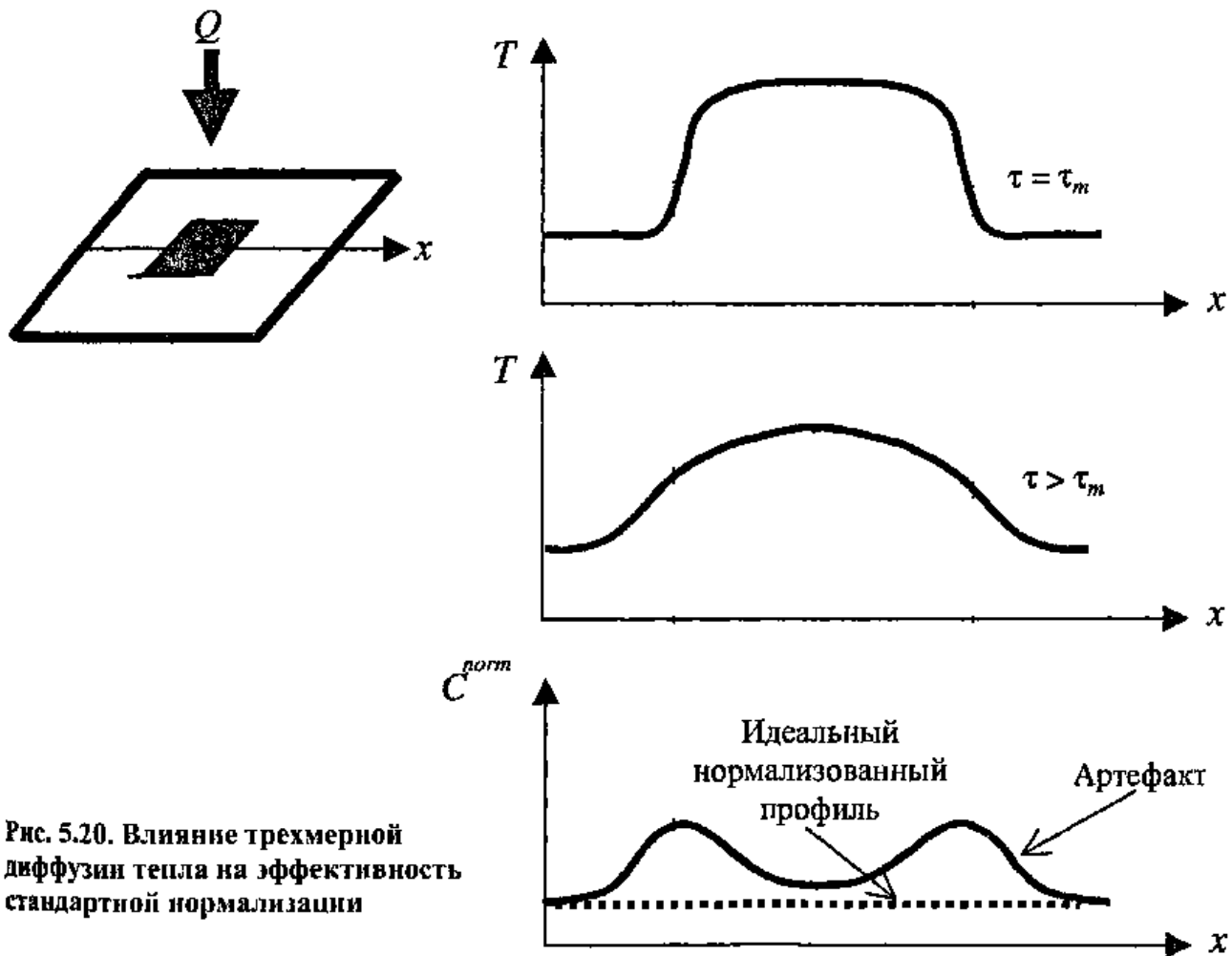


Рис. 5.20. Влияние трехмерной диффузии тепла на эффективность стандартной нормализации

5.11.2. Трехмерная нормализация. Опыт применения процедуры нормализации показал, что она дает приемлемые результаты в тех случаях, когда поверхность объекта контроля является более или менее однородной, а неоднородным является сам поток нагрева. В тех случаях, когда на контролируемой поверхности имеются области с различной поглощающей способностью, на их границах возникает диффузия тепла в "поперечном" направлении, что снижает эффективность стандартной нормализации. Вышесказанное проиллюстрировано температурными профилями на рис. 5.20. Пусть на поверхности изделия, например настенной фрески, имеется зона с высокой поглощающей способностью (темного цвета), которая в конце оптического нагрева представляет собой зону повышенной температуры с достаточно четкими границами. С течением времени температурный про-

филь становится более сглаженным за счет диффузии тепла. Поэтому при делении (нормализации) соответствующих профилей температуры на границах указанной зоны возникают артефакты, которые могут оператором восприниматься как сигналы от скрытых дефектов. При этом профиль нормализованного контраста C^{norm} может существенно отличаться от ожидаемого однородного профиля, изображенного на рис. 5.20 пунктиром.

Сущность способа *трехмерной нормализации* состоит в том, что используют не одно нормализующее изображение, например, при $\tau = \tau_h$, а последовательность изображений, составляющих "бездефектную реплику" основной экспериментальной последовательности. Нормализующую последовательность синтезируют теоретически, рассчитывая ожидаемое изменение температуры поверхности бездефектного объекта контроля, причем в

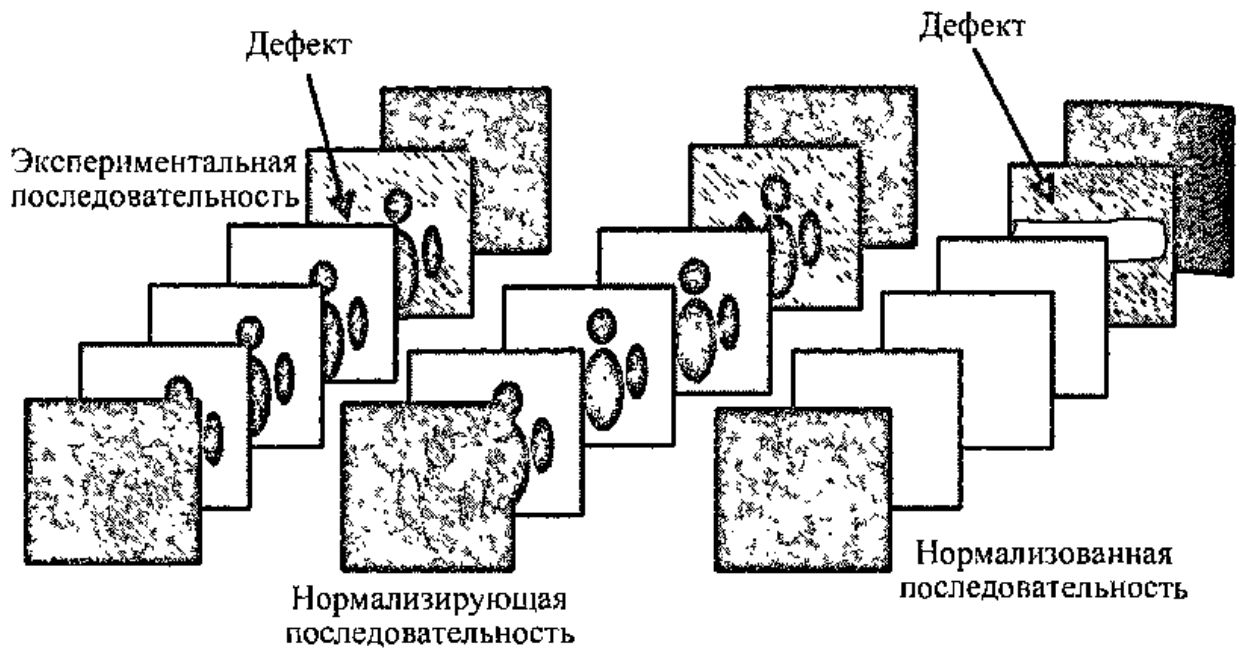


Рис. 5.21. Нормализация динамической последовательности на другую последовательность (трехмерная нормализация)

качестве маски нагрева $Q(t, j)$ используют одно из изображений экспериментальной последовательности, в котором скрытые дефекты еще не проявились, например, при импульсном нагреве в качестве маски нагрева выбирают термограмму $T(t, j, \tau_h)$. Иными словами, при трехмерной нормализации производят деление двух последовательностей, из которых одна является экспериментальной и содержит как развивающиеся во времени сигналы от скрытых дефектов, так и сигналы, обусловленные неоднородным поглощением и диффузией тепла, а вторая последовательность является расчетной и отражает только эффекты неоднородного поглощения и диффузии тепла (рис 5.21)

Трехмерная нормализация доказала свою эффективность в ТК пастенных фресок, при оптическом нагреве которых получают существенно неоднородные термограммы. Пример соответствующей обработки данных описан в главе 9

5.12. МЕТОД ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

5.12.1. Непрерывный нагрев. Метод движущегося непрерывного источника

существует во многих модификациях. Его основной особенностью является то, что нагрев осуществляют в локальной зоне, сканируя объект контроля от точки к точке путем непрерывного взаимного перемещения источника и объекта. При этом нагрев является трехмерным, что позволяет обнаруживать дефекты типа трещин, расположенные перпендикулярно к исследуемой поверхности. В НК чаще используют непрерывный мощный нагрев в зоне малого размера или в полосе, причем измерение температуры также производят либо в точке (см рис 1.3, а), либо вдоль строки сканирования (см рис. 1.3, б). Профили температуры по оси движения источника можно рассматривать в системе координат, связанной как с объектом контроля (рис 5.22, а), так и с источником нагрева (рис 5.22, б). В качестве дефектограммы используют термограмму, привязанную к движущемуся источнику (рис 5.22, б). При этом все точки поверхности находятся в условиях идентичного нагрева, и локальные измерения температуры обусловлены либо флуктуациями излучательно-поглощательных свойств материала, либо наличием дефектов. В частности, поверхностные и приповерхност-

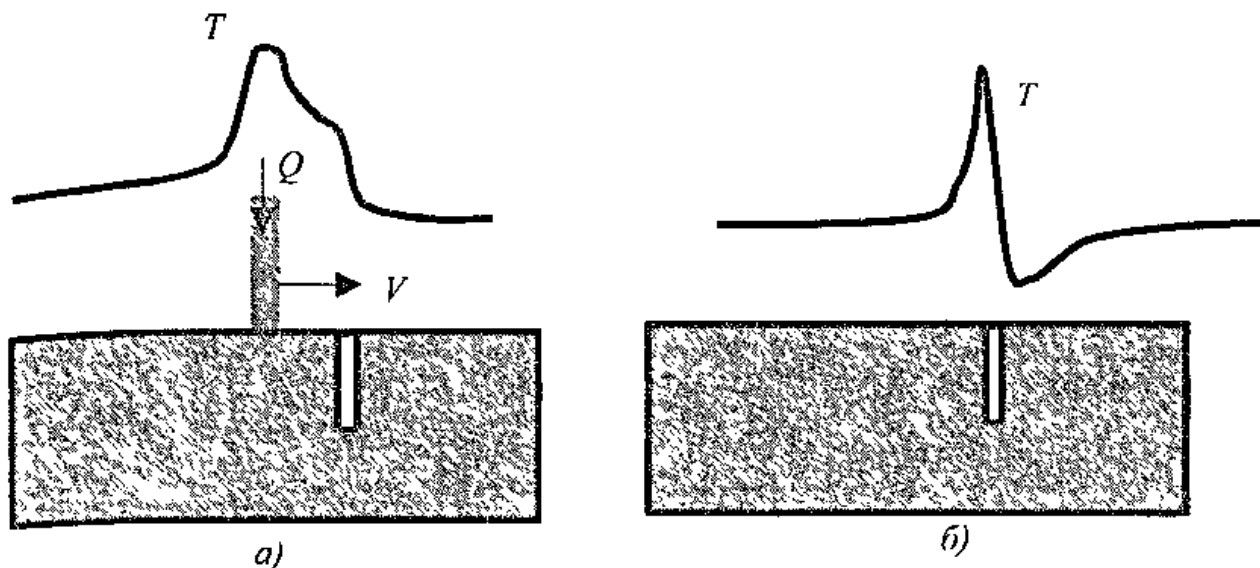


Рис. 5.22. Профили температуры в методе движущегося источника:
 а – система координат объекта контроля, б – система координат источника нагрева

стные трещины, расположенные перпендикулярно поверхности нагрева, накапливают тепловую энергию и повышают температуру перед трещиной, соответственно за трещиной возникает дефицит тепловой энергии и температура понижается (рис 5.22, б)

Аналогично случаю равномерного нагрева прямоугольным импульсом, в методе движущегося источника существует оптимальный момент наблюдения (время задержки) τ_m , который зависит от температуропроводности материала и глубины залегания дефекта. Основным критическим параметром данного метода является расстояние между зоной нагрева и зоной регистрации температуры b , определяемое как:

$$b = V \tau_m \quad (5.29)$$

Значение времени задержки τ_m можно приближенно определить, используя решение задачи нагрева широким распределенным импульсом, хотя с уменьшением размера реальной зоны нагрева погрешность будет возрастать и более корректные оценки можно получить, решая задачу нагрева пластины с дефектом движущимся источником тепла определенной конфигурации (см п 3.4). В качестве кажущегося парадокса следует заметить, что

в теплопроводных материалах с неглубоко лежащими дефектами оптимальная точка наблюдения может лежать *впереди* источника нагрева (за счет опережающей теплопроводности), при этом значения времен задержки τ_m , обычно отсчитываемые от начала нагрева, будут отрицательными.

Скорость взаимного перемещения источника нагрева и изделия может изменяться в широких пределах (от долей миллиметра до нескольких метров в секунду) в зависимости от ТФХ материала и требуемой глубины зондирования. Соответственно, тепловые дефектоскопы могут реализовывать оптико-механическое или механическое сканирование. Например, в способе "летающего пятна" как нагрев, так и регистрацию температуры осуществляют синхронно с помощью качающихся зеркал [68]. В качестве нагревателя используют лазер непрерывного действия, однако в силу высокой скорости сканирования средняя мощность, поглощенная изделием, остается незначительной. Исследования образцов строительных материалов толщиной несколько сантиметров проводили при весьма малой скорости сканирования (способ "ползущего пятна" [69]). При ТК композиционных материалов скорость сканирования может составлять несколько сантиметров в секунду.

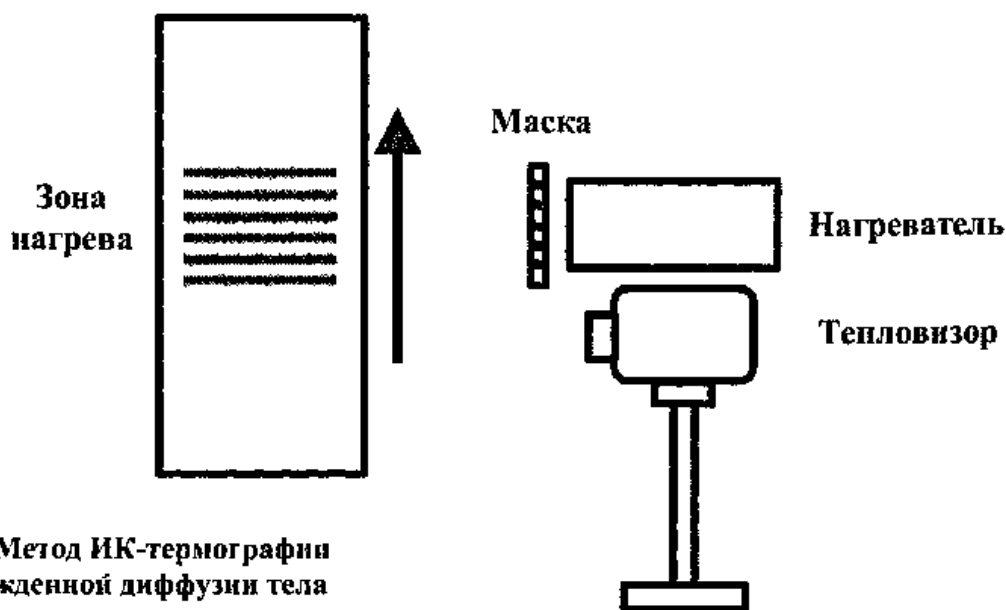


Рис. 5.23. Метод ИК-термографии при вынужденной диффузии тела

Метод движущегося источника является селективным по отношению к параметрам дефектов, в особенности, по отношению к глубине их залегания, поэтому обеспечение оптимальных условий обнаружения различных дефектов может потребовать неоднократного повторения процедуры. На практике для выявления дефектов по всей глубине объекта зачастую достаточно выбрать b оптимальным для самого глубокого дефекта. Другим способом решения этой проблемы является совмещение полосового нагревателя и тепловизора. При этом в буферную память записывают сразу несколько столбцов текущих термограмм, расположенных параллельно полосе нагрева, что позволяет получить результирующие термограммы (дефектограммы) в системе координат источника нагрева для нескольких времен задержек t_m .

Наилучшей чувствительностью к внутренним дефектам обладает способ с использованием мощного сосредоточенного пучка нагрева по схеме рис. 13, а, незаслуженно забытый в силу низкой производительности испытаний. Компромиссным способом является сочетание полосового нагрева со строчным сканированием. Этот способ с успехом разрабатывали В.А. Стороженко и Д.А. Рапопортом

с сотрудниками применительно к испытаниям стеклопластиковых цилиндрических изделий, выполненных способом намотки [70]. При этом обнаруживали расслоения между слоями композита на глубине до 10–15 мм. В последние годы интерес к движущемуся полосовому нагреву вновь возрос, главным образом, благодаря исследованиям группы У. Уинфри (NASA, США) [71].

Преимущества полосового нагрева: 1) высокая эффективность ввода тепла за счет близкого расположения нагревателя к контролируемой поверхности, 2) большая равномерность нагрева, 3) более низкая стоимость строчно-сканирующей системы регистрации температуры по сравнению с тепловизионной. В последнее время появились системы, где температуру регистрируют с помощью тепловизора, что позволяет за один проход формировать термограммы при различных временах задержки (такие термограммы получают, записывая последовательность термограмм с выхода тепловизора и выбирая соответствующие колонки (строки) данных). При этом может перемещаться как вся система ТК относительно неподвижного объекта, так и объект в поле зрения системы.

Экспериментальная установка, разработанная в NASA (США), включает теп-

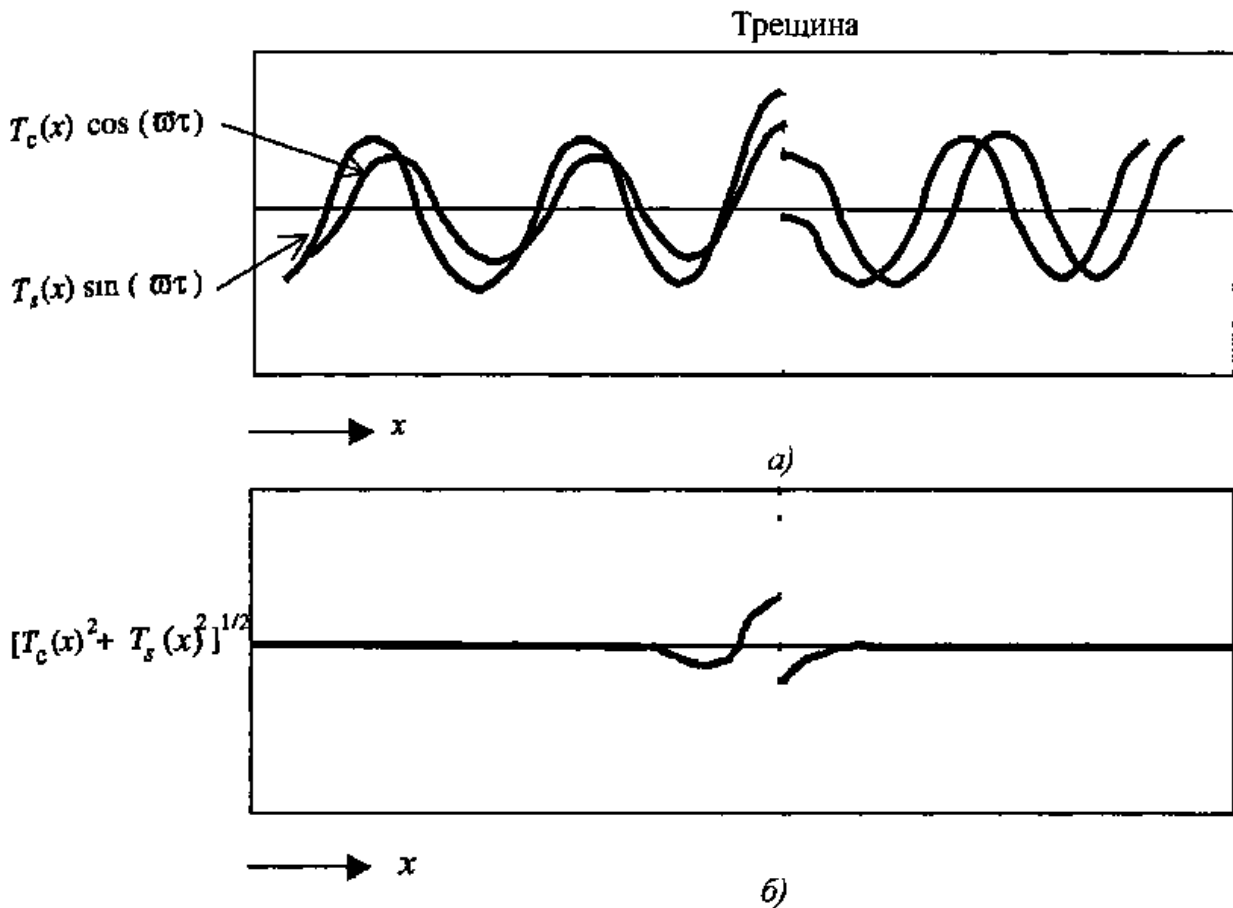


Рис. 5.24. Способ вынужденной диффузии тепла в применении к пластине с трещиной (адаптировано из [72])
а – временная компонента, б – амплитудная компонента

ловизор формата 256×256 на базе охлаждаемого фотодетектора из антимонида индия. Прибор обеспечивает температурное разрешение $0,025^\circ\text{C}$ при частоте кадров до 60 Гц [71]. В качестве полосового нагревателя применена кварцевая лампа мощностью 1 кВт с эллиптическим рефлектором. Максимальная скорость контроля составляет $30,5\text{ см/с}$, при этом типичная избыточная температура нагрева не превышала 10°C . Система ТК размещена на коммерческом сканирующем столе и управляется компьютером. Термограммы, получаемые для фиксированного времени задержки, состоят из 256 пикселей в вертикальном направлении и до 1200 пикселей вдоль направления сканирования.

Недавно предложен оригинальный способ "решетчатого" нагрева с использованием сразу нескольких параллельных полос нагрева, что позволило дополни-

тельно модулировать температурный сигнал [72]. Способ получил название *термографии при вынужденной диффузии тепла* (forced diffusion thermography – FDT). Сущность его состоит в том, что поток излучения распределенного нагревателя, например лампы мощностью 500 Вт, проектируется на контролируемую поверхность через маску специальной, чаще всего решетчатой, формы. Объект контроля перемещается в поле зрения тепловизора (рис. 5.23). Пространственно-временные частоты маски можно оптимизировать для дефектов определенного типа. Тепловой поток, обусловленный движущимся линейчатый нагревателем, описывается формулой [72]

$$Q(x, \tau) = \frac{I}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x + \omega\tau)], \quad (5.30)$$

где I – плотность мощности излучения нагревателя, η – плотность линий в мас-

ке, ω – временная частота. Тепловой поток на расстоянии x осциллирует с частотой ω и сдвигом фазы $2\eta\pi x$

Пространственный градиент теплового потока также подвержен гармоническим колебаниям вида

$$\frac{\partial}{\partial x} Q(x, \tau) = \eta\pi l \cos(2\eta\pi x + \omega\tau) \quad (5.31)$$

Движущееся температурное распределение линейчатого типа анализируют с помощью дифференциальных ИК-камер, которые регистрируют приращения температуры относительно среднего уровня (см также п. 5.14.1). Все точки получаемого изображения характеризуются определенной фазой. Разлагая гармоническую функцию в (5.31), можно показать, что линейчатое температурное распределение есть суперпозиция синфазной пространственной косинусоидальной компоненты и внефазной временной синусоидальной компоненты

$$Q(x, \tau) = \frac{l}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x) \cos(\omega\tau) + \sin(2\eta\pi x) \sin(\omega\tau)] \quad (5.32)$$

При появлении в движущемся поле нагрева трещины все компоненты температурного поля испытывают отклонения от регулярного характера, что обеспечивает ее обнаружение (рис. 5.24). Сравнение температурных профилей на рис. 5.22 и 5.24 показывает, что различия между способом ТК движущимся локализованным источником и способом вынужденной диффузии того же порядка, как между импульсным и гармоническим нагревом.

5.12.2. Фототермический метод (тепловые волны и импульсный нагрев). В методе классической фототермии с использованием периодических тепловых волн сканирование является дискретным, причем в каждой точке, с целью выхода на квазистационарный режим, необходимо возбуждать до десяти периодов тепловых волн. Этот метод применяют для тонких

высокотеплопроводных материалов, где частота тепловых волн может достигать нескольких кГц. Глубина проникновения волн таких частот составляет десятки микрометров, размер анализируемой зоны того же порядка, а размер зоны нагрева может быть на порядок больше для того, чтобы создать плоские тепловые волны и использовать решения соответствующих одномерных задач. В результате анализируют лишь небольшие участки изделий. Фототермический метод комбинирует преимущества трехмерного зондирования и фазового анализа, позволяя профилировать ТФХ изделий по глубине. Основные области применения: 1) НК покрытий различного типа (лакокрасочных, гальванических и т.п.), 2) измерение толщины слоя закалки сталей.

Пример фототермической микроскопической системы изображен на рис. 5.25 [73]. Нагрев изделия в пятне диаметром 1 мм^2 производят арговым лазером, интенсивность которого модулируют акустооптическим устройством. Тепловое излучение нагретой точки регистрируют с помощью ИК-радиометра в пятне площадью несколько десятков кв. мкм.

С помощью данного микроскопа измеряли глубину науглероживания

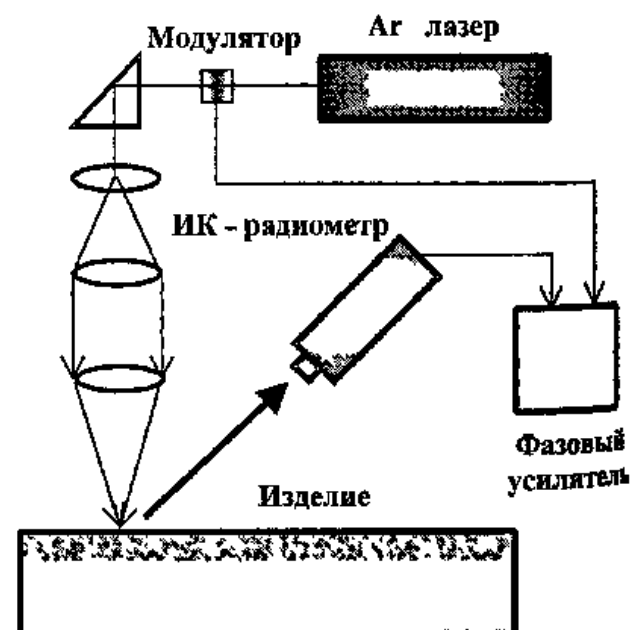


Рис. 5.25. Схема фототермического микроскопа

стали 20MnCr5 по заранее полученным калибровочным зависимостям, а также оценивали качество связи Ni-Pd защитного покрытия толщиной 1,2 мкм на подложке из медного сплава толщиной 0,3 мм

В схеме рис 5 25 может быть реализован импульсный поточечный нагрев изделия с заменой частотного анализа фазовым в Фурье-пространстве

В последнее время разработана комбинация классической фототермии и ИК-термографии [74] Схема экспериментальной установки аналогична рис 5 25, но вместо ИК-радиометра используют ИК-камеру, например, с растром 320×240 пикселей и размером отдельной точки на поверхности изделия 30×30 мкм Такая установка была использована для идентификации коэффициента теплопроводности и оптического пропускания эпоксидного слоя толщиной 40 мкм, нанесенного на подложку из алюминия толщиной 1,5 мм

5.13. КОМБИНИРОВАНИЕ ТК И ДРУГИХ МЕТОДОВ НК (СИНТЕЗ ДАННЫХ)

Комбинирование ТК с другими видами (методами) НК целесообразно, если 1) ТК выполняет роль скринингового метода, предваряя результаты испытаний с помощью более точных методов НК, 2) экспериментальная аппаратура характеризуется общими элементами, 3) синтез результатов контроля различными методами НК приводит не к их механическому сложению, а к новому качеству

Комбинирование первого типа возможно, например, при НК авиационных панелей на предмет выявления воды в солах, а также ударных повреждений и расслоений в композитах С помощью ТК подлежат выявлению подозрительные зоны, после чего их тщательный контроль проводят, например, УЗ-методом Аналогичным образом контролируют заклепочные соединения алюминиевых авиацион-

ных панелей, причем в качестве основного метода НК выступает вихрегоковый контроль

Комбинирование второго типа имеет место, например, при использовании ТК и лазерной интерферометрии, одна из разновидностей которой получила в англоязычной литературе название *ширографии* (shearography) В России соответствующий метод назван *теплоголографией* Ширография использует технику лазерной интерферометрии для регистрации механических смещений поверхности объекта контроля, вызванных скрытыми дефектами Образцы нагружают, создавая перепад давления, а также применяя тепловую или механическую (вибрационную) стимуляцию Бездефектные зоны являются более жесткими по сравнению с дефектными, поэтому в односторонней процедуре возникает типичное интерферометрическое изображение, в котором пиксельные амплитуды пропорциональны смещениям В целом, эффективность ширографии ухудшается для толстых и/или жестких образцов Тем не менее, в ряде случаев, например применяя стимуляцию перепадом давления, удается обнаружить достаточно глубокие дефекты Особенности ТК и лазерной интерферометрии позволяют разработать аппаратуру испытаний, в которой объект контроля нагружают оптическим импульсом и одновременно регистрируют по двум каналам тепловое и голографическое изображения В табл 5 4 приведено сравнение двух методов применительно к изделиям авиакосмической техники, которое, несмотря на существенную субъективность, доказывает преимущество комбинированной техники Коммерческая аппаратура, комбинирующая оба метода, производится фирмой Laser Technology, США

Комбинирование данных третьего типа связано с новым подходом к неразрушающим испытаниям в областях, характеризующихся сложностью и разнообразием объектов контроля Подразумевается, что результат *синтеза данных* (data fusion) не является простым суммированием результатов по отдельным методам, а

**5.4. Сравнительная характеристика ТК и голографической
интерферометрии применительно к изделиям авиакосмической техники ***
(данные Д Берли, США)

Материал (дефект)	ТК	Интерферометрия
Угле- и стеклопластики (тонкие)	++	+
Угле- и стеклопластики (толстые)	+	-
Неотвержденные композиты	++	+
Композиционная обшивка/металлические соты	++	+
Композиционная обшивка/неметаллические соты	+-	++
Тонкие слои резины на твердых подложках	+	+
Тонкие слои резины на других подложках	-	+
Изделия из резины (шины)	+	+
Металлическая обшивка/металлические соты	++	+
Блестящие металлические поверхности	-	+
Матовые поверхности	+	+
Вода в сотах	+	-
Смятие ячеек сот	-	+
Слипание стенок ячеек металлических сот	+	+-
Инородные включения в композитах	+	-
Изменения толщины обшивки и ячеек сот	+	+-
"Целующиеся" (kissing) дефекты	+-	+
Пористость	+-	+

*Метод пригоден ++ Наилучший метод - Метод непригоден +- Удовлетворительный метод.

создает новое качество Концепция слияния данных, полученных с помощью различных сенсоров, хорошо известна в военной технике В НК первые работы датированы 1994 г [75], однако наибольшее число публикаций относится к последнему пятилетию [76, 77]

В авиакосмической промышленности синтез данных был применен для трех взаимодополняющих методов НК УЗ, радиографического и широкографического [76] Поскольку эти методы различны по реализуемым физическим принципам, расшифровка изображений должна осуществляться обученными операторами, которые способны идентифицировать отмеченные аномалии либо как дефекты, либо как артефакты При последовательном применении данных методов временные и

финансовые затраты на неразрушающие испытания существенно возрастают. Этого можно избежать путем слияния данных и получения результирующего изображения, которое будет однократно обрабатываться, анализироваться и классифицироваться В работе [76] предложен автоматический алгоритм слияния данных, который основан на сравнении изображений, полученных с помощью каждого метода НК, с моделью проконтролированного изделия, созданной методом компьютерного проектирования (Computer-Aided Design - CAD) Основные шаги процедуры

- предварительная обработка индивидуальных изображений с целью исключить их возможные искажения,
- выбор признаков на основе компьютерной модели с целью получить на-

бор базовых признаков для последующего сравнения индивидуальных изображений и компьютерной модели,

- обнаружение признаков в каждом индивидуальном изображении согласно набору, полученному на основе компьютерной модели,

- первичное сопоставление признаков для предварительной подгонки признаков индивидуальных изображений и признаков, полученных на основе компьютерной модели,

- окончательная подгонка вышеуказанных признаков,

- структурное разложение (декомпозиция) "подогнанных" изображений объекта контроля на отдельные зоны, каждая из которых характеризуется своей структурой,

- слияние (fusion) множественных признаков изображений в пространстве вейвлет-преобразования (см п 5 б)

Этапы слияния данных рассмотрены ниже на конкретном примере

Искажение изображений может происходить в процессе испытаний как вследствие геометрии контроля, так и в силу факторов электронного происхождения. Кроме того, из-за значительной площади объектов НК в авиакосмической промышленности, контроль выполняют от зоны к зоне с последующим составлением мозаичных изображений, что также требует использования специфических компьютерных программ. В работе [76] приводятся УЗ (единичное), радиографическое (3 подобласти) и широкографическое (32 подобласти) изображение сотовой панели самолета. В УЗ-изображении хорошо наблюдаются участки различной толщины, слабо проявляются отслоения внешней обшивки от сот, но не видна ячеистая структура сот. Радиографическое изображение обладает высоким пространственным разрешением, отчетливо показывает структуру сот, но практически нечувствительно к расслоениям. Ширографическое изображение отчетливо обнаруживает

расслоения, сопровождающиеся смятием внутренних ячеек

В качестве признаков трехмерной каркасной модели для панели, контроль которой описан в [76], были выбраны отрезки прямых линий, инвариантные к перспективным искажениям. Выбор тех или иных отрезков зависел от каждого индивидуального изображения, в котором эти отрезки хорошо выделялись.

Обнаружению признаков в индивидуальных изображениях предшествовали следующие процедуры: фильтрация, устранение несущественных деталей и бинаризация. Прямолинейные сегменты в бинарных изображениях определяли, используя итеративный алгоритм Хау (Hough).

Затем набор прямолинейных сегментов, полученный из индивидуальных изображений, сравнивали с набором, определенным на основе каркасной модели, минимизируя ошибку подгонки.

После того, как каждое индивидуальное изображение, полученное с помощью определенного метода НК, было подогнано под соответствующую компьютерную модель, в нем были выделены отдельные зоны, соответствующие участкам объекта контроля, которые различаются материалом, толщиной, формой и т.п.

В вышеупомянутом примере, в сотовой панели были выделены три зоны: тонкая углепластиковая структура, толстая сотовая структура и переходные зоны.

Целью слияния изображений является обеспечить оператору возможность анализировать данные НК в интегрированной форме для их более простой и надежной интерпретации. Техника слияния изображений должна

- сохранять информацию, полученную каждым методом НК,
- предотвращать появление ложных дефектов,
- исключать шумы,
- представлять многомодальные признаки таким образом, чтобы они могли

быть легко идентифицированы обученными операторами

Окончательное слияние данных можно проводить попиксельно, однако это не всегда приводит к оптимальным результатам. В частности, предложено использовать для этой цели дискретное вейвлет-преобразование, которое позволяет представлять характерные признаки изображений с помощью вейвлет-коэффициентов в компактной форме. После надлежащего слияния вейвлет-коэффициентов возможен обратный переход к окончательному изображению.

Тепловые изображения могут быть эффективно сопоставлены с оптическими, радиографическими, ультразвуковыми и др. Можно предположить, что весьма эффективным будет сопоставление тепловых и интерферометрических изображений, полученных в единой процедуре контроля (теплоголография). В частности, такая процедура может быть применена к изделиям авиакосмической техники, причем нагревание объекта можно осуществлять с помощью оптического нагревателя, а результаты измерения температуры и механических смещений получать по двум каналам тепловизионному и интерферометрическому. Преимущество слияния соответствующих изображений состоит в том, что ТК весьма чувствителен к приповерхностным дефектам, а интерферометрия во многих случаях лучше выявляет заглубленные дефекты.

В работе [77] описан ряд алгоритмов слияния данных вихретокового и ИК-контроля ударного повреждения в углепластике, которые основаны на попиксельном сравнении соответствующих полутоновых 8-битовых изображений, приведенных к одному формату. Подчеркивается, что корректный подход к слиянию данных должен включать статистическую оценку надежности того или иного метода НК применительно к испытаниям конкретной продукции. Так, например, процедура ТК ударного повреждения, описанная в [77], не являлась оптимальной

ввиду чрезмерно длительного нагрева. Более надежными явились результаты вихретокового контроля, что проявилось при статистическом слиянии данных. Простейшим алгоритмом слияния данных является способ *максимальной амплитуды* из двух изображений выбирают пиксель, характеризующийся большей амплитудой. Более надежные данные были получены при *логическом слиянии* данных с помощью оператора AND, а также при *усреднении амплитуд* в некоторой маске, выбранной одновременно на обоих изображениях.

5.14. АНАЛИЗ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

5.14.1. Принципы вибротермографии и термоупругой эмиссии (анализ термоупругих напряжений). Тепловизионный анализ термоупругих напряжений основан на том факте, что при механической сжатии или расширении в твердых телах возникают температурные градиенты, обусловленные процессами преобразования механической энергии в тепловую. Если механическая нагрузка действует в пределах упругости материала и скорость ее изменения велика, то потери тепла за счет теплопроводности малы и после снятия нагрузки изделие возвращается к первоначальной форме и температуре. В этом случае процесс является практически обратимым. Например, температурные сигналы в стали, обусловленные термоупругими деформациями, при циклической нагрузке 1 МПа составляют около 10^{-3} °C.

В 90-х годах прошлого века получил распространение термин "*вибротермография*" (vibrothermography) как особая процедура ТК, предназначенной для оценки скрытых структурных неоднородностей материалов по их поверхностным температурным полям при циклическом механическом нагружении.

Одновременно появился метод *анализа нагрузок по тепловой эмиссии* (Stress

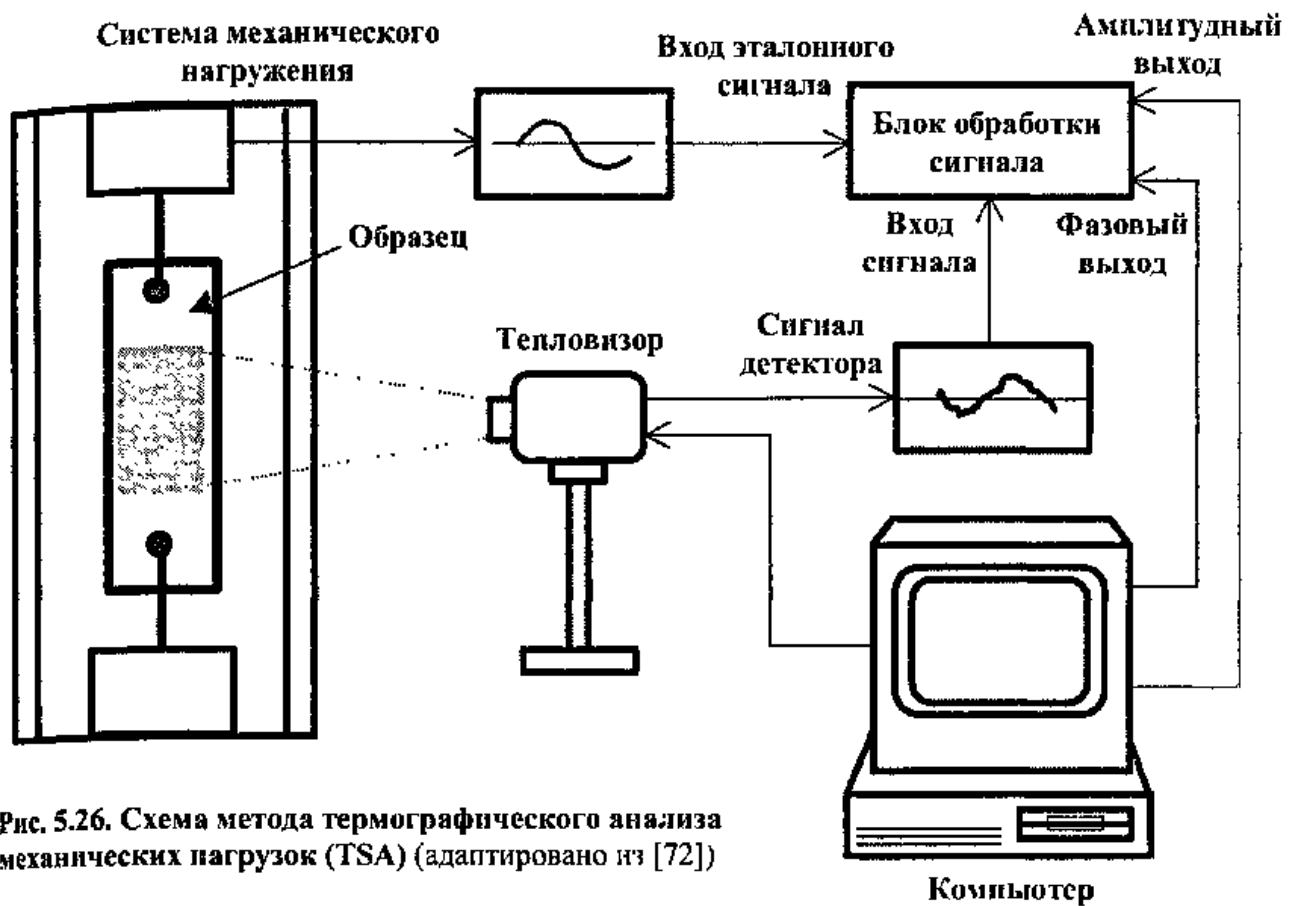


Рис. 5.26. Схема метода термографического анализа механических нагрузок (TSA) (адаптировано из [72])

Pattern Analysis by Thermal Emission – SPATE), или просто *термографического анализа нагрузок* (Thermographic Stress Analysis – TSA). Метод основан на использовании феномена термоупругости, который связывает динамические изменения температуры и механических нагрузок. Схема метода изображена на рис. 5.26.

Впервые связь изменений температуры с механическими нагрузками была получена У. Томсоном в 1853 г.:

$$\frac{\delta T}{T_0} = -\frac{\beta \delta I_1}{\rho C_p} = -K \delta I_1, \quad (5.33)$$

где δT – циклическое изменение температуры; T_0 – абсолютная температура образца; β – коэффициент линейного расширения, $1/K$; δI_1 – изменение суммы основных нагрузок (stress); C_p – теплоемкость при постоянном давлении; K – константа термоупругости.

Амплитуда температурных сигналов, обусловленных термоупругостью, состав-

ляет от тысячных до сотых долей градуса, причем эти сигналы определяются только суммой главных нагрузок I_1 . Для анализа механических напряжений используют дифференциальные термографические-ИК системы. Для повышения чувствительности метода дифференциальные температурные сигналы усредняют во времени, а также применяют метод синхронизации, причем эталонный сигнал генерируется датчиком механических напряжений. Тогда тепловизионная система синтезирует два типа новых изображений, находящихся как в фазе, так и вне фазы с эталонным сигналом. Очевидно, что карта механических напряжений соответствует синфазному изображению.

Из уравнения (5.33) видно, что δT не зависит от среднего уровня нагрузок, тем не менее, недавние исследования показали, что константа термоупругости зависит от нагрузок; это объясняется зависимостью модуля упругости материалов от температуры [78].

Уточненный вид уравнения термоупругости, связывающего скорости измене-

ния температуры и нагрузки в однородном "гуковском" материале при адиабатических граничных условиях, был предложен А. Вонгом с соавторами в 1988 г. [79]:

$$\rho C_v \frac{\partial T / \partial \tau}{T} = - \left[\beta + \left(\frac{\nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) I_1 \right] \times \\ \times (\partial I_1 / \partial \tau) + \left[\frac{(1 + \nu)^2}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right] \times \\ \times \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} (\partial \sigma_{ii} / \partial \tau), \quad (5.34)$$

где T – термодинамическая температура, К; σ_{ii} – главные напряжения; I_1 – сумма главных напряжений, Па; C_v – теплоемкость при постоянном напряжении (strain), Н · м/(К · кг); E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона. В отличие от классического уравнения термоупругости (5.33), в уравнении (5.34) модули упругости являются функцией температуры, в результате чего эффективное значение величины K дается выражением

$$K = \left(\beta - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma_m \right) (\rho C_v)^{-1}, \quad (5.35)$$

где σ_m – средняя нагрузка. Важным выводом, полученным на основе анализа уточненного уравнения термоупругости (5.34), является то, что температурный отклик материала, подвергнутого чисто гармоническому нагружению с частотой ω , содержит две компоненты с частотами ω и 2ω . Первая гармоника температурного отклика есть функция амплитуды циклических нагрузок и средней нагрузки, тогда как вторая гармоника определяется квадратом амплитуды нагрузки. Следовательно, анализируя обе гармоники, можно определить как амплитуду циклических нагрузок, так и среднюю нагрузку. Экспериментальные результаты, полученные в рамках уточненной концепции термоупругости с помощью ИК-термографии, приведены в работе [79].

5.14.2. Анализ развития трещин в концепция локального механического резонанса. Циклическое механическое нагружение дефектных изделий приводит к появлению в их объеме специфического распределения температуры, причем особенно интенсивная генерация тепловой энергии будет иметь место в зонах структурных неоднородностей. Процесс образования температурных градиентов зависит от частоты механического нагружения, что приводит к концепции *локального механического резонанса* [80]. Например, на определенных частотах нагружения расслоения в композиционных материалах вибрируют несинфазно с основным материалом, поэтому анализ соответствующих резонансных частот поставяет информацию о размерах и глубине залегания дефектов.

Метод термографического анализа напряжений особенно полезен при исследовании развития трещин. Известно, что наибольшие напряжения концентрируются в зоне головки растущей трещины, где возникает область пластической деформации, характеризующаяся локальным повышением температуры. Элементы теоретического анализа напряжений в головке трещины и ряд экспериментальных результатов описаны в работах [80, 81].

5.14.3. Анализ разрушения металлов. Промышленные установки зачастую подвержены циклическим (знакопеременным) нагрузкам, или деформациям. Детали установок могут иметь конфигурацию, вызывающую такую концентрацию механических напряжений в отдельных зонах, которая превосходит предел упругости, в результате чего снижается прочность (срок службы) соответствующих изделий. Прогрессирующее ухудшение прочностных характеристик вследствие воздействия переменных нагрузок называют *усталостью* (fatigue).

Энергия пластической деформации играет важную роль в процессе усталости. Усталостные трещины, как правило, начинают развиваться в зонах поверхностных

дефектов, поэтому особое значение приобретает анализ поверхностных напряжений, а также поверхностных процессов энергообмена, для чего используют тепловизионные методы. В России термодинамический подход к анализу процесса разрушения развивает Г.А. Куриленко [82], во Франции большой объем исследований выполнен М. Люонгом [83].

Будучи подверженными циклическому нагружению, металлы могут разрушаться при напряжениях, меньших, чем в условиях статических нагрузок, вследствие усталости. Напряжение разрушения уменьшается с ростом числа циклов согласно кривой Велера, которую строят в координатах "напряжение - число циклов". Иными словами, материал может сохранять свои прочностные характеристики только в течение определенного числа циклов нагружения, после чего он разрушается.

Данные по прочностным характеристикам часто получают при скручивании образцов, в результате чего максимальные напряжения возникают в поверхностном слое. Природа разрушения локальна в том смысле, что усталостная трещина возникает в определенной точке образца и, развиваясь, может привести к отказу, даже если остальной материал изделия сохраняет высокую прочность.

Энергия пластической деформации (на один цикл нагрузки) ΔW есть площадь под кривой гистерезиса, а полная

энергия за N циклов равна $W_f = \sum_{i=1}^N \Delta W_i$.

Феномен усталостного разрушения характеризуется невозможностью энергии пластической деформации, причем каждый материал поглощает энергию до определенного предела, после чего происходит его усталостное разрушение. В экспериментах с контролируемой нагрузкой усталостное разрушение иногда определяют в терминах длины трещины. Если контролируют деформацию, то усталостное разрушение определяют через пиковую нагрузку.

Было замечено, что энергия ΔW существенно не изменяется с увеличением числа циклов. Тем не менее, если циклическая нагрузка полностью обратима, деформация зависит от предыстории образца, поэтому величина ΔW также изменяется в течение времени жизни изделия. Для размягчающихся материалов величина пластической деформации и энергия деформации ΔW , приходящаяся на один цикл, возрастают, тогда как материалы, становящиеся более твердыми, характеризуются уменьшением этих величин. В переходном режиме энергия пластической деформации и средняя величина деформации за цикл могут существенно изменяться перед тем, как будет достигнуто стационарное состояние.

В кристаллах усталостные трещины развиваются вдоль плоскостей скольжения, где происходит концентрация напряжений, выделяется энергия и повышается температура. Рост температуры в зоне локального сдвига плоскостей скольжения сопутствует инициации усталостных трещин. ИК-термография дает возможность количественно оценить процессы инициации и последующего развития трещин, определить пороговые напряжения и дать рекомендации по недопущению разрушения объектов контроля. Кроме того, ИК-термография позволяет локализовать зону разрушения и проследить процесс его развития. Этот метод успешно применялся в качестве экспериментального для обнаружения области пластической деформации в головке трещины при монотонном нагружении образца из стали, а также при исследовании механизма усталостного разрушения конструкционных материалов [83].

В работе [83] предложено общее "термомеханическое" (thermomechanical) уравнение, которое включает члены, ответственные за теплопроводность, стоки или источники тепла, термоупругие эффекты и диссипацию энергии за счет вязко-пластических феноменов. В той же работе обсуждаются возможности ИК-

термографии при анализе вышеуказанных эффектов

5.14.4. Анализ разрушения строительных материалов. В последние годы в России и других странах произошли катастрофические разрушения ряда сооружений, таких как здания, тоннели, мосты и т.п., построенных из кирпича и железобетона. Во многих случаях разрушения были связаны с действием внешних факторов (гектонических процессов, деятельности человека, включая несоблюдение норм и низкое качество строительства и т.п.). В других случаях причина разрушения не была установлена, однако очевидно, что с точки зрения механики разрушения происходили из-за нарушения структурной целостности материала, возникали локальные концентраторы напряжений, появлялись микро-, а затем макротрещины, в результате роста которых конструкция разрушалась. С практической точки зрения представляет интерес разработка метода и аппаратуры для обнаружения надежных предвестников подобных катастроф. ИК-термография, в силу высокой производительности и бесконтактности испытаний, привлекла внимание контролирующих организаций, в особенности, после начала широкого применения тепловидения в строительной диагностике и мониторинге теплопотерь. Тем не менее, возможности метода до сих пор остаются дискуссионными, среди специалистов нет единого мнения относительно величины температурных сигналов, которые могут возникать в объеме и на поверхности строительных материалов при воздействии на них знакопеременных нагрузок. Лабораторные исследования, выполненные М. Люонгом (Франция), показали, что при определенных типах и величинах нагрузок температурные градиенты могут достигать нескольких градусов [84]. Однако на практике этот вывод не был подтвержден надежными экспериментальными результатами, а имеющиеся разрозненные данные (см. главу 9) позволяют пред-

положить, что в обычных условиях амплитуда температурных предвестников катастроф не превышает долей градуса, поэтому их обнаружение возможно только в хорошо контролируемых лабораторных условиях и затруднительно в условиях реальной эксплуатации строительных сооружений.

5.15. ЭЛЕМЕНТЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТК (НЕЙРОННЫЕ СЕТИ)

Нейронную сеть можно рассматривать как набор простых процессоров, соединенных многочисленными взаимными связями. Процессоры обладают внутренней памятью на простые операции, приобретенной в результате первоначального обучения (training). Обычно в структуре нейронных сетей выделяют отдельные слои, а параллельный характер сетей делает их пригодными для решения многопараметрических задач, в том числе, в качестве *классификаторов образов*.

На рис. 5.27 изображена простая схема восприятия (perception) информации нейроном, в котором имеется два входа и один выход (иногда такую схему называют перцептроном). Видно, что нейрон подобен ячейке, на которую поступают входные сигналы $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, а выходным сигналом является скалярная величина y . Нейрон производит умножение входных сигналов на весовые коэффициенты w_1, w_n и комбинирует их в виде линейной функции $S = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n$. Выходной сигнал y считают нуле-

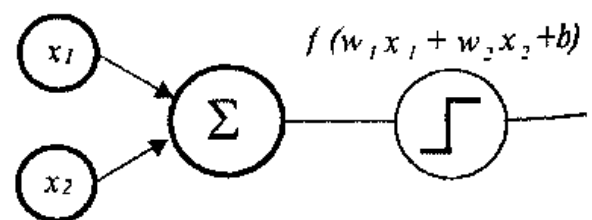


Рис. 5.27. Простой перцептрон с двумя входами и одним выходом

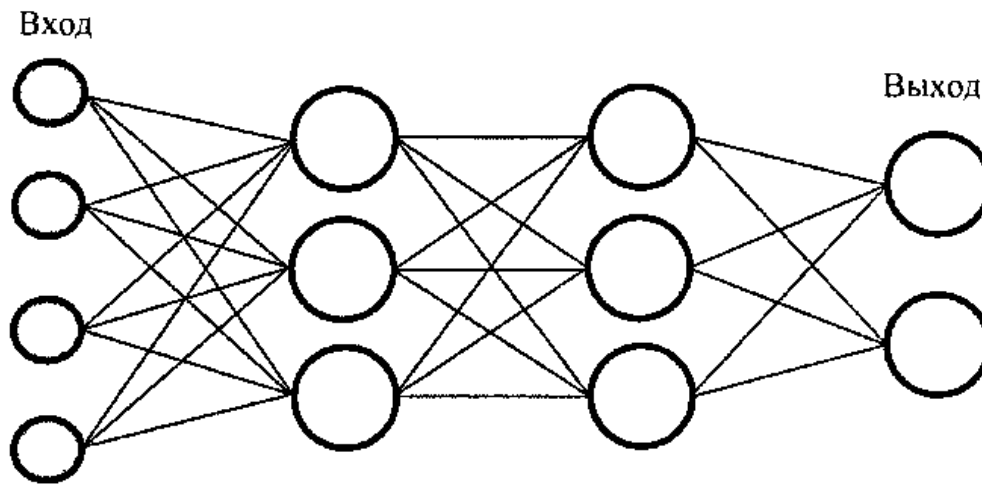


Рис. 5.28. Пример трехслойной нейронной сети

вым, пока его значение не превысит пороговое значение y_{thr} , которое активирует нейрон $y = f_{sig}(S - y_{thr})$, где f_{sig} — сигмоидная функция, например, вида $y = 1/[1 + \exp(-kx)]$. Нейрон, показанный на рис. 5.27, может быть структурным элементом нейронных сетей различного типа.

Процесс обучения состоит в определении весовых коэффициентов. При этом возможно два случая: 1) любому вектору входных данных соответствует требуемый или ожидаемый вектор выходных данных, 2) классификацию вектора выходных данных производит сама нейронная сеть.

Структуры типа рис. 5.27, позволяют классифицировать относительно простые задачи. Более сложные нейронные сети должны содержать дополнительные слои. Например, на рис. 5.28 изображена трехслойная сеть, принадлежащая к семейству многослойных перцептронов. В структуру такой сети входят два скрытых слоя, которые непосредственно не подключены к выходу. Наличие скрытых слоев осложняет обучение нейронной сети, поскольку становится затруднительным обратное распространение ошибок определения выходной величины на входные весовые коэффициенты, в особенности при нелинейной функции активации. Данную проблему решают, используя так называемый алгоритм обратного распространения (back-propagation algorithm). Вначале, на

этапе *распространения*, или *релаксации*, весовым коэффициентам приписывают случайные значения, и возникшая комбинация вход-выход передается на рассмотрение нейронной сети. Ошибку рассчитывают как квадрат разности для каждого выходного нейрона и затем ее распространяют в обратном направлении через сеть, после чего модифицируют весовые коэффициенты. Процесс повторяют с новой комбинацией вход-выход до тех пор, пока среднеквадратическая ошибка не окажется ниже предписанного уровня или пока не будет выполнено предписанное число итераций.

Преимуществом использования нейронных сетей для классификации дефектов является их способность учиться определению малых различий между идентифицируемыми классами благодаря тренировке на соответствующим образом выбранных тренировочных данных, которые получают экспериментально или теоретически.

Интуитивно можно предположить, что термографические-ИК испытания с их зашумленными результатами контроля могут являться хорошим объектом применения нейронных сетей. Нейронная сеть может быть эффективным инструментом тепловой дефектометрии так например, входными данными может служить совокупность пиксельных значений из соответствующих максиграмм и таймограмм, а

выход может быть выражен в глубинах залегания дефектов

Цикл исследований по применению нейронных сетей в ТК самолетных панелей выполнен Д Прабху и др из NASA (США) [85, 86] Работа [85] посвящена обнаружению расслоений между алюминиевыми листами, соединенными внахлест. Нагрев панелей производили с помощью кварцевых ламп, последовательность зарегистрированных термограмм форматом 256×256 вначале усредняли, после чего попиксельно вычисляли производную от температуры по времени. Изображения производной сами по себе могут быть бинаризованы для индикации расслоений, однако для более эффективного подавления шумов, которые возрастают после вычисления производных, применили нейронную сеть с 20-ю входными нейронами и одним выходным нейроном. *Включенное* состояние выходного нейрона (значение 0,75) соответствовало бездефектным зонам, а *включенное* состояние (значение 0,25) – зонам с расслоениями. Бинаризацию данных проводили по порогу 0,5. Примечательно, что обучение сети осуществляли по экспериментальным данным (36 образцовых функций), полученным при НК коммерческого самолета. Вследствие малого набора тренировочных данных, процесс обучения был быстрым, а результаты применения нейронной сети совпали с данными УЗ-испытаний.

Для обнаружения и оценки коррозии алюминиевых листов та же группа исследователей использовала два типа нейронных сетей, из которых одна получила название *обнаружителя дефектов* (flaw detector network), а вторая – *оценщика коррозии* (corrosion estimator network) [86]. Первая нейронная сеть, аналогичная описанной в [85], позволяла обнаруживать до 25 % уноса материала в алюминиевом листе толщиной 3,1 мм, соединенном внахлест с другим листом такой же толщины (дефекты такого типа опасны тем, что в них может конденсироваться влага, что приводит

к преждевременному коррозионному износу конструкции). Второй тип нейронной сети включал 10 выходных нейронов, каждый из которых оценивал величину коррозии 0–10 %, 10–20 % и т.п. Наиболее впечатляющие результаты получены при комбинировании обеих нейронных сетей, причем сеть первого типа поставила маску дефектов для последующей обработки с помощью второй сети. Таким образом удалось обнаружить 5–10 % уноса материала в алюминиевом листе толщиной 1 мм.

В работе [87] описана нейронная сеть для обработки данных ТК, полученных по методу фазовой термографии. Обучение нейронной сети проводили на расчетных данных, а экспериментальные значения глубин дефектов определяли путем анализа 32 фазовых или амплитудных изображений. Было опробовано 80 архитектур нейронных сетей. Сеть с двумя слоями создавала существенные ошибки для малых глубин дефектов вследствие малых вариаций фазы сигнала. Лучшие результаты получены на сети с тремя слоями типа 8×21 , в которой значения пиксельной фазы в 32-х изображениях, что соответствовало 32-м входам, подавали вначале на 8 нейронов, а затем на 21 нейрон, замкнутых на выход. При проверке возможностей этой сети ошибка определения глубины дефектов не превысила 10 %.

5.16. МЕТОД АНАЛИЗА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) является полезной статистической процедурой, которую применяют в задачах распознавания образов и сжатия данных, в частности, при очень больших объемах анализируемых данных.

Метод применим к статистически распределенным данным с нулевым средним значением. Его сущность состоит в вычислении ковариационной матрицы исходных данных, а также собственных единичных

векторов (eigenvectors) и собственных значений (eigenvalues) этой матрицы. Собственные векторы располагают в порядке их значений по порядку от высшего к низшему, что дает компоненты статистического набора в порядке убывания их значимости. Пренебрегая низшими компонентами, можно понизить метрику задачи, например, исключить влияние конвективной теплоотдачи при анализе металлических изделий, если используется многомерная тепловая модель, в которой присутствует конвекция. Выбирая из полученного списка наиболее значимые собственные векторы, составляют *вектор характеристик* (feature vector), который представляет собой матрицу, состоящую из столбца собственных векторов.

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

В криминалистике, например, метод анализа главных компонент используют при распознавании человеческих лиц. Сравнение текущих параметров лица производят по наиболее значимым собственным векторам путем анализа расхождений между текущим значением и имеющимися наборами данных, что существенно ускоряет идентификацию.

В ТК исследование метода главных компонент только начато. Описано его применение для оценки пористости углепластика, из которого изготовлены соты панели самолетов [88]. Предварительную обработку данных проводили с помощью двумерного вейвлет-преобразования, которое было применено к данным, полученным во временной области. Пористость определяли косвенным образом путем вычисления температуропроводности в каждой точке образца. В работе [89] анализ главных компонент был использован специалистами Управления по авиации Франции (ONERA) для расшифровки результатов промышленных испы-

таний металлических изделий с помощью ИК-камеры, реализующей принцип "летающего пятна", в частности, удалось повысить выявляемость открытых трещин в режиме автоматического контроля, причем на стадии обнаружения дефектов (после обработки данных методом анализа главных компонент) использовали вейвлет-анализ.

5.17. СТАНДАРТНАЯ ОБРАБОТКА ИК ИЗОБРАЖЕНИЙ

Весь предыдущий материал главы 5 был посвящен развитому анализу результатов ТК, прежде всего, обработке последовательностей ИК-изображений с помощью алгоритмов, которые учитывают различия во временном поведении температуры над и вне дефектами. При этом объектом обработки является нестационарная пиксельная функция $T(i, j, \tau)$. Применение сложных алгоритмов ставит целью повысить отношение сигнал/шум и тем самым улучшить выявляемость дефектов. Во многих случаях эту цель можно частично достичь, обрабатывая отдельные ИК изображения независимо друг от друга, т.е. в этом случае объектом обработки становится функция $T(i, j)$, описывающая отдельно взятые изображения. Очевидно, что физика нестационарной теплопередачи не играет при этом существенной роли, а изображение обрабатывается как совокупность точек с определенной амплитудой и взаимным расположением (морфологией). Теория обработки изображений хорошо разработана, и ниже будут рассмотрены некоторые алгоритмы, распространенные в ТК. При этом под цифровой обработкой изображений будут пониматься анализ и манипуляции с изображениями, производимые с помощью компьютера [45]. Любая обработка изображения приводит к его искажению, и вопрос заключается в том, полезно или нет это искажение с точки зрения цели, которую ставит перед собой оператор (в НК такой целью является обнаружение дефектов и оценка их параметров).

Цифровое изображение состоит из пикселей (pixel – picture element), что хорошо видно при увеличении изображения (zooming) (рис 5 29) (См цветную вкладку) Формат ИК-изображений может изменяться от 128×128 до 1024×1024 Наиболее популярен видеоформат 320×240 элементов, в котором выполнены мозаичные приемники ИК-излучения С увеличением формата улучшается детальность изображения Каждый пиксель изображения может быть представлен либо в *арифметическом* виде, например, выражая истинную температуру объекта, либо в *байтовом* виде (в последнем случае число бит на пиксель может быть 8, 12, 14 или 16) Чем больше битность сигнала, тем больший динамический диапазон он может воспроизвести, поэтому в последних моделях ИК-тепловизоров используют 14- и 16-битовое представление сигнала Формат и битность сигнала определяют размер файла, содержащего одно изображение Например, если в ходе процедуры активного ТК на жесткий диск компьютера записано 300 изображений, каждое из которых имеет объем 150 кбайт, общий объем данных, которые необходимо обрабатывать, составляет 45 Мбайт, что может вызвать чисто компьютерные проблемы работы со столь большими массивами данных

Обработка изображений включает следующие этапы

- оцифровку данных и их сжатие (digitization & compression),
- улучшение, восстановление и реконструкцию (enhancement, restoration & reconstruction),
- подгонку (аппроксимацию), описание и распознавание (matching, description & recognition)

5.17.1. "Улучшение" изображений. Понятие "качество изображения" связано, с тем, для какой цели оно было создано (так, например, утилитарный взгляд на картины импрессионистов может привести к идее подвергнуть их обработке

фильтром высоких частот с целью сделать изображение более четким) Поэтому под "улучшением изображения" (enhancement) понимают процедуры, которые делают его более приемлемым для конечного пользователя (примеры существенного улучшения термограмм за счет изменения динамического диапазона и цветовой палитры приведены на рис 5 30) (См цветную вкладку) Целью НК является поиск определенных текстур на фоне помех, качество изображений часто оценивают по специальным эталонам, которые содержат области ступенчатого или решетчатого изменения сигнала (в оптике такие эталоны называют *мирами*, пример решетчатой миры, используемой в ТК, был приведен в п 3 8 10)

5.17.2. Модификация полутоновой шкалы (изменение гистограммы). В современных тепловизорах глубина оцифровки сигнала достигает 16 бит, однако каждое отдельное изображение характеризуется распределением пиксельных амплитуд в относительно узком диапазоне значений Для оптимального представления изображения оператору следует растянуть его гистограмму между максимальным и минимальным значениями. Однако обычно изображения содержат зоны аномально высоких (выбросов) или аномально низких сигналов (фона), которые не несут полезной информации, поэтому для просмотра слабоконтрастных деталей изображения оно может быть представлено оператору в определенном диапазоне амплитуд (амплитудном окне) внутри полной гистограммы (см. рис 5 30)

5.17.3. Выбор цветовой палитры. Тепловые изображения являются псевдоцветовыми, т.е. связь палитры цветов с температурой задается оператором Существует большое количество палитр, входящих в программное обеспечение тепловизионных систем На практике часто используют палитры "Радуга" (Rainbow) и "Цвета каления" (Iron) При правильном

подборе палитры возможно представить зоны с близкими температурами с помощью контрастных цветов (см рис 5.30 и 5.31), однако не следует преувеличивать значение палитры для повышения достоверности обнаружения скрытых дефектов (См. цветную вкладку)

5.17.4. Повышение резкости изображения. Под "резкостью изображения" будем понимать способность воспроизводить малые детали и границы перехода между зонами с различной амплитудой В ТК поверхностные отпечатки скрытых дефектов расплываются вследствие диффузии тепла, причем этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше глубина залегания дефектов, выше теплопроводность материала и дольше время регистрации. "Расплывшиеся" изображения хуже воспринимаются оператором и создают трудности при дефектометрии. Поскольку процесс выравнивания температуры в зоне температурных градиентов можно интерпретировать как интегрирование по пространственной координате, следует ожидать, что резкость изображений можно повысить, применяя операцию дифференцирования Действительно, при обработке изображений часто применяют фильтры высоких частот – ФВЧ, которые избирательно пропускают сигналы с высоким градиентом, устраняя тем самым низкочастотный тренд, обусловленный неравномерным нагревом, засветками, неоднородностью материала и т.п. факторами (см. пример на рис 5.32) Пример простого цифрового ФВЧ

$$3 \times 3 \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad (5.36)$$

где 3×3 означает размер маски, применяемой для фильтрации. Фильтрация в виде (5.36) является двумерной, поскольку осуществляется в пространстве по двум поверхностным координатам Аналогич-

ные фильтры, только одномерные, могут применяться и к временной координате Следует отметить, что операция фильтрации по пространству не означает, что автоматически производится фильтрация во времени и наоборот

При использовании простых ФВЧ возможно появление нежелательных эффектов, связанных с изменением знака производной От этого недостатка свободна процедура вычитания из исходного изо-

$$\text{бражения лапласиана } \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

который представляет собой линейный оператор производной, не зависящий от направления В цифровой форме эту процедуру записывают в следующем виде

$$T(i, j) - \nabla^2 T(i, j) = 5T(i, j) - [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)] \quad (5.37)$$

Любые ФВЧ, реализующие производные сигналов, имеют тенденцию увеличивать шумы В ТК эти фильтры рекомендуется применять к гладким функциям, что легко сделать во времени, но затруднительно в пространстве

Еще одним фильтром, который подчеркивает слабые контрасты, является статистический фильтр, который вычисляет дисперсию сигнала в области, ограниченной выбранной маской

5.17.5. Сглаживание. Сглаживание (smoothing) – операция, обратная повышению резкости Ее применяют, когда изображение содержит неприятный для зрительного восприятия высокочастотный шум, характерные размеры которого меньше размеров искомого дефекта (это условие необходимо для того, чтобы не "сгладить" сам дефект) Сглаживание осуществляют с помощью нескольких типов фильтров (процедур), из которых наиболее распространены 1) фильтр низких частот – ФНЧ, 2) медианный фильтр, 3) усреднение во времени

Пример ФНЧ

$$3 \times 3 \quad \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (5.38)$$

$$5 \times 5 \quad \frac{1}{25} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Чем больше размер маски фильтра, тем на большей площади происходит сглаживание сигнала, маски размером более 12×12 практически не используют, поскольку они приводят к значительным искажениям исходного изображения.

Фильтры высоких и низких частот изменяют гистограмму изображения, в то время как медианный фильтр оставляет гистограмму неизменной. Этот фильтр весьма эффективен для устранения однопиксельного шума (типа "соль и перец"), который, например, часто возникал в цифровых изображениях после некачественной оцифровки. Принцип работы одномерного медианного фильтра можно пояснить на примере фильтрации температурных сигналов во времени. Пусть пиксельные амплитуды расположены в следующем порядке: 35 255 74. Медианный фильтр изменит амплитуды пикселей в порядке их возрастания: 35 74 255.

Что касается усреднения N отсчетов сигнала во времени, то, как отмечалось ранее, это приводит, с одной стороны, к повышению температурного разрешения за счет снижения некоррелированных шумов, а, с другой стороны, ухудшает разрешение анализа во времени.

5.17.6. Морфологическая фильтрация. В классическом виде морфологическая фильтрация является логической операцией, применимой к бинарным изображениям и изменяющей формы областей интереса. Существует две взаимнообратные процедуры, называемые *эрозией* и *дилатацией*. При эрозии единичный пиксель, окруженный несколькими нулевыми, будет сделан также нулевым, поэтому такая процедура эффективно устраняет однопиксельный шум. Поскольку эрозия "съедает" края единичных областей (рис. 5.33), после нее применяют дилатацию, которая наращивает граничные пиксели, но не восстанавливает устраненные однопиксельные зоны (См цветную вкладку.)

5.17.7. Восстановление изображения. Восстановление (restoration) изображения обычно означает его подгонку под некоторую модель. В ТК это чаще всего выражается в виде аппроксимации, например полиномиальной, временного развития температуры, о чем шла речь в п. 5.10.

5.17.8. Вычитание и деление изображений. В ряде случаев простые арифметические операции, такие как вычитание и деление, способны существенно снизить специфические помехи ТК (рис. 5.34) (См цветную вкладку.) Например, вычитание эффективно в случае аддитивного шума, который в равной мере участвует в обоих изображениях. Деление, в свою очередь, снижает мультипликативную компоненту шума, обусловленную, например, флуктуациями коэффициента излучения, однако в этом случае необходимо оперировать только с избыточными температурами нагрева и мириться с возрастанием высокочастотного шума.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ИК-ТЕХНИКИ И ТЕПЛОВИДЕНИЯ

В англоязычной научно-технической литературе принято считать, что техника регистрации ИК-излучения берет свое начало в 1800 г в работах сэра Уильяма Гершеля, астронома при дворе английского короля Георга III. При выполнении исследований, приведших к открытию планеты Уран 13 марта 1793 г., Гершель работал над защитой своих глаз от солнечного света и обнаружил эффект нагрева ртутного термометра, который был расположен за красной полосой спектра.

До работ У Гершеля основатель российской науки М В Ломоносов занимался проблемой ночного обнаружения предметов. В 1758 г М В Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения (*tubo noctoptico*), а в 1762 г создал зеркала с высокой отражающей способностью.

В 1829 г прообразом первых тепловизоров явилось устройство Д Гершеля (брата У Гершеля), который регистрировал тепловое излучение объектов по неравномерному испарению спирта на тонкой фильтровальной бумаге. Примечательно, что в своих опытах, датированных 1840 г., Д Гершель пользовался распространенным сейчас термином "термограмма".

В 1900 г произошло второе рождение ИК-методов исследований в качестве строгой научной дисциплины, что было обусловлено, с одной стороны, фундаментальными исследованиями М Планка, А. Эйнштейна, Г Кирхгофа, Б Б Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения, а с другой, – прогрессом в технологии ИК-приемников.

Патентная литература начала XX века содержит множество предложений по

созданию ИК-приборов для обнаружения кораблей, самолетов и людей, а также систем связи и автоматического наведения на цель средств поражения. Первые рабочие ИК-системы были созданы в 1914 – 1918 гг. Аппаратура С Гофмана, описанная в 1919 г., позволяла обнаруживать человека на расстоянии до 200 м, а самолет на расстоянии до 1600 м.

В 1927 г М Черни развил идею эвапорографа Д Гершеля, применив вместо испарения спирта возгонку нафталина и камфары.

Первый электронно-оптический преобразователь (ЭОП) был сконструирован в 1934 г Д Холстом.

В 1939 – 1942 гг в США на базе ЭОП, усовершенствованного В Зворыкиным и Г Мортонем, была создана аппаратура для ночного вождения танков, а также оптические прицелы ("суперскопы" и "снайперскопы"), которые обеспечивали прицельную стрельбу из стрелкового оружия на расстоянии до 90 м.

Первые приборы ночного видения (*night vision*) работали в ближнем ИК-диапазоне по активному принципу, т.е. требовали внешней подсветки сцены. Пассивные ИК-системы того времени обеспечивали обнаружение высокотемпературных объектов, например, самолетных двигателей, на расстоянии до 32 км.

Эксперименты в области тепловидения с использованием различных физических эффектов, в частности, эвапорографии, проводились еще до второй мировой войны, в том числе и в России. Одни из первых экспериментов по обнаружению военных кораблей были проведены в Ленинграде С И Покровским, Б П Козыревым, В А Гуровым и др. еще в 1927 г.

К 1934 г были созданы советские береговые системы обнаружения, в которых использовали фокусирующие зеркала диаметром до 1,5 м и термоэлементы

В годы второй мировой войны в СССР системы теплового обнаружения были использованы при охране конвоев союзников. В свою очередь, в Берлинском университете в те же годы был создан первый тепловизор-эвапорограф "ЭВА"

В 1950 г в США был построен эвапорограф для военного и промышленного применения. Практическое применение системы "ИК-видения" нашли в начале 1950-х годов во время войны, которую вели США в Корее. Первые тепловизоры работали в ближнем ИК-диапазоне, поскольку использовали неохлаждаемые приемники на основе солей свинца и требовали активной подсветки, что снижало эффективность их применения.

В послевоенные годы заметные работы в области ИК-техники были выполнены в нашей стране. Промышленный эвапорограф ЭВ-84 был создан Г. П. Фаерманом, В. Н. Синцовым и др.

Часто считают, что прообразом тепловизоров с оптико-механическим сканированием является бортовая ИК-система фирмы Barnes, (США), созданная в 1954 г и положившая начало так называемым "впередсмотрящим" ИК-системам (Forward Looking Infrared – FLIR), размещаемым на летательных аппаратах.

Первые портативные тепловизоры, в которых использовали охлаждаемые линейные матрицы на основе селенида свинца, пригодные для полевой съемки, были испытаны в США в 1960-х годах и в дальнейшем выпускались в виде серии приборов AN/PAS. В модели *показывающего* тепловизора AN/PAS-110 использовались линейный PbSe фотоприемник (спектральный диапазон 2–5 мкм) и колеблющееся зеркало в качестве сканера, обеспечивая частоту смены изображений 30 Гц при температурном разрешении 0,1 °С.

В СССР в 1961 г М. М. Мирошников продемонстрировал тепловой след, оставшийся через 30 мин от человека, лежавшего на деревянном полу. Было можно различить контуры тела благодаря уникальной для тех лет температурной чувствительности – 0,03 °С. Первые *измерительные* тепловизоры (англоязычный термин "scanning radiometers", т.е. сканирующие радиометры) появились также в 1960-х годах в качестве побочного продукта военных разработок, поскольку опция измерения температуры в то время не являлась приоритетной характеристикой военных тепловизионных систем.

Энергетический кризис 1970-х годов обеспечил государственную поддержку двум шведским фирмам AGA (затем AGEMA Infrared Systems, ныне FLIR Systems) и Vofors, которые выпустили первые портативные измерительные тепловизоры. Гражданская модификация военного тепловизора фирмы AGA – прибор Thermovision-650 – больше напоминал телескоп из-за использования оптики большого диаметра. Следующая коммерческая модель Thermovision-665 обладала массой 35 кг, требовала охлаждения приемника жидким азотом и также была далека от последующих портативных приборов (интересно отметить, что именно эта модель послужила прототипом известного отечественного прибора ТВ-03, который выпускался без особых изменений вплоть до начала перестройки).

В 60-е годы прошлого века благодаря работам М. М. Мирошникова, П. В. Тимофеева, В. И. Архангельского и др. происходило становление отечественного тепловидения. М. М. Мирошниковым и М. А. Собакиным с сотрудниками были выполнены фундаментальные исследования в области медицинского тепловидения с помощью системы, обладавшей температурным разрешением 0,3 °С и временем кадра 15 мин.

В период с 1970 по 1990 г прогресс гражданского тепловидения, по крайней мере в Европе, был по-прежнему связан с работами шведской фирмы AGEMA Infrared Systems В 1986 г фирма отказалась от охлаждения ИК-приемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрический холодильник, а также процессор Хаски (Husky) для расчета температуры и калибровки в реальном времени. В 1988 г на рынке появились тепловизоры серии Thermovision-400 массой около 7 кг, которые в течение многих лет оставались непревзойденными приборами для полевой ИК-съемки

Отечественные разработки в 80–90х годах прошлого столетия развивались по нескольким направлениям Прежде всего, в ГОИ им С И Вавилова под руководством М М Мирошникова продолжала разрабатываться оригинальная теория оптико-электронных устройств, на основе чего совместно с Азовским оптико-механическим заводом были разработаны тепловизоры как военного, так и гражданского применения "Филин", "Рубин", "Алмаз", "Радуга", "Статор", "Вулкан" и их модификации [10] Параллельно в НИИ "Исток" А Г Жуковым разрабатывалась концепция отечественного тепловизора ТВ-03, которая повторяла основные технологические идеи ранних тепловизоров фирмы AGA, но потребовала создания новой отечественной элементной базы Упрощение требований к некоторым параметрам тепловизоров, например, за счет увеличения времени кадра, позволило организовать выпуск тепловизоров малой серии АТП в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) Наконец, в НПО "Спектр" была предпринята попытка повторить шведские тепловизоры на альтернативной отечественной элементной базе (тепловизор ИФ-10ТВ)

Специализированные тепловизоры, предназначенные для исследования распределения энергии в мощных лазерных лучах, были разработаны во Всесоюзном

институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) и Институте прикладной механики (ИПМ) СО АН СССР Ряд бортовых тепловизионных систем военного применения был разработан в те годы в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО) и некоторых других организациях, однако их параметры остались неизвестными широкому потребителю

Существенный вклад в разработку отечественной тепловизионной аппаратуры тех лет внесли М М Мирошников, Р Н Иванова, А Г Жуков, В Е Абрамчук, Г А Падалко, Н Д Куртев, В И Хахин, А В Кормушкин, С С Воронцов, В Г Федчишин, С П Морозова, П А Морозов и др

Между тем, в 1995 г фирмой AGEMA Infrared Systems был начат выпуск нового поколения тепловизоров – серии Thermovision-500, в которых были применены мозаичные детекторы, устанавливаемые в фокальной плоскости (Focal Plane Array – FPA) В эти же годы приобрели известность тепловизоры фирмы Inframetrics (США), в которых для охлаждения фотоприемника до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ был использован холодильник Стирлинга Тепловизоры Thermovision-500 (позднее 600) с массой около 2 кг, а позднее FPA-тепловизоры, использующие QWIP детекторы, фактически ознаменовали появление ИК-телевидения

В середине 90-х годов произошло слияние трех крупнейших производителей ИК-аппаратуры фирм FLIR (США), Inframetrics (США) и AGEMA Infrared Systems (Швеция) С начала XXI века американская фирма FLIR Systems, Inc (FSI) является самым крупным мировым производителем тепловизоров разнообразного применения

Другими известными производителями тепловизоров высокого качества являются фирмы Raytheon, Santa Barbara Focal Plane (США), Indigo, Mikron (все – США), NEC (Япония), CEDIP (Франция), AEG Infrarot Module (Германия) В 2002 г на мировом рынке заявили о себе китай-

ские производители тепловизоров (фирмы WuHan Guide Electronic Industrial и Guangzhou Sat Infrared), использующие западные мозаичные детекторы

Разработки российских тепловизоров в последней декаде прошлого века продолжали идеи, воплощенные в более ранних моделях, но с учетом новых технологических возможностей, прежде всего, с использованием цифровой обработки и накопления результатов измерений. В последние годы в заметных количествах были выпущены тепловизоры ИРТИС-200 и ТКВр-ИФП с охлаждаемыми фотоприемниками. С 2002 г. выпускаются приборы серии ТН-4604, использующие западные неохлаждаемые матричные фотоприемники.

6.2. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

6.2.1. Спектр электромагнитных колебаний и энергетические величины. ИК-термография, или тепловидение, есть метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых (температурных) полей объектов. Электромагнитное (тепловое, или инфракрасное) излучение возникает в твердых телах, жидкостях и

газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. ИК-излучение занимает широкий диапазон электромагнитного спектра с длинами волн 0,75 – 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами (рис. 6.1). В научно-технической литературе можно найти различные разбиения ИК-диапазона на субдиапазоны. Например, согласно рекомендации Международного светотехнического словаря выделяют коротковолновый участок ИК-спектра (ближняя область) – от 0,76 до 1,4 мкм, средневолновой (средняя область) – от 1,4 до 3 мкм и длинноволновой участок (дальняя область) – от 3 до 1000 мкм. В тепловидении терминами "коротковолновой" и "длинноволновой" участки спектра, как правило, обозначают диапазоны 3 – 5,5 мкм и 7 – 14 мкм, что связано со спектральными диапазонами работы популярных ИК-детекторов на основе антимонида индия (InSb) и тройных соединений (CdHgTe).

В табл. 6.1 приведены основные энергетические величины и единицы их измерения, используемые в теории ИК-излучения.

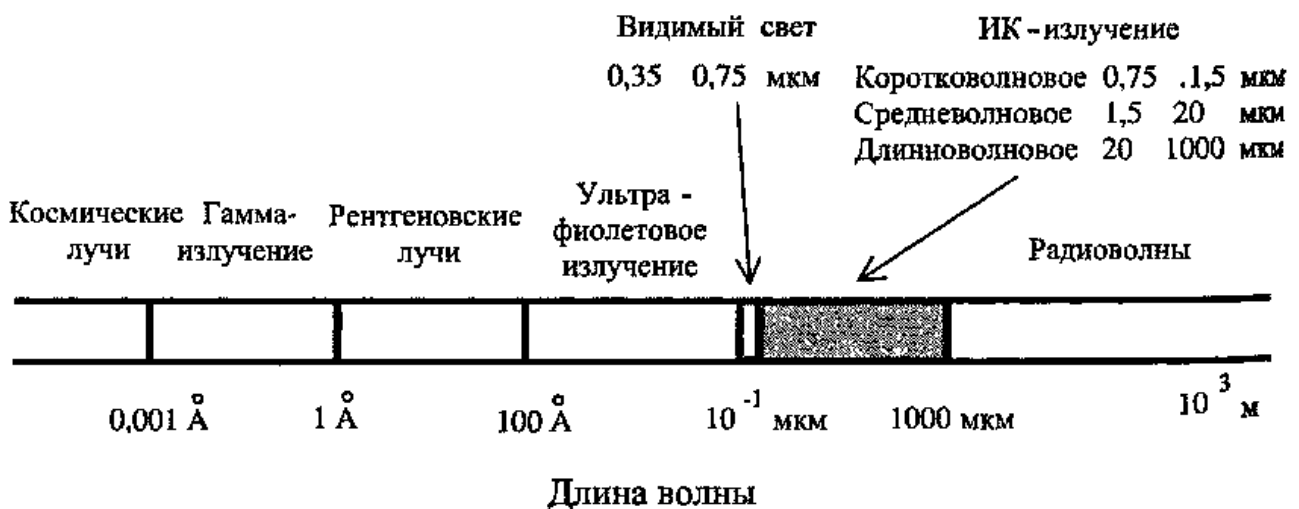


Рис. 6.1. Спектр электромагнитных колебаний

6.1. Основные энергетические величины и единицы их измерения
(в соответствии с системой СИ и рекомендациями Международной комиссии по освещению)

Наименование (синонимы)	Определяющее выражение	Основная единица измерения
Поток излучения (лучистый поток, мощность излучения) Radiant power, radiant flux	$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$	[Вт]
Энергия излучения (лучистая энергия) Radiant energy	$W = \int_0^{\tau} \Phi(\tau) d\tau$	[Дж]
Энергетическая сила света (сила излучения) Radiant intensity	$I = d\Phi / d\Omega$	[Вт/ср ¹]
Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения, излучательность) Radiant exitance	$R = d\Phi / dF$	[Вт/м ²]
Энергетическая освещенность (облученность, плотность мощности, плотность дозы, радиация) Irradiance, dose-rate	$E = d\Phi / dF$	[Вт/м ²]
Энергетическая яркость (лучистость) Radiance	$L = \frac{I}{dF \cos \Theta}$	[Вт/(м ² ср ¹)]

6.2.2. Законы теплового излучения.

Согласно закону Планка, спектральная поверхностная плотность потока излучения физического объекта [Вт/(м² мкм)] определяется его температурой T и спектральной излучательной способностью (коэффициентом излучения) ϵ_{λ}

$$R_{\lambda}(T, \epsilon_{\lambda}) = \frac{\epsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)},$$

$$C_1 = 3,7418 \cdot 10^8 \text{ Вт/(м}^2 \text{ мкм}^4),$$

$$C_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \text{ мкм К} \quad (6.1)$$

Закон Планка первоначально был получен для абсолютно черного тела (АЧТ – Black Body), которое испускает максимум возможной при данной температуре энергии, что имеет место при $\epsilon_{\lambda}^{\text{АЧТ}} = 1$, поэто-

му классическая запись закона Планка имеет вид

$$R_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (6.2)$$

Для $\lambda T < 5000$ (мкм К) справедлива формула Вина

$$R_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad (6.3)$$

Для $\lambda T > 10^5$ (мкм К) имеет место приближение Рэлея–Джинса

$$R_{\lambda}(T) = 2C_1 T / (C_2 \lambda^4) \quad (6.4)$$

В ТК величина λT обычно изменяется от 800 до 5000 (мкм К), что соответствует спектральному диапазону 3–14 мкм и

температуре объектов 0 — 100 °С, следовательно, возможно использование формулы (6.3)

Закон Вина для длины волны λ_{\max} , характеризующейся максимальным значением функции Планка $R_{\lambda_{\max}}$, выражается в следующем виде

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \approx \frac{3000}{T}, \quad (6.5)$$

где λ_{\max} выражена в мкм, а T — в К. Например, если принять, что поверхность тела человека (в одежде) имеет температуру около 300 К, то длина волны максимальной мощности излучения составляет около 10 мкм

Практические расчеты по общей формуле Планка удобно проводить, если рассмотреть ее безразмерную форму записи

$$y = 142,32 x^{-5} \left[e^{4,9651/x} - 1 \right]^{-1}, \quad (6.6)$$

$$x = \lambda / \lambda_{\max}, \quad y = R_{\lambda}^{\text{АЧТ}} / R_{\lambda_{\max}}$$

Графики функции Планка $R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}$ для различных температур АЧТ согласно формулам (6.2) и (6.6) показаны на рис. 6.2, откуда следует, что 1) для каждой температуры максимум излучения имеет место на определенной длине волны, которая возрастает с уменьшением температуры, 2) мощность излучения резко спадает с уменьшением температуры. Упомянутые особенности теплового излучения тел выражаются соответственно законами Вина и Стефана–Больцмана

В диапазоне длин волн λ_1 — λ_2 поверхностную плотность потока излучения $R(T, \epsilon)$, выраженную в Вт/м², определяют по формуле

$$R(T, \epsilon_{\lambda}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}(T, \epsilon_{\lambda}) d\lambda \quad (6.7)$$

Спектральный ход коэффициента излучения ϵ_{λ} может быть весьма причудливым, в особенности у газов, которые характеризуются линейчатым спектром из-

лучения. Для многих твердых и жидких тел, называемых "серыми", зависимостью коэффициента излучения от длины волны можно пренебречь ($\epsilon = \text{const}$), тогда

$$R(T, \epsilon) = \epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = \epsilon R^{\text{АЧТ}}(T, \tau) \quad (6.8)$$

Значения интеграла $R^{\text{АЧТ}}$ в формуле (6.8), описывающего поверхностную плотность потока излучения АЧТ в отдельных спектральных интервалах, табулированы [90]. В ИК-термографии используют преимущественно коротковолновой (3 — 5,5 мкм) и длинноволновой (7 — 14 мкм) спектральные диапазоны, что с одной стороны, соответствует окнам прозрачности атмосферы, а с другой стороны, подкреплено наличием коммерчески доступных приемников излучения, в частности на основе InSb и CdHgTe. Кроме того, согласно закону Вина, в указанных диапазонах сосредоточена основная мощность излучения тел при температурах 0 ... +100 °С

В диапазоне всех длин волн 0 ... ∞ поверхностная плотность потока излучения выражается законом Стефана–Больцмана

для АЧТ

$$R^{\text{АЧТ}}(T, \lambda = 0 \dots \infty) = \sigma T^4, \quad (6.9)$$

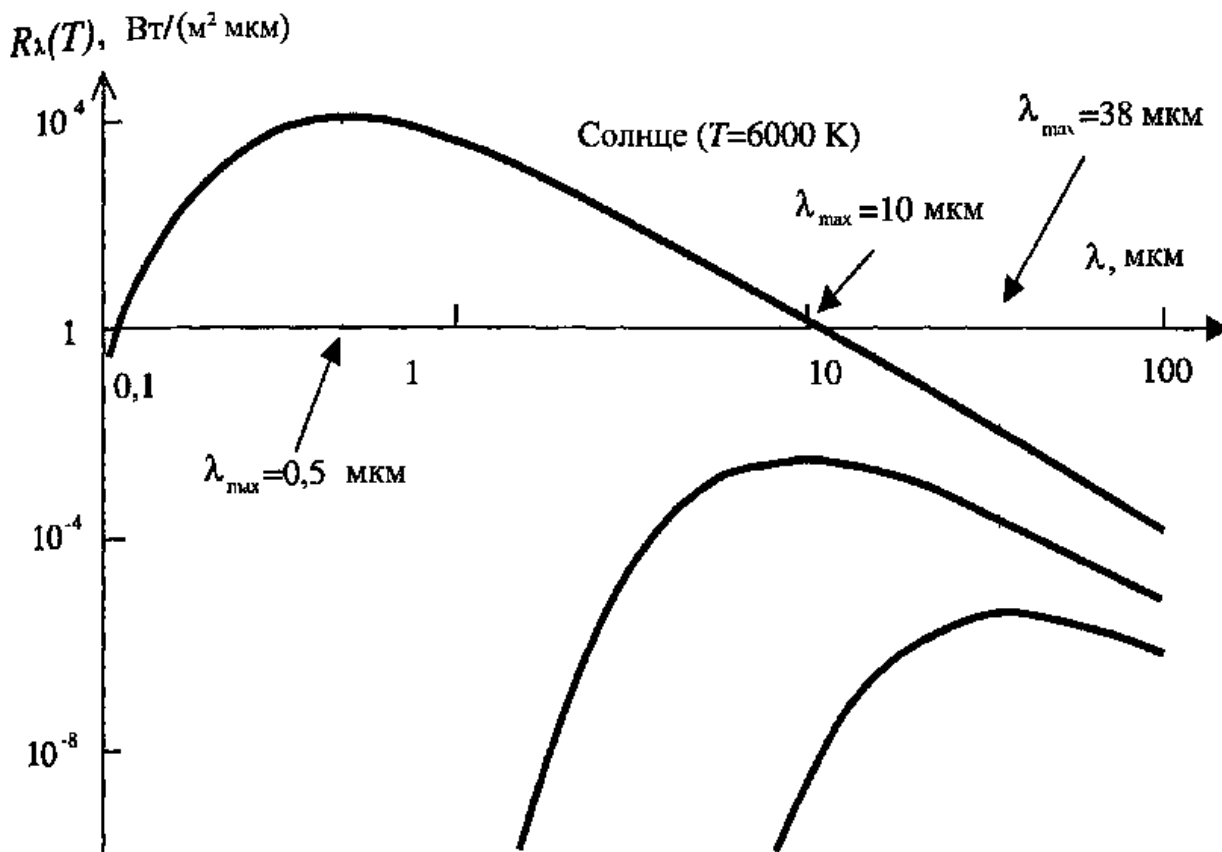
для серого тела

$$R(T, \epsilon, \lambda = 0 \dots \infty) = \epsilon \sigma T^4, \quad (6.10)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) — постоянная Стефана–Больцмана

Тепловое излучение, плотность потока которого описывается формулами (6.7) — (6.10), испускается телом в телесный угол зрения, равный π стерадиан. Тепловизор регистрирует часть этого излучения, падающего в телесный угол Ω согласно закону Ламберта

$$J_{\Omega} = R \Delta S \frac{\Omega}{\pi} \cos \varphi, \quad (6.11)$$



Окружающая среда ($T=300 \text{ K}$) Жидкий азот ($T=77 \text{ K}$)

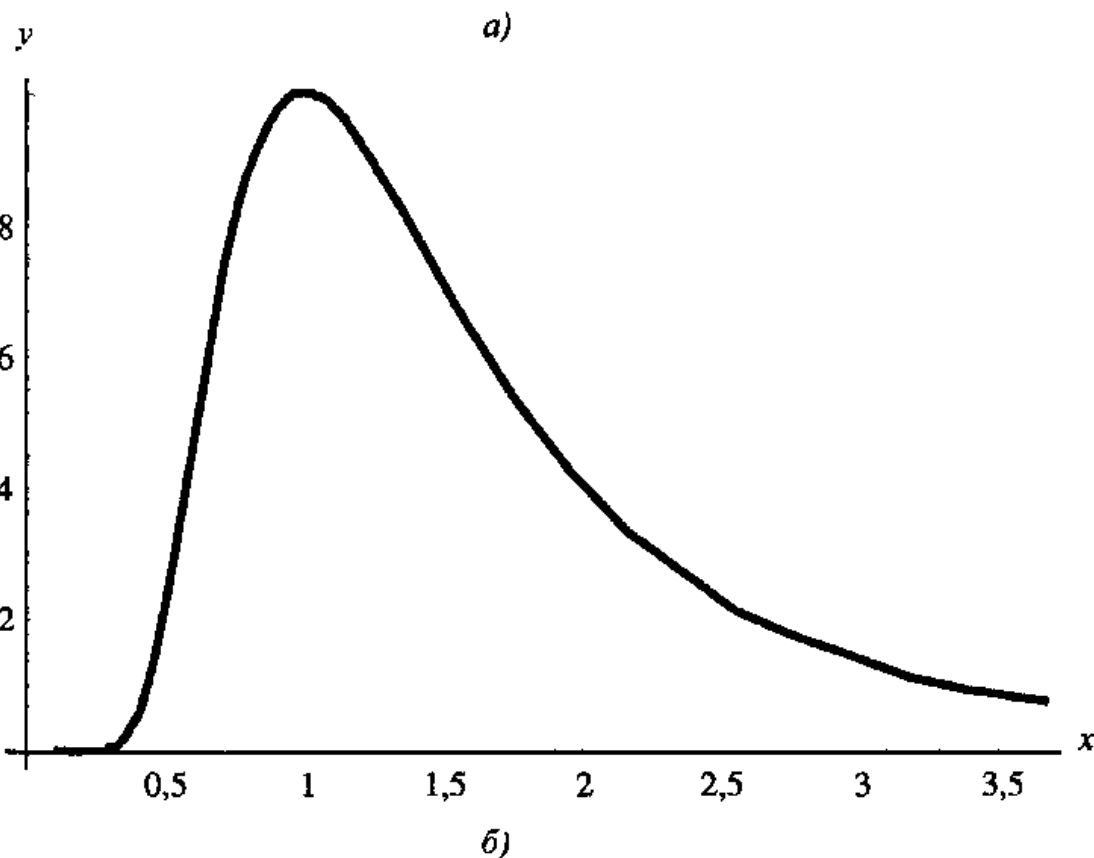


Рис. 6.2. Закон Планка для АЧТ:
a – в абсолютных единицах, *б* – единичная изотермическая кривая

где ΔS – площадь, визируемая тепловизором в пределах его мгновенного угла зрения на поверхности объекта контроля, φ – угол между нормалью и направлением телесного угла Ω . Обе величины ΔS и Ω определяются размерами приемной площадки приемника излучения и параметрами оптического объектива.

При падении излучения на тело (рис. 6.3) имеют место следующие оптические феномены: 1) поглощение с коэффициентом α_λ , 2) отражение с коэффициентом ρ_λ , и 3) пропускание с коэффициентом τ_λ . Очевидно, что на любой длине волны

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (6.12)$$

что выражает закон сохранения энергии.

Закон Кирхгофа устанавливает, что в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и длине волны спектральный коэффициент излучения для заданного направления равен спектральному коэффициенту поглощения для противоположно направленного неполяризованного излучения. Практически, этот закон устанавливает простое численное соответствие между коэффициентами поглощения и излучения тел

$$\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda \quad (6.13)$$

Закон Кирхгофа выражает тот факт, что на определенной длине волны тело способно поглотить и испустить одинаковое количество энергии. Для ИК-термо-

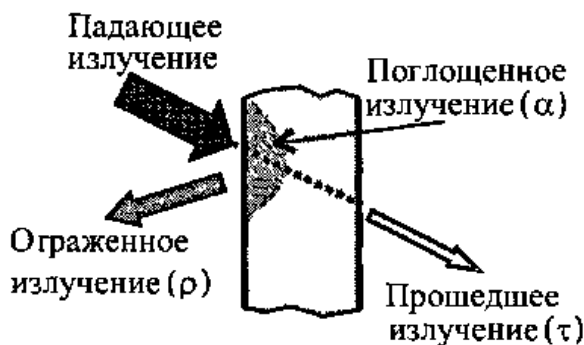


Рис. 6.3. Взаимодействие излучения с телом

графии это имеет первостепенное значение, поскольку позволяет легче интерпретировать эффекты поглощения/излучения и корректно трактовать показания ИК-термометров и тепловизоров, которые производителями калибруются по эталонным источникам (моделям АЧТ).

При измерении температуры объектов по их тепловому излучению представляет интерес изменение теплового потока в зависимости от изменения температуры. Производная от функции Планка по температуре имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial T} R_\lambda(T) = \frac{C_2 e^{C_2/\lambda T}}{\lambda T^2 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} R_\lambda(T). \quad (6.14)$$

Соответствующие значения также табулированы в [90]. Во всем диапазоне длин волн

$$\frac{\partial}{\partial T} R(T, \epsilon) = 4\epsilon \sigma T^3, \quad (6.15)$$

или в конечных разностях

$$\Delta R(\Delta T = T_1 - T_2, \epsilon) = 4\epsilon \sigma \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)^3 \Delta T, \quad (6.16)$$

В радиационной пирометрии удобно использовать следующее монохроматическое представление функции Планка.

$$R_\lambda(T) = K(\lambda) T^n, \quad (6.17)$$

где $K(\lambda)$ – функция длины волны; $n = 5/\beta$ при $\beta \leq 2,5$, $n = 1 + 2,5/\beta$ при $\beta \geq 2,5$, $\beta = \lambda/\lambda_{\max}$. Показатель степени n в таком представлении характеризует изменение $R_\lambda(T)$ при изменении температуры, поскольку из формулы следует

$$n = \frac{\partial R_\lambda(T)/R_\lambda(T)}{\partial T/T} \quad (6.18)$$

Формула (6.17) содержит кажущееся противоречие, которое состоит в неограниченном увеличении $R_\lambda(T)$ при уменьшении длины волны и возрастании n . Однако фактически $R_\lambda(T)$ уменьшается

вследствие более быстрого уменьшения $K(\lambda)$. В связи с этим формула (6 17) означает, что при переходе в коротковолновую часть спектра с ростом температуры возрастает лишь *относительное* приращение спектральной плотности излучения

6.2.3. Схема ИК-термографирования объектов контроля. Поскольку объект контроля всегда находится в окружении других физических тел, также испускающих и отражающих ИК-тепловое излучение, то суммарное излучение тела, регистрируемое, например, тепловизором, складывается из *собственного, прошедшего и отраженного* излучений В большинстве случаев ИК-термография имеет дело с оптически непрозрачными объектами ($\tau_\lambda = 0$), для которых формула (6 12) приобретает вид

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \text{ или } \epsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (6 19)$$

Упрощенная схема термографирования оптически непрозрачного объекта показана на рис 6 4 Поток излучения, регистрируемый тепловизором, складывается из потока собственного излучения и части потока излучения окружающей среды и посторонних объектов, отраженного от поверхности объекта контроля

$$\begin{aligned} \Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отр}} = & \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) + \\ & + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda \epsilon_\lambda^{\text{АЧТ}}(T_{\text{amb}}), \end{aligned} \quad (6 20)$$

где Γ_1, Γ_2 - геометрические факторы, описывающие ослабление потоков излучения от объекта контроля и окружающей среды в зависимости от геометрии эксперимента и параметров объектива, а индекс "amb" относится к окружающей среде (ambient), включая посторонние объекты

Составление уравнений энергетического баланса весьма важно при выводе

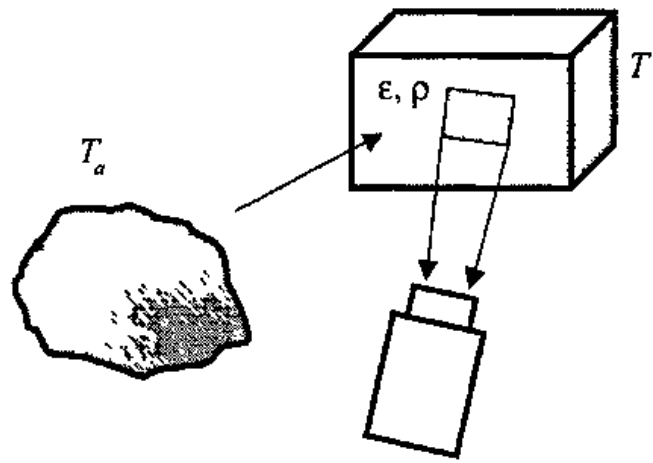


Рис. 6.4. Схема ИК-термографирования объекта

энергетического уравнения ИК-систем, поскольку в объектив тепловизора помимо излучения контролируемого объекта попадает также прямое излучение внутренних элементов тепловизора и в, частности, самого приемника излучения В современных измерительных системах эти составляющие потока излучения измеряют и учитывают при калибровке приборов Простейшей иллюстрацией взаимного влияния объектов друг на друга является случай двух "абсолютно черных" бесконечных плоскостей с температурами T_1 и T_2 , расположенных параллельно друг другу Результирующий поток излучения в пространстве между ними (без учета поглощения) равен

$$\Delta R = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (6 21)$$

Взаимодействие тел различной геометрической формы с разными коэффициентами излучения описывается соответствующими коэффициентами Γ и $\epsilon_{\text{эфф}}$

6.2.4. Проблема коэффициента излучения. Без потери общности можно принять, что окружающая среда излучает как АЧТ, тогда уравнение (6 20) можно записать в виде

$$\Phi = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \epsilon_\lambda) R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T_a) \quad (6 22)$$

Из уравнения (6.22) следует, что только при визировании АЧТ ($\epsilon_\lambda = 1$) справедлива градуировка тепловизора, выполненная изготовителем по эталонному источнику (модели АЧТ), в то время как при визировании реальных объектов показания тепловизора зависят не только от температуры объекта, но и от его излучательных свойств. Параметры T и ϵ сложным образом воздействуют на вид ИК-термограмм, что затрудняет их интерпретацию в терминах температуры.

В табл. 6.2–6.4 приводятся величины коэффициента излучения для некоторых распространенных материалов. Следует обратить внимание на резкое различие

величин ϵ у металлов и неметаллов. Металлы, особенно полированные, выступают в роли зеркал, хорошо отражающих и плохо поглощающих тепловое излучение, большинство неметаллов могут рассматриваться как хорошо излучающие серые тела, многие из которых приближаются по свойствам к АЧТ. Еще одним интересным свойством излучения тел в ИК-диапазоне является тот факт, что некоторые материалы, такие как человеческая кожа, снег, краски и т.п., могут обладать выраженными отражающими свойствами в видимой части спектра, но быть хорошими поглотителями в ИК-спектре.

6.2. Интегральные коэффициенты излучения строительных материалов при температуре 20 °С

Материал	Коэффициент излучения
Бетон	0,84 0,95
Графит, окисленная поверхность	0,98
Гипс	0,8 0,9
Глина обожженная	0,91
Дерево строганое	0,8 0,9
белое сырое	0,7 0,8
шлифованное (полированное)	0,5 0,7
Кирпич красный шероховатый	0,86 0,03
Кирпичная кладка оштукатуренная	0,94
Кирпич шамотный	0,95
Краска масляная (любого цвета)	0,94
Лак	
черный матовый	0,96 0,98
белый	0,8 0,96
Мрамор сероватый полированный	0,93
Рубероид	0,93

Продолжение табл. 6.2

Материал	Коэффициент излучения
Сажа	0,95 0,97
Сажа с жидким стеклом	0,96
Сажа, нанесенная на твердую поверхность	0,96
Стекло матовое	0,96
Штукатурка (грубое покрытие)	0,91
Бумага черная, матовая	0,94
Эбонит	0,90
Плексиглас	0,92
Древесина (сосна)	0,86
Резина	0,94
Асбоцементная плита	0,92
Текстолит	0,93
Фторопласт	0,95
Ковровая белая керамика	0,97
Половая глазурованная керамическая плитка	0,91
Алебастр	0,89
Пенополиуретан	
негладкий	0,97
гладкий	0,98

6.3. Коэффициенты излучения строительных материалов, рекомендуемые фирмой FLIR Systems (AGEMA Infrared Systems) для различных спектральных диапазонов

Материал	Длина волны, мкм	Коэффициент излучения
Алюминий	КВ*	0,83 0,94
Асбест	КВ	0,96
Кирпич		
обычный	КВ	0,81 0,86
красный	КВ	0,90
Бетон сухой	5	0,95

Продолжение табл. 6.3

Материал	Длина волны, мкм	Коэффициент излучения
Замерзшая почва	ДВ*	0,93
Стекло	5	0,97
Гранит, естественная поверхность	5	0,96
Гравий	ДВ	0,28
Железо	КВ	0,91 0,96
Известняк	5	0,96
Известь	КВ	0,87
Пластик		
черный	КВ	0,95
белый	КВ	0,84
Картон	5	0,81
Штукатурка	КВ	0,86 0,90
Фанера	КВ	0,83 0,98
Полипропилен	КВ	0,97
Резина	5	0,97
Обои (легкий рисунок)	КВ	0,90

* КВ = 2,0 2,5 мкм. ДВ = 6,5 20,0 мкм

6.4. Коэффициенты излучения изделий радиоэлектроники [10]

Изделие	Коэффициент излучения
Резисторы	
угольные пленочные	0,85
металлопленочные	0,85 0,90
остеклованные трубчатые	0,90
проволочные намотанные	0,87
Конденсаторы	
переменные	0,85 0,95
электролитические	0,28 0,36
керамические дисковые	0,90 0,94
цилиндрические	0,90
пленочные	0,90 0,93
слодяные	0,90 0,95
стеклянные	0,91 0,92
Транзисторы	0,90

Продолжение табл 6 4

Изделие	Коэффициент излучения
Дюоды	0,89 0,90
Импульсные трансформаторы	0,91 0,92
Сглаживающие дроссели	0,89 0,93
Платы	
из слюды и эпоксидного стекла	0,86
фторопластовые	0,80
из эпоксидной фенольной смолы	0,80
Пластины	
из позолоченной меди	0,30
из меди с покрытием припоем	0,35
Провода	
луженые	0,28
медные с изоляцией на основе формальдегидной смолы	0,87 0,88
Детали из стеагита для выводов	0,87

Влияние коэффициента излучения на результаты термографирования объектов двояко Во-первых, отсутствие информации о его истинном значении делает невозможным точное измерение температуры, причем погрешность определения температуры ΔT тем выше, чем больше неопределенность значения ϵ В НК точное знание ϵ , как правило, необязательно, но случайные флуктуации ϵ как во времени, так и в пространстве (по поверхности объекта контроля) приводят к появлению ложных сигналов, которые могут интерпретироваться оператором или автоматическим устройством в качестве дефектов Типичный прием учета таких флуктуаций состоит в установлении некоторого порога принятия решения, однако, как показала история развития ТК, уровень ложных сигналов может быть столь высок, что без специальных процедур обработки сигнала тепловой метод не выдерживает конкуренции с другими методами НК

В целом следует избегать термографирования неокрашенных металлических поверхностей, особенно если рядом рас-

положены другие нагретые объекты, излучение которых может отражаться от визируемой поверхности и создавать блики на термограммах На таких поверхностях возникает множество ложных сигналов, обусловленных царапинами, окислами, грязью, краской и побочными факторами, поэтому обнаружение скрытых дефектов на их фоне затруднительно, за исключением тех случаев, когда дефектная зона существенно превосходит шумовые сигналы либо по амплитуде, либо по площади Измерять истинную температуру металлов целесообразно после нанесения на их поверхность хорошо излучающих покрытий черной краски, сажи и т д Иногда рекомендуют просто наклеивать на контролируемую поверхность полоску непрозрачной липкой ленты

Связь приращений ΔT и $\Delta \epsilon$ вытекает из законов теплового излучения Для серых тел из закона Стефана-Больцмана следует, что

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \quad (6 23)$$

Например, если на поверхности объекта контроля со средней излучательной

способностью $\varepsilon = 0,9$ имеет место локальное изменение данного параметра с амплитудой $\Delta\varepsilon = \pm 0,02$, что часто наблюдается на практике, то при термографировании объекта с комнатной температурой ($T = 300$ К) эквивалентные шумовые флуктуации температуры будут $\Delta T = \pm 1,7$ °С, что значительно превышает объявленную паспортную чувствительность современных тепловизоров (до 0,03 °С)

Для анализа связи ΔT и спектрального значения $\Delta\varepsilon_\lambda$ удобна формула (6 17), включающая в себя ε_λ в качестве сомножителя Нетрудно получить следующее выражение

$$\frac{\Delta R_\lambda(T)}{R_\lambda(T)} = n\varepsilon_\lambda \frac{\Delta T}{T}, \quad (6 24)$$

по форме оно аналогично формуле (6 23) Для более коротких длин волн величина n возрастает и, соответственно, повышается чувствительность ИК-системы к изменениям температуры

Важный для ТК вывод можно получить из выражений (6 17) и (6 24), если проанализировать отношение сигнал/шум S как отношение изменений сигналов $\Delta R_\lambda(T)$, вызванных изменениями ΔT и $\Delta\varepsilon$

$$S = \frac{(\partial R_\lambda(T)/\partial T) \Delta T}{(\partial R_\lambda(\varepsilon)/\partial \varepsilon) \Delta\varepsilon} = n \frac{\Delta T/T}{\Delta\varepsilon/\varepsilon} \quad (6 25)$$

В ТК, как правило, $n = 5/\beta = 5\lambda_{\max}/\lambda$, а абсолютную температуру изделия можно представить как сумму абсолютной начальной температуры T_{int} и избыточной температуры нагрева T_h (в предыдущих главах избыточная температура нагрева обозначена T) Тогда формулу (6 25) можно записать в виде

$$S = 5 \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \frac{1}{1 + T_{\text{int}}/T_h} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (6 26)$$

или, используя закон Вина $\lambda_{\max} \approx 3000/(T_{\text{int}} + T_h)$, в окончательном виде

$$S = 5 \frac{3000}{\lambda} \frac{T_h}{(T_{\text{int}} + T_h)^2} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (6.27)$$

где $\Delta T/T_h = C^{\text{run}}$ – текущий контраст температуры над дефектом

Из (6 27) следует, что для данного дефекта и фиксированного уровня помех величина S возрастает с уменьшением длины волны и ростом избыточной температуры нагрева Например, при изменении T_h от 10 до 100 °С ($T_{\text{int}} = 300$ К) величина S возрастает в 6 раз Строгая оптимизация температуры нагрева, т е подводимой к объекту контроля энергии, связана с анализом спектрального поведения $\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda$

Для случая термографирования на открытом воздухе можно получить простую связь изменений ΔT и $\Delta\varepsilon$ с учетом температуры окружающей среды, если в формуле (6 22) пренебречь спектральным ходом ε и геометрическими факторами:

$$\begin{aligned} \Phi \sim \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{AЧТ}}(T) d\lambda + (1 - \varepsilon) \times \\ \times \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{AЧТ}}(T_{\text{amb}}) d\lambda \end{aligned} \quad (6.28)$$

Для фиксированных спектральных диапазонов согласно формуле (6 17) можно

принять, что $\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{AЧТ}}(T) d\lambda = KT^n$, где K – численный коэффициент, а показатель степени n зависит от спектрального интервала Тогда уравнение (6 27) примет вид

$$\Phi \sim \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_{\text{amb}}^n \quad (6.29)$$

Для спектральных интервалов 3 ... 5,5 и 7 ... 14 мкм и диапазона температур от –20 до +80 °С соответственно $n = 10,11$ и $n = 4,83$

Очевидно, что тепловизор, калиброванный по черному телу, покажет кажу-

щуюся (радиационную) температуру серого тела $T_{\text{каж}}$ согласно следующему трансцендентному уравнению

$$T_{\text{каж}}^n = \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_{\text{amb}}^n \quad (6\ 30)$$

Соотношение вида (6 30) используется в ряде современных тепловизоров для автоматической коррекции температурных отсчетов, если введены значения коэффициента излучения ε и температуры окружающей среды T_{amb} (табл 6 5)

С учетом (6 30) формула для оценки связи изменений коэффициента излучения и температуры примет вид

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{n} \left[1 - \left(\frac{T_{\text{amb}}}{T} \right)^n \right] \left| \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right| \quad (6\ 31)$$

Следует заметить, что при $T = T_{\text{amb}}$ происходит полная компенсация излучательной способности твердых тел. На практике близкая ситуация имеет место, например, при термографировании ограждающих конструкций строительных сооружений, температура которых близка к температуре окружающей среды, при этом согласно (6 30) температурные отсчеты слабо зависят от излучательных свойств материалов.

Пример. Пусть стена здания находится при температуре $T = 263\text{ К}$ ($-10\text{ }^\circ\text{C}$) Температура окружающей среды и облачного неба $T_{\text{amb}} = 258\text{ К}$ ($-15\text{ }^\circ\text{C}$) Какова будет погрешность определения температуры штукатурки с помощью тепловизора, работающего в диапазоне длин волн $7 - 14\text{ мкм}$, если значение коэффициента излучения в тепловизоре установлено для кирпичной кладки ($\varepsilon = 0,94$)? Из табл. 6 2 следует, что при переходе от кирпичной кладки к штукатурке $\Delta \varepsilon = 0,94 - 0,91 = 0,03$. Тогда из формулы (6.31) $\Delta T \approx 0,15\text{ }^\circ\text{C}$ для обоих диапазонов $3 \dots 5,5$ и $7 - 14\text{ мкм}$, в то время как формула (6 23), не учитывающая отраженного излучения, дает $\Delta T \approx 2,1\text{ }^\circ\text{C}$. Физически различие в значениях ΔT означает, что

окружающая среда является источником компенсирующего излучения, обуславливающего снижение влияния флуктуаций коэффициента излучения на тепловизионные измерения.

В тепловидении для случая визирования объекта с температурой T_o на фоне (background) с температурой T_b вводят понятие "тепловой контраст" в определенном спектральном диапазоне [91]

$$TK = \frac{\int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_o) d\lambda - \int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_b) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_o) d\lambda + \int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_b) d\lambda} \quad (6\ 32)$$

В коротковолновом диапазоне длин волн ($3,5 - 5\text{ мкм}$) тепловой контраст вдвое выше, чем в длинноволновом диапазоне ($8 - 14\text{ мкм}$), что следует из формулы (6 24)

В оптической пирометрии предложено множество способов учета влияния коэффициента излучения, большая часть которых неприемлема в ИК-термографии и ТК, где требуется высокая оперативность работы алгоритма по всему полю изображения, а не в отдельных точках. Кроме того, многие способы ориентированы на объекты со стационарной температурой и не вышли за рамки патентных описаний. Согласно предложенной в [10] классификации, можно выделить две группы способов, представленных в табл 6 5. К первой группе относят способы, требующие предварительных сведений об объекте контроля или соответствующей его подготовки к испытаниям, ко второй группе – способы рациональной обработки потока излучения.

Из способов первой группы распространено чернение поверхности изделий, что обеспечивает низкий уровень помех, но имеет очевидные технологические недостатки. В качестве "черных" покрытий применяют лаки и краски различных типов и цвета (не обязательно черного), спреи в виде суспензии графитового порошка в воде, гравировальную эмаль,

6.5. Способы учета излучательных свойств объектов при оптической пирометрии (тепловидении)

Способ	Краткая характеристика
<i>Способы, требующие предварительных сведений об объекте контроля или его соответствующей подготовки</i>	
Нанесение на поверхность изделия покрытия с высоким равномерным коэффициентом излучения	В качестве покрытий применяют лаки и краски различных типов и цвета, спреи в виде суспензии графитового порошка в воде, гравировальную эмаль, сажевые эмульсии, сажу жженой резины, а также масло и воду. Способ малопроизводителен и, как правило, непригоден для объектов сложной формы, например изделий радиоэлектроники. Коэффициент излучения зависит от толщины покрытия.
"Форсирование" излучения	Излучение реальных объектов стремятся приблизить к излучению АЧТ путем создания полостей на поверхности объекта, размещения вблизи объекта отражающей сферы, нагретой пластины, использования термочувствительных и адиабатических насадок с последующим решением уравнения теплообмена в системе объект-насадка. Способы обладают низкой точностью и малой производительностью, непригодны в тепловидении.
Изменение температуры приемника излучения	Способ основан на третьем законе термодинамики, согласно которому теплообмен между телами с одинаковой температурой отсутствует. Сложное конструктивное решение и невозможность отслеживать динамические температуры делает способ непригодным в тепловидении и ТК.
Сравнение с эталоном	Абсолютное значение коэффициента излучения не определяется. Дефекты обнаруживают по степени отклонения температуры контролируемого изделия от температуры эталона. Применим при ТК однотипных объектов, например изделий радиоэлектроники, энергетических установок и т.п.
Исследование излучения в различные моменты времени	Способ является модификацией способа сравнения с эталоном и применим в активном ТК, где сигналы от скрытых дефектов существуют в течение определенного времени.
Использование внешней подсветки	Способ основан на применении формулы (6.28). Значение коэффициента излучения определяют по формуле $\epsilon = 1 - \rho$. Спектральный состав излучения подсветки должен совпадать со спектром принимаемого излучения. Реализация сложна при изменяющейся температуре объекта контроля.

Продолжение табл 6 5

Способ	Краткая характеристика
Нагрев объекта контроля в термокамере	Значение коэффициента излучения в различных точках поверхности объекта контроля определяют в термокамере с повышенной температурой, причем сигналы от дефектов отсутствуют В дальнейшем карту излучательной способности используют для корректировки текущих измерений температуры однотипных изделий Способ получил распространение при ТК изделий радиоэлектроники, реализован в софтвере EQUAL фирмы AGEMA Infrared Systems
<i>Способы "рациональной" обработки потока излучения</i>	
Использование коротковолновой части спектра	При смещении спектра регистрируемого излучения в коротковолновую область возрастает относительная температурная чувствительность аппаратуры ТК согласно формуле (6 24) Способ ограничен ухудшением температурного разрешения и ростом фоновых засветок
Цветовой способ оптической пирометрии	Способ основан на делении сигналов в двух разнесенных спектральных каналах согласно формуле (6 33) В тепловидении и ТК малоприменим вследствие слабой чувствительности отношения сигналов каналов к температуре Используется в высокотемпературной пирометрии
Способы, зависящие от поляризации излучения	Способы разработаны для высокотемпературной пирометрии, в тепловидении и ТК не применялись
Математическая обработка спектральных компонент (многоканальная оптическая пирометрия)	В пределах справедливости формулы Вина строят новое распределение по длинам волн и температурам, что приводит к решению N уравнений с N неизвестными Способ громоздок, его применимость в ТК неясна

сажевые эмульсии, сажу жженой резины, а также масло, воду и другие материалы, которые обладают высокой излучательной способностью в ИК-диапазоне, легко и равномерно наносятся на поверхность и удаляются с нее При использовании подобных покрытий могут возникать дополнительные помехи, вызванные мелкими включениями, воздушными пузырьками и неравномерной толщиной покрытий Тонкие покрытия достаточно прозрачны как для регистрируемого излучения, в результате чего основной материал может "про-

свечивать" через покрытие, так и для излучения нагрева, что снижает эффективность нагрева поверхности Кроме того, при очень коротких мощных импульсах нагрева, производимых, например, импульсными лампами и лазерами, возможно испарение покрытий вследствие высокой температуры в конце действия импульса

Существенным недостатком применения покрытий является снижение производительности ТК, поэтому чернение часто используют в лабораторных исследова-

дованиях для обеспечения наилучших условий ТК, но редко на практике

Первые интенсивные исследования по ТК авиационных конструкций были выполнены в США на военных самолетах, панели которых окрашены защитной краской зеленого цвета. Испытания неокрашенных панелей самолетов гражданской авиации представляют серьезную проблему. При ТК стальных корпусов химических реакторов и алюминиевых кожухов истинные температуры лучше всего определяются в зонах, покрытых ржавчиной, льдом и т.п. Поставщики тепловизоров в таких случаях рекомендуют наклеивать на контролируемую поверхность полоски липкой ленты, принимая, что для них $\epsilon \approx 0,9$ – $0,96$, в дальнейшем возможна переустановка значений ϵ для натуральных поверхностей.

6.2.5. Двухканальные тепловизоры

Суммируя сравнительные характеристики коротковолнового (3,5–5 мкм) и длинноволнового (8–14 мкм) каналов, можно констатировать, что

- КВ канал обладает более высокой относительной чувствительностью к температурным градиентам,

- ДВ канал, как правило, характеризуется более высоким температурным разрешением, что особенно важно при термографировании объектов с температурой, близкой к окружающей,

- при полевых съемках отраженное солнечное излучение представляет большую проблему в КВ канале,

- указанные КВ и ДВ соответствуют окнам прозрачности атмосферы, причем ДВ окно шире и пропускает больше абсолютной мощности теплового излучения для объектов с температурой окружающей среды,

- в спектральной съемке с борта летательного аппарата (самолета, спутника) используют большое число каналов (до 24), что позволяет анализировать разнообразные физические эффекты, которые по-разному проявляются на различных

длинах волн например, в ближнем ИК-диапазоне можно отслеживать созревание сельскохозяйственных культур, спектрально-зональный метод используют в аэрокосмической разведке,

- в ТК преимущество одного канала перед другим неочевидно, зачастую основным фактором является спектральное поведение поверхностных шумов, которые обусловлены поглотительно-излучательными свойствами материалов,

- отношение сигналов в двух каналах может быть использовано для снижения влияния излучательной способности на температурные измерения

Последняя особенность двухволнового тепловидения заимствована из цветовой пирометрии. Основная идея заключается в формировании отношения сигналов

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_1 \int_{\Delta\lambda_1} R_\lambda(T) d\lambda}{\epsilon_2 \int_{\Delta\lambda_2} R_\lambda(T) d\lambda} \quad (6.33)$$

Двухволновой метод обладает очевидными преимуществами при пирометрии объектов с достаточно высокой температурой и использовании коротковолновых каналов, однако его техническая реализация для низкотемпературных измерений не отработана.

Одним из немногих примеров коммерческого двухволнового тепловизора является исследовательская система Thermovision-900 фирмы FLIR Systems (AGEMA Infrared Systems), которая включает в себя два сканера, работающих в КВ и ДВ диапазонах. В последнее время появились гибридные детекторы излучения с двумя разнородными чувствительными площадками, расположенными одна под другой, что позволяет эффективно совмещать термоизображения, полученные в различных спектральных диапазонах.

Н. Дельгранде с сотрудниками описали применение системы Thermovision-900 для получения карт ϵ и T [92]. Метод названный авторами *двухволновой ИК-*

термографией (dual-band infrared imaging), основан на использовании сигналов двух каналов с эффективными длинами волн 5 и 10 мкм

$$U_5 = \epsilon T^{10}, \quad U_{10} = \epsilon T^5, \quad (6.34)$$

что следует из (6.17). Для получения изображений θ и E , отражающих соответственно распределения T и ϵ , предложены следующие формулы

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \left(\frac{T}{T_{av}} \right)^5 = \frac{U_5 / U_5^{av}}{U_{10} / U_{10}^{av}}, \\ E &= \frac{(U_{10} / U_{10}^{av})^2}{U_5 / U_5^{av}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.35)$$

где U_5^{av} и U_{10}^{av} – средние пиксельные значения в соответствующих изображениях

Более глубокий анализ данного метода можно провести, используя выражения (6.17) и (6.33). Из (6.33) видно, что подавление влияния ϵ тем эффективнее, чем ближе тело по своим излучательным свойствам к серому, т.е., если $\epsilon_{\lambda 1} = \epsilon_{\lambda 2}$, то U_1 / U_2 не зависит от ϵ . В свою очередь, для устранения влияния температуры необходимо обрабатывать функцию $U_1 / U_2^{n_1/n_2}$.

Для этих двух случаев отношение сигнал/шум, введенное выражением (6.25), примет вид

$$S(U_1 / U_2) = (n_1 - n_2) \frac{T_h}{T_{int} + T_h} \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \epsilon_{12} / \epsilon_{12}}, \quad (6.36)$$

$$S(U_1 / U_2^{n_1/n_2}) = 0, \quad (6.37)$$

где $\epsilon_{12} = \epsilon_1 / \epsilon_2$

Выражения (6.27) и (6.36), (6.37) позволяют сравнивать одноволновой и двухволновой способы ИК-термографии. Принципиальное различие между формулами (6.36) и (6.37) состоит в том, что нулевой результат обработки сигналов по алгоритму (6.37) означает полное подавление влияния температуры и возмож-

ность построения карт распределения излучательных свойств объектов. В свою очередь, отношение сигналов в формуле (6.36) сохраняет зависимость от ϵ , поэтому полное подавление излучательных свойств объектов возможно только для серых тел.

Особенности двухволновой ИК-термографии можно рассмотреть на примере системы Thermovision-900, для которой используют следующую модель сигнала в i -м спектральном диапазоне

$$U_i = \epsilon_i \frac{R_i}{e^{B_i/T} - F_i}, \quad (6.38)$$

где R_i, B_i, F_i – эмпирические константы, определяемые при калибровке конкретного тепловизора.

С учетом (6.38) уравнения (6.26), (6.36) и (6.37) приобретают следующий вид

$$S(U_1) = \frac{T_h}{(T_{int} + T_h)^2} \frac{B_1 e^{B_1/T} \Delta T / T_h}{e^{B_1/T} - F_1 \Delta \epsilon_1 / \epsilon_1}, \quad (6.39)$$

$$\begin{aligned} S(U_1 / U_2) &= \frac{T_h}{(T_{int} + T_h)^2} \times \\ &\times \frac{B_1 e^{B_1/T} (e^{B_2/T} - F_2) - B_2 e^{B_2/T} (e^{B_1/T} - F_1)}{(e^{B_1/T} - F_1)(e^{B_2/T} - F_2)} \times \\ &\times \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \epsilon_{12} / \epsilon_{12}}, \end{aligned} \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} S(U_1 / U_2^k) &= \frac{T_h}{(T_{int} + T_h)^2} \times \\ &\times \frac{B_1 e^{B_1/T} - k B_2 e^{B_2/T} \frac{e^{B_1/T} - F_1}{e^{B_2/T} - F_2}}{e^{B_1/T} - F_1} \times \\ &\times \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \epsilon_{12,k} / \epsilon_{12,k}}, \end{aligned} \quad (6.41)$$

где k – аналог n_1 / n_2 в формуле (6.37)

Очевидно, что надлежащий выбор величины k может сделать выражение $S(U_1 / U_2^k)$ независимым от температуры. Это значение k можно найти из уравнения

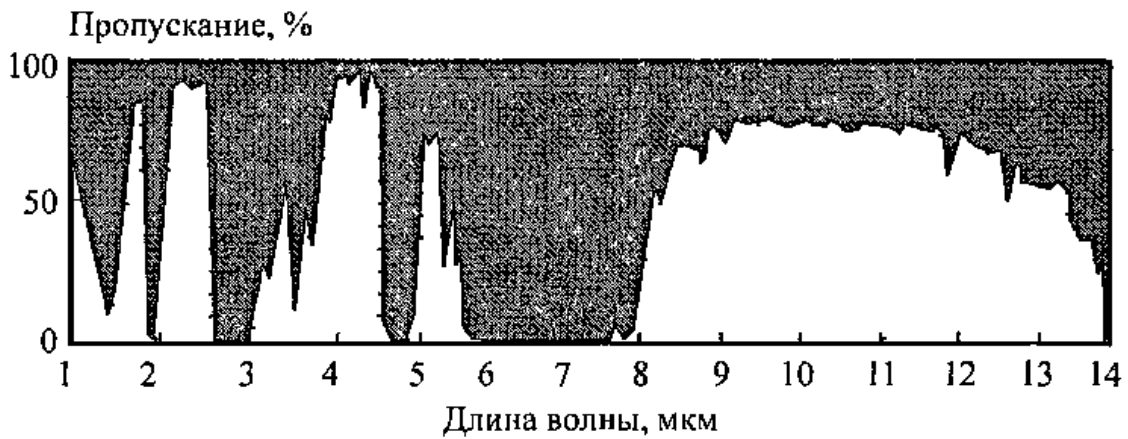


Рис. 6.5. Пропускание атмосферы на расстоянии 1,8 км

$$B_1 e^{B_1/T} - k B_2 e^{B_2/T} \frac{e^{B_1/T} - F_1}{e^{B_2/T} - F_2} = 0 \quad (6.42)$$

Расчеты показывают, что для двух распространенных спектральных интервалов (3–5,5 и 7–13 мкм) величина k близка к 2. Это доказывает, что центр тяжести этих интервалов сосредоточен соответственно возле длин волн 5 и 10 мкм. Таким образом, двухволновое тепловидение позволяет получать изображения излучательной способности, слабо зависящие от температуры объектов контроля, однако построение изображений истинной температуры зависит от особенностей поведения излучательной способности материала в выбранных спектральных интервалах.

6.2.6. Прохождение ИК-излучения через атмосферу ИК-излучение изменяет мощность и спектральный состав при прохождении через атмосферу в результате поглощения и рассеяния молекулами газов, аэрозолями, дождем, снегом и взвесями, такими как дым, туман, смог и т.п. Основными поглощающими компонентами являются вода и углекислый газ. Влажность атмосферы характеризуется количеством осаждаемой вдоль трассы воды. Например, при температуре воздуха 20 °С и влажности 60 % толщина этого слоя составляет около 13 мм/км. На любой длине волны и для определенного состоя-

ния атмосферы ослабление ИК-излучения описывается законом Ламберта–Бэра.

$$\tau_A(\lambda) = e^{-\gamma(\lambda)R}, \quad (6.43)$$

где γ — коэффициент, определяющий степень рассеяния и поглощения.

Уравнение (6.43) используется в современных тепловизорах для автоматической перекалибровки температурных отсчетов для некоторого среднего состояния атмосферы и расстояния между тепловизором и объектом контроля, причем последнее задается оператором с пульта управления тепловизора. Пример профиля поглощения вдоль трассы длиной 1,8 км приведен на рис. 6.5. Видно наличие двух "окон прозрачности" атмосферы 3–5 и 8–14 мкм. В нормальной атмосфере эффектами ослабления можно пренебречь на расстояниях до 20–30 м, в то же время они могут быть решающими, например, при спутниковой ИК-съемке. Атмосферные эффекты играют определенную роль при тепловизионной съемке линий электропередач, дымовых труб и других удаленных от наблюдателя объектов. В условиях промышленных цехов повышенное поглощение ИК-излучения может иметь место при наличии паров воды и пыли различного происхождения.

СИСТЕМЫ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

7.1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТРОЙСТВ АКТИВНОГО ТК

Технология активного ТК, схематично изображенная на рис 7 1, включает несколько взаимосвязанных шагов, что требует системного подхода к проектированию устройств контроля

Исходным моментом является описание объекта контроля и моделирование технически возможных процедур его контроля Под термином "технически возможная процедура" понимают процедуру, реализуемую как с точки зрения манипуляций с объектом, так и с точки зрения технической реализации компонент систем.

Исходным пунктом является *анализ объекта контроля* Теплофизические характеристики объекта, глубина и размеры дефекта определяют амплитуду температурного сигнала над дефектом и оптимальное время его выявления Предельные параметры обнаруживаемых дефектов определяются уровнем шума При правильно поставленном эксперименте преобладающими являются компоненты шума, обусловленные объектом контроля Таким образом, свойства объекта контроля определяют требования к аппаратуре ТК, в частности, к частоте записи термограмм, мощности и длительности нагрева Моделирование конкретной процедуры ТК позволяет осуществить оптимизацию эксперимента с учетом возможных практических ограничений Результатом оптимизированного эксперимента, как правило, является температурная функция $T(i, j, \tau)$, определенная в каждой точке последовательности термограмм (см главы 2, 3) Анализ экспериментальных дан-

ных проводят с помощью специализированного программного обеспечения (софтвера), ставя цель обнаружить дефекты с заданными статистическими характеристиками, такими как вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги (см главу 8) Если дефект обнаружен, возможна оценка его параметров путем решения обратной задачи ТК (см главу 4) Процедуры контроля завершаются составлением карт дефектов, которые являются бинарными изображениями, где, например, *единицу* приписывают пикселям, относящимся к дефектным областям, а *ноль* – бездефектным областям

С учетом технологии ТК, описанной выше, основными компонентами систем ТК являются 1) источник нагрева, 2) компьютерная тепловизионная система, 3) специализированные компьютерные программы для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных

Следуя данной технологии, в главах 2 4 изложены алгоритмы моделирования и дефектометрии Глава 5 посвящена описанию алгоритмов ТК В настоящей главе рассмотрены источники нагрева и тепловизионные системы

7.2. КОММЕРЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТК

Активный ТК конструкционных материалов, полуфабрикатов и готовых изделий можно рассматривать как штатный метод НК в ограниченном числе стран, прежде всего в США, Франции, Германии и, в какой-то степени, в СССР Подавляющее число систем, описанных в многочисленных публикациях, были разработаны для лабораторных исследований и в редких случаях заканчивались тиражированием в заметных количествах Краткое

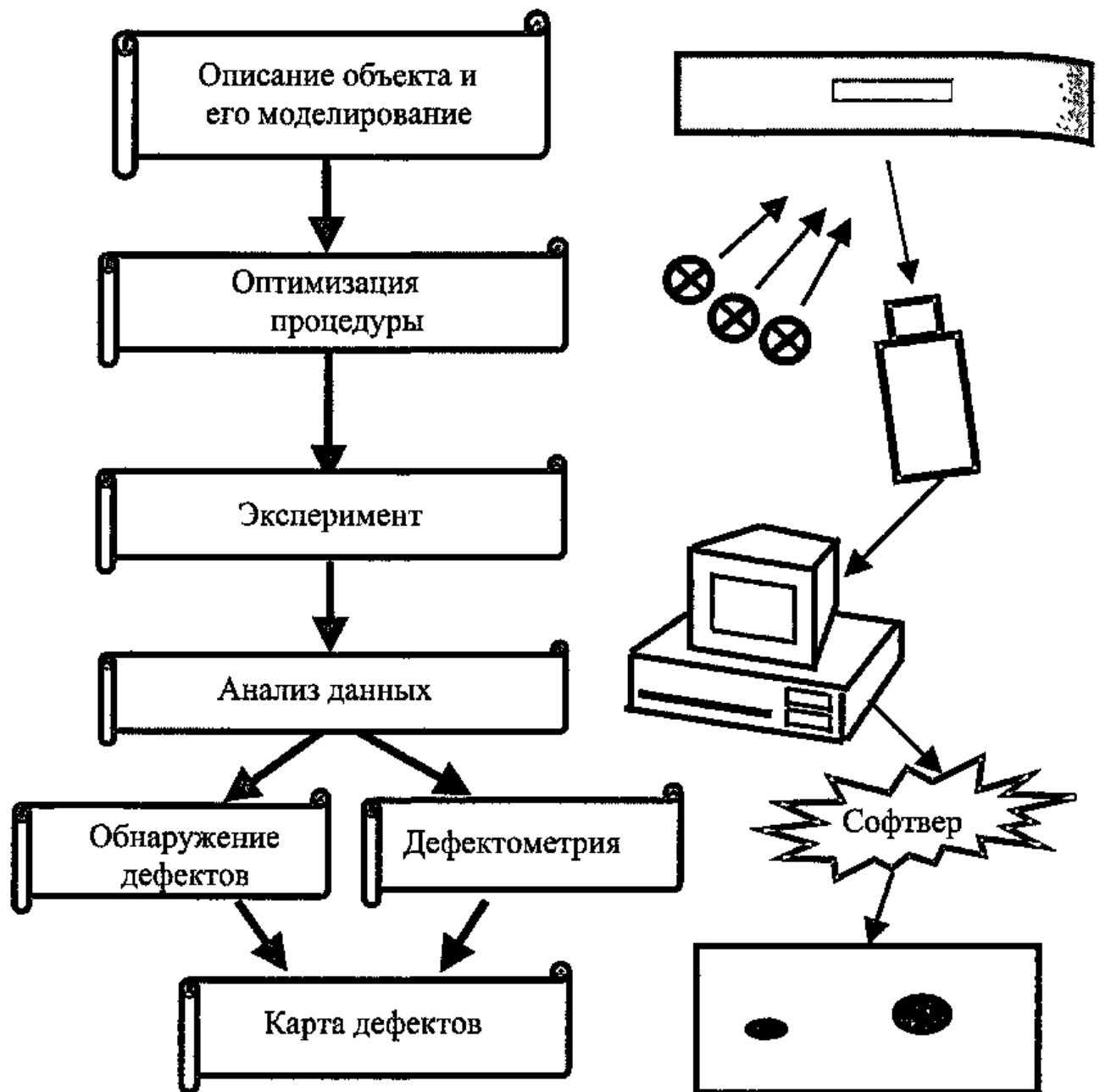


Рис. 7.1. Технология активного ТК

описание коммерческих систем активного ТК приведено в табл 7 1

В СССР был разработан ряд исследовательских систем активного ТК стеклопластиковых композитов (ЦНИИ СМ, г Загорск, и ХИРЭ, г Харьков), паяных конструкций (НИИ ИН, г Томск), электронных компонент (ВНИИ "Электронстандарт", г Гатчина, и МГУ, г Москва), многослойной теплозащиты (НПО "Алтай", г Бийск, НПО "Спектр", г Москва, и НИИ ИН, г Томск) С началом перестрой-

ки данные работы, проводившиеся, прежде всего, в интересах обороны страны, были свернуты Из систем, разработанных в последние годы, можно отметить установку для активного ТК металлопроката (фирма "ВЕМО", г Москва), компьютерную систему ТК авиационных материалов и изделий, реализующую различные типы нагрева и тепловизоры фирмы FLIR Systems, США (фирмы "ПЕРГАМ" и "Инновация"), а также компьютерные системы испытаний турбинных лопаток (ВИАМ и НПО "Салют")

7.1. Коммерческие системы активного ТК

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
EchoTherm™ (Thermal Wave Imaging, США)	Портативная система НК металлов, композитов, керамик и полимеров (импульсный ТК) Кольцеобразные или грубчатые импульсные лампы, кварцевые галогенные лампы
ThermoScope™ (Thermal Wave Imaging, США)	Развитие системы EchoTherm™ Интегрированная система импульсного нагрева, сбора данных и анализа
Sapphire™ (CEDIP, Франция)	Система компьютерной обработки данных, включая Фурье-анализ
TIP (Bales Scientific, США)	Система импульсного ТК и компьютерной обработки данных с помощью специализированного процессора
Система ТК с использованием периодических тепловых волн (AGEMA Infrared Systems, Германия)	Система использует базовый тепловизионный комплекс Thermovision™ 900, маломощный периодический нагрев, принцип синхронной термографии, построение фазограмм
Aladin™ (Siemens, Германия)	Система реализует принцип теплового микроскопа, метод тепловых волн
CompuTherm™ (EDO, США)	Система ТК изделий микроэлектроники
Barnes RM-2A (EDO, США)	ИК-микроскоп для ТК изделий микроэлектроники
Altaïr LI (CEDIP, Франция)	Система для визуализации механических напряжений в материалах в диапазоне частот от 0,1 до 1000 Гц, диапазон напряжений ±2000 МПа (по алюминию), разрешение по напряжению 0,4 МПа (по алюминию), температурное разрешение 0,02 °С Возможно решение задач НК методами синхронной и фазовой термографии
FDM 2000A (CEDIP, Франция)	Портативное устройство для определения температуропроводности материалов по методу Паркера
MESIR (Университет г Реймса и фирма Avion Marcel Dassault, Франция)	Система импульсного ТК изделий авиакосмической техники на базе тепловизоров фирмы AGEMA Infrared Systems (FLIR Systems)

Продолжение табл. 7.1

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
ThermoSoniX (Indigo Systems, США)	Система для синхронной ультразвуковой ИК-термографии, спектральный диапазон 35 мкм, температурное разрешение <math><0,02\text{ }^\circ\text{C}</math>, частота кадров 60 Гц, формат 256 × 256, несущая частота 20 кГц, мощность ультразвукового излучения до 400 Вт
Thermal Bond Inspection Systems (NASA, США)	Система импульсного ТК изделий авиакосмической техники
Системы ТК фирмы THERMOSEN-SORIK (Германия)	На базе собственных QWIP и FPA тепловизоров фирма предлагает системы импульсного ТК, в частности, роботизированную систему испытаний покрытий турбинных лопаток с использованием эталона оценивают толщину покрытия и параметры расслоений между покрытием и основным материалом (осмотр с 5-ти ракурсов производят за 40 с) Основной алгоритм обработки информации – преобразование Фурье во времени
Системы ТК фирмы InfraTec (Германия)	В сотрудничестве с фирмой CEDIP предлагаются системы импульсного ТК, собственный профиль фирмы – пассивная ИК-диагностика с использованием тепловизоров Varioscan
Переносная система активного ТК (Университет г Хельсинки, Финляндия)	Система состоит из ручного сканера и блока управления В сканере размещена система линейного нагрева (лазерный нагрев: размер строки сканирования 30 × 0,2 мм, мощность до 15 Вт, индукционный нагрев: катушка размером 60 × 7 мм, частота 1–30 МГц, мощность до 200 Вт) Используется для контроля углепластиковых композитов и покрытий на металлах
"ИНТРОТЕРМ" (Центр лазерных технологий, Россия)	Система фототермического контроля; пространственное разрешение 50 мкм, полное поле обзора 200 × 200 мм, мгновенное поле зрения 6 × 25 мм, производительность испытаний до 3 см ² /с
"ИнфраТест" (Научный Парк МГУ, Россия)	Система для лазерного фототермического контроля Используются световод и диодный лазер мощностью 1–10 Вт, работающий на длине волны 0,98 мкм

Продолжение табл 7 1

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
Установка активного ТК проката ("ВЕМО", Россия)	Система разработана для российских металлургических предприятий. Использует кварцевые лампы или газовые горелки для нагрева движущегося металлического листа и коммерческий тепловизор для регистрации температуры в оптимальный момент времени.
Система обнаружения воды в авиационных соговых панелях (ПЕРГАМ – "Инновация", Россия)	На базе тепловизоров FLIR Systems предлагается система пассивного и активного обнаружения воды в композиционных и алюминиевых конструкциях самолетов.
Система активного ТК турбинных лопаток (ВИАМ, НПО "Салют", Россия)	Системы для тепловизионного контроля внутренних каналов турбинных лопаток.

7.3. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОБЪЕКТОВ ТК

Физическая природа тепловой стимуляции зачастую решает тип процедуры ТК и схему стимуляции (см главу 1). Как правило, объект контроля нагревают, поскольку интенсивность охлаждения обычно невысока (исключение составляет охлаждение раскаленного металла струей воды).

Распространены следующие типы нагрева: 1) оптический, 2) индукционный, 3) сверхвысокочастотный (СВЧ), 4) электрическим током, 5) механический, 6) горячими или холодными газами или жидкостями.

Пространственные профили зон нагрева показаны на рис 7 2.

Согласно теории ТК, изложенной в главах 2–4, наилучшее выявление скрытых дефектов в конструкционных материалах обеспечивает мощный кратковременный нагрев. Этому требованию соот-

ветствуют все вышеперечисленные виды нагрева, за исключением механического и с помощью газов или жидкостей.

Стимулирующий нагрев электрическим током используют преимущественно в лабораторных исследованиях, за исключением ТК электротехнических и радиоэлектронных компонент, нагреваемых электрическим током в процессе их функционирования.

Контактные электронагреватели либо подают мощные импульсы электрического тока непосредственно в металлические изделия, либо нагревают изделия за счет теплопроводности при механическом контакте. Важные преимущества нагревателей первого типа – кратковременность действия (доли и единицы секунд) нагрева и отсутствие излучательных помех, их недостатки – большая сила тока во вторичной обмотке понижающего трансформатора и наличие контактного сопротивления между изделием и концами вторичной обмотки. Нагреватели второго

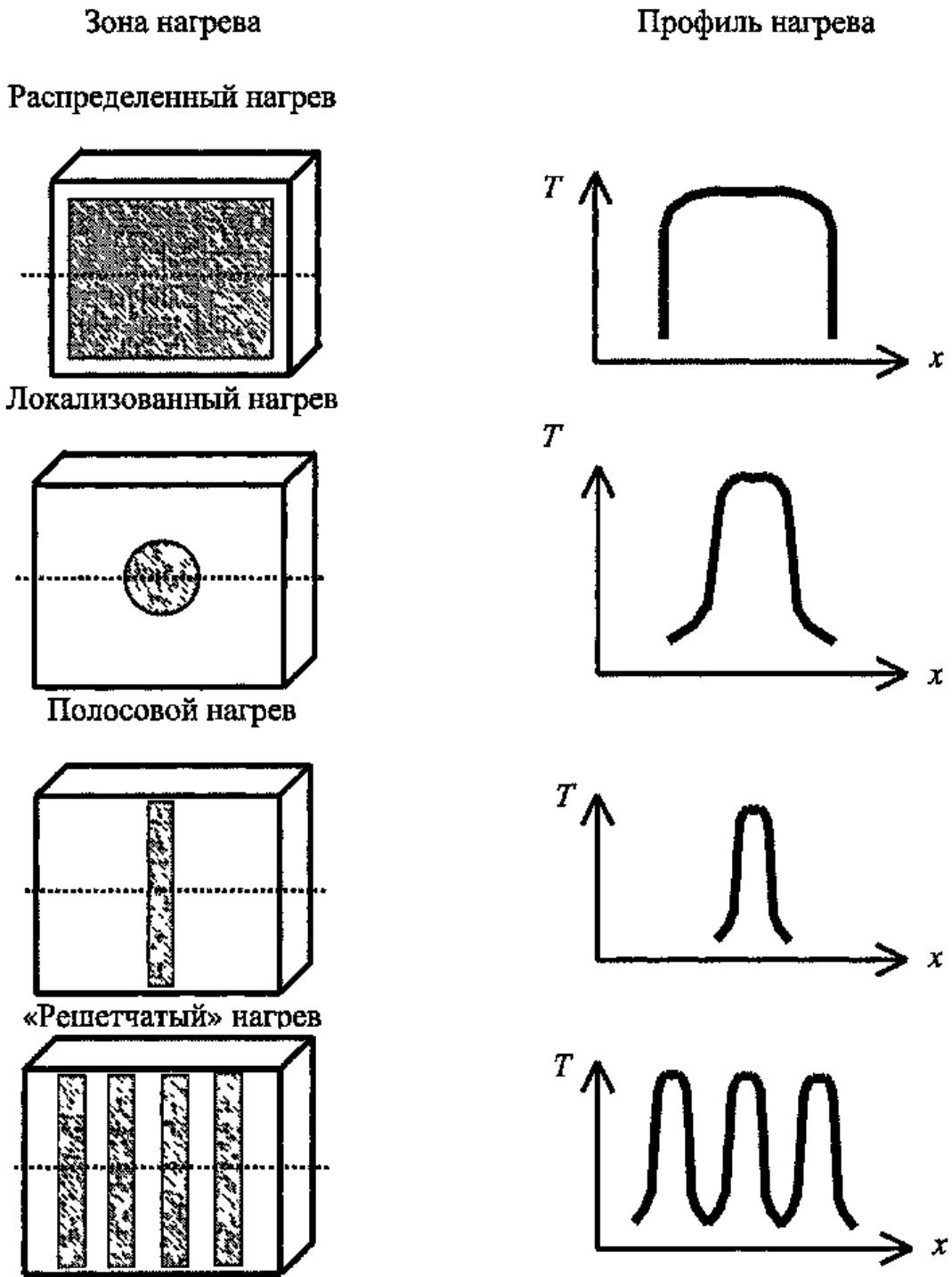


Рис. 7.2. Профили зон нагрева

типа, снабжаемые выравнивающими медными пластинами, могут создавать большую зону нагрева, но обладают большой тепловой инерцией, создают мощную излучательную помеху и требуют хорошего контакта поверхности нагрева с изделием. Часть из указанных недостатков преодолена в современных гибких нагревателях, в частности, на углеродных нитях. Нагреватель подобного типа, названный "тепловым одеялом", применяется европейским

концерном Airbus Industry для обнаружения воды в композиционных сотовых панелях самолетов.

В индукторах и СВЧ-нагревателях используют эффект преобразования энергии поля, созданного током высокой частоты, в тепловую энергию. При индукционном нагреве металлическое изделие должно быть охвачено витком провода, по которому пропущен переменный ток, создающий переменное магнитное поле.

7.2. Промышленные СВЧ-источники для нагрева диэлектриков [93]

Материал	Частота, кГц	Удельная мощность, Вт/см ³	Напряженность поля, В/см	Продолжительность нагрева
Древесина (сушка)	300	0,04	400	до 30 ч
Древесно-волоконистая масса (сушка)	20 000	1,5	500	5 30 мин
Бумага (сушка)	30 000	5,0	800	до 3 ч
Винипласт (сварка)	75 000	600	10 000	0,5 20 с
Пластмасса (сварка)	200 000	1500	30 000	0,03 с

Вследствие электромагнитной индукции в изделии наводятся вихревые токи, которые вызывают нагрев металла. При возрастании частоты тока возрастает скин-эффект, проявляющийся в неравномерном распределении плотности тока по сечению и увеличении его на поверхности. Энергетически рациональность процесса индукционного нагрева определяют по наименьшей частоте тока f_{\min} , обеспечивающей приемлемый КПД. Рекомендуют следующую формулу [93]

$$f_{\min} = 8/(L\mu\rho), \quad (7.1)$$

где L – средний размер нагреваемого тела, м, μ – магнитная проницаемость, Гн/м, ρ – удельная электрическая проводимость, Ом/м.

Индукционный нагрев, весьма распространенный в металлургии, в ТК используется сравнительно редко. Этот вид нагрева эффективен для стимуляции металлов, находящихся за неметаллами, при этом хорошо выявляются дефекты в зоне контакта неметалл–металл. Для стальных сплавов можно применять ток промышленной частоты (50 Гц). Д. Грином описан способ нагрева цилиндрических тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) одиночным индукционным витком [94].

Нагрев диэлектриков переменным электрическим полем происходит благодаря феномену переполаризации, протекающему с преодолением сил трения. Эффективность нагрева возрастает при уве-

личении тангенса угла потерь диэлектрика $\operatorname{tg} \delta$. Удельную мощность W (Вт/см³), подводимую источником высокочастотной энергии к телу, которое размещено между пластинами конденсатора, определяют по формуле [93]

$$W = 0,55 \cdot 10^{-12} \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E^2, \quad (7.2)$$

где f – частота, Гц, E – напряженность электрического поля, В/см.

Для нагрева диэлектриков используют средневолновый ($f = 300 \text{--} 3000$ кГц), коротковолновый ($f = 3 \text{--} 30$ МГц) и метровый ($f = 30 \text{--} 300$ МГц) диапазоны. Характеристики промышленных источников СВЧ-тока приведены в табл. 7.2.

С точки зрения ТК, дополнительным преимуществом нагрева излучением СВЧ-диапазона, как и электрическим током, является то, что он может действовать по всему объему тела, повышая контраст температуры в зоне дефекта. В частности, СВЧ-нагрев имеет неоспоримые преимущества при обнаружении влаги в пористых неметаллах.

В дуговых нагревателях газа – *плазмотронах* – используется столб плазмы, возникающей между катодом из тугоплавкого материала и анодом, в качестве которого служит изделие или сопло. В сопло, изготовленное обычно из меди и охлаждаемое водой, подается газ, молекулы или атомы которого ионизируются при высокой температуре. В плазменных установках для резки металлов плотность энергии

может достигать $2 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Плазмотрон можно использовать для быстрого сканирующего нагрева, однако нестабильность пламени, оптическая помеха, громоздкость и высокая стоимость не позволяют считать этот источник перспективным в ТК.

Практически не используют в ТК *электронно-лучевые пушки*, которые при сварке могут создавать плотность потока до 10^{13} Вт/м², однако гребуют вакуума не менее 10^{-5} Па (при нормальном давлении длина свободного пробега электронов составляет всего $3,5 \cdot 10^{-3}$ м).

При ТК слоистых, композиционных и сотовых изделий, применяющихся главным образом в авиакосмической технике, наиболее популярны оптические способы нагрева, которые реализуют с помощью 1) лазеров, 2) импульсных ламп, 3) галогенных ламп непрерывного действия, 4) стандартных электрических ламп накаливания. Преимуществами *лазеров* являются возможность варьировать размеры зоны нагрева, монохроматичность излучения и высокая плотность мощности (до 10^{21} Вт/м²). Монохроматичность важна, если поверхность изделия визируют тепловизором в ходе нагрева, поскольку при этом возможно разнесение спектрального диапазона лазера и тепловизора, однако на практике такой способ ТК разрабатывался для ограниченного круга задач, в частности, исследователями из Университета Джона Гопкинса (США) [26]. Высокую плотность мощности лазерного нагрева получают в зонах малого размера, поэтому такой способ плохо сочетается с тепловизионной регистрацией температуры. При использовании техники "летающего пятна" мощность лазерного излучения "размазывается" по большой площади, снижая среднюю подводимую мощность. Учитывая, что КПД лазеров, как правило, невелик, их практическое применение в ТК ограничено определением температуропроводности высокотеплопроводных образцов по методу Паркера и рядом специальных задач НК (см главу 9).

В практических установках, например, фирмы Thermal Wave Imaging (США), используемых в авиакосмической промышленности, чаще всего применяют *ксеноновые импульсные лампы*. Такие лампы используют для накачки лазеров, а также в качестве ламп-вспышек в павильонной фотосъемке. Коммерческие фотографические системы, как правило, включают две лампы с энергией 3 кДж каждая и один блок питания, длительность вспышки составляет приблизительно 5 мс. Такие системы производятся фирмами Balcar, Calumet, Vowers и др. Спектр излучения ксеноновых ламп равномерный в интервале от 0,2 до 1,4 мкм с выбросами на некоторых длинах волн. Применение импульсных ламп часто требует введения дополнительных устройств фокусировки. В специализированных системах ТК используют несколько трубчатых ламп с энергией 2–5 кДж каждая.

Одной из проблем применения кратковременного мощного излучения (0,1–1 мс) может быть перегрев изделия в конце действия импульса. Температура тонкого приповерхностного слоя изделия может превысить сотни, а в ряде случаев, тысячи градусов, в результате чего, например, возможно испарение покрытий различного типа (красок). Для устранения этого явления необходимо увеличивать длительность импульса до 10–100 мс. Другой проблемой оптического нагрева металлов является их высокий коэффициент отражения, что существенно снижает эффективную поглощаемую энергию и приводит к нежелательным отражениям. Поэтому металлы, в особенности, алюминий, медь, нержавеющую сталь и т.п., целесообразно контролировать тепловым методом при наличии на их поверхностях красок или лаков любых типа и цвета.

Весьма технологичными являются *ИК-излучатели*, которые подразделяют на: 1) высокотемпературные, нагреваемые до 1500 °С (ИК-лампы накаливания, кварцевые галогенные лампы и т.п.), 2) низкотемпературные, нагреваемые до 450–

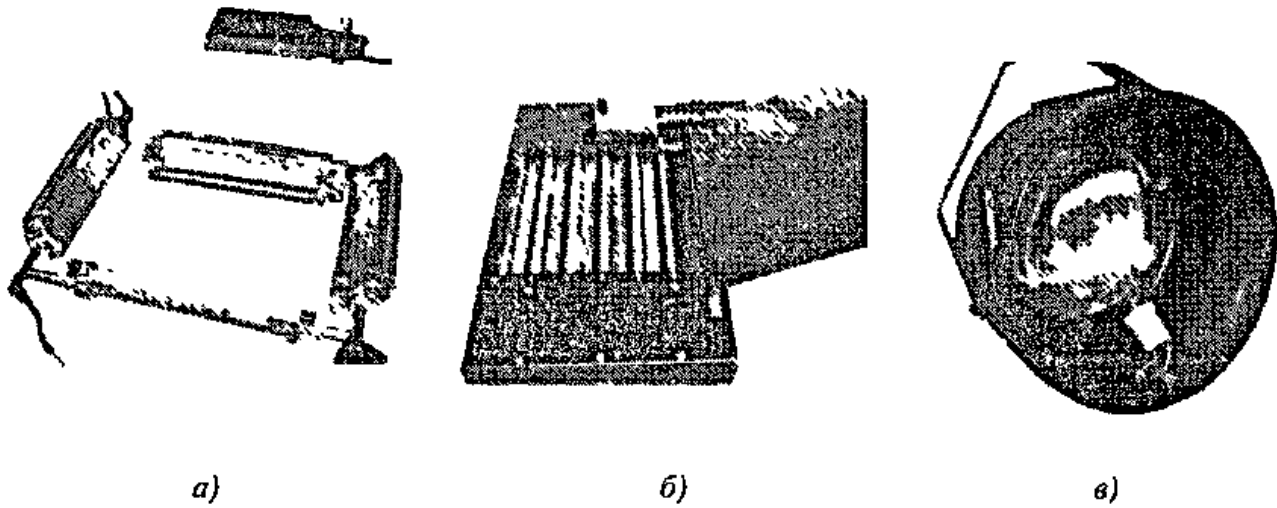


Рис. 7.3. Примеры оптических нагревателей:

а – импульсные ксеноновые лампы (плотность энергии до 25 кДж/м^2 , длительность нагрева 1 мс, неравномерность нагрева 10 % в зоне $0,2 \times 0,2 \text{ м}$), *б* – галогенные лампы (плотность энергии до 5 кВт/м^2 , длительность нагрева 5 – 50 с, неравномерность нагрева 25 % в зоне $0,5 \times 0,5 \text{ м}$), *в* – лампа накаливания с рефлектором (плотность энергии до 2 кВт/м^2 , длительность нагрева 1 – 1000 с, неравномерность нагрева до 300 % в зоне $0,5 \times 0,5 \text{ м}$)

1000 °С (кварцевые стеклянные, керамические, мегаллические и другие излучатели), 3) низкотемпературные, нагреваемые до 450 °С (стеклянные, керамические, металлические) *Кварцевые галогенные лампы*, мощность которых изменяется от 0,5 до 2,5 кВт, выпускают различной формы и размеров. На их основе разрабатывают достаточно мощные и гибкие нагреватели, пригодные для ТК разнообразных изделий, выполненных преимущественно, из неметаллов. Длительность нагрева в таких случаях не превышает десятков секунд. Сходные результаты, но при более длительном нагреве, достигают, используя стандартные лампы накаливания. Большое

количество ламп накаливания объединяют в батареи, обеспечивающие нагрев на значительной площади. Возможно использование одиночной лампы накаливания большой мощности (до 1 кВт) в светильнике прожекторного типа. Одиночные лампы с внешними или внутренними рефлекторами хорошо стыкуются с точечными ИК-радиометрами. Плотность энергии в зоне облучения ламповыми нагревателями может достигать 50 кВт/м^2 . В некоторых задачах ТК возможно использование солнечного излучения, плотность мощности которого в средних широтах в безоблачный день составляет приблизительно 1 кВт/м^2 .

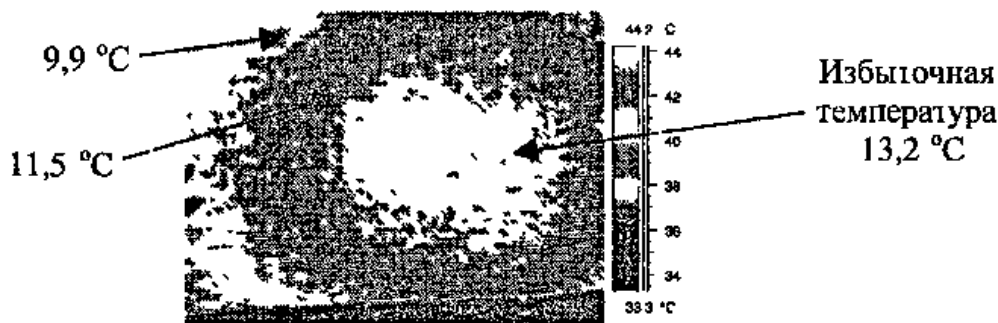






Рис. 7.4. Температурное поле зачерненной мишени размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ на расстоянии 0,6 м после нагрева в течение 5 с с помощью галогенной лампы (рис. 7.3, б)

7.3. Формы импульсов нагрева при моделировании задач ТК

Импульс Дирака	Прямоугольный импульс	Гауссовский импульс	Последовательность импульсов
			

Оптическое излучение легко поддается модуляции, что используют в методе тепловых волн. Форма одиночного импульса нагрева, как правило, не имеет существенного значения для результатов ТК. В ряде случаев следует учитывать слабый длительный нагрев, производимый горячими баллонами ламп уже после окончания импульса нагрева. В целом, при моделировании процедур ТК, используют формы импульса нагрева, приведенные в табл. 7.3. Некоторые оптические нагреватели показаны на рис. 7.3.

Для того, чтобы реализовать высокую производительность тепловидения, источник нагрева должен обеспечивать требуемую плотность энергии в зоне как можно большего размера. Форму и размер зоны нагрева удобно определять эмпирически, используя зачерненную мишень, выполненную из материала с низкой теплопроводностью. На рис. 7.4 для нагревателя рис. 7.3, б показано поле облучения мишени размером $0,5 \times 0,5$ м на расстоянии 0,6 м. Максимальная неоднородность нагрева от центра к периферии составляет 25 %.

Со строчно-сканирующими системами хорошо сочетаются полосовые нагреватели с сопротивлением на основе сплавов с высоким электрическим сопротивлением (нихрома, фехраля, константана), выпускаемые в виде проволок, лент и полос. Часто используют нагреватели в виде цилиндрического керамического стержня, на который вплотную или с шагом намотана нихромовая проволока толщиной 0,5–3 мм. Такие нагреватели обладают регулируемым

распределением потока по длине, обеспечивая плотность энергии до 100 кВт/м^2 . Из промышленных устройств к ним наиболее близки трубчатые электронагреватели (ТЭН). Недостатки полосовых нагревателей: необходимость размещать их вблизи объекта контроля, трудность нагрева больших зон и высокая инерционность. Недавно исследователями NASA (США) на базе подобного нагревателя предложена установка ТК для выявления коррозии в алюминиевых самолетных панелях и тонких стальных листах.

В комплекте с тепловизорами перспективно применение плоских нагревателей с пластинчатым зигзагообразным телом накала из высокоомных резистивных материалов и сплошных полупроводящих слоев, нанесенных на термостойкое стекло.

Наиболее прост в реализации способ нагрева изделий с помощью потока горячего воздуха, производимого устройствами типа фена, или "воздушной пушки" (fan, air gun). Температуру поверхности можно контролировать тепловизором в ходе нагрева, однако эффективная мощность, поглощаемая изделием, при этом невелика (обычно до 500 Вт/м^2). Данный вид нагрева применим для ТК неметаллов, в которых, с одной стороны, температурные градиенты развиваются в течение длительного времени, а, с другой стороны, имеется опасность перегрева поверхности при использовании более мощного нагрева. Слабый равномерный нагрев возможен путем перемещения объекта контроля из помещения с одной температурой в другое

более теплое (холодное) помещение В частности, такой способ был предложен У. Беллером еще в 1965 г при ТК корпусов ракетных двигателей [3]

Тепловую стимуляцию путем охлаждения осуществляют путем размещения изделий в холодильнике или опрыскивания жидким азотом Воду в соловых авиационных панелях можно обнаружить при посадке самолета за счет естественной разницы температур в условиях полета и на земле

Нагрев за счет механического гистерезиса применяют в экспериментах с низкочастотным циклическим нагружением образцов Этот процесс является относительно слабоэнергетическим и пригоден в исследованиях по анализу разрушения материалов Попытки использовать такой способ на практике не получили распространения в силу низкого отношения сигнал/шум В то же время в последние годы интенсивно разрабатывают процедуру ТК с использованием ультразвукового возбуждения тепловых полей (см п 5 9 2), основным преимуществом которой является селективный нагрев специфических дефектов при практически ненагреваемом объекте испытаний

При выборе оптимального источника тепловой стимуляции руководствуются следующими факторами 1) степенью контакта с объектом, 2) необходимой длительностью нагрева, 3) возможностью модулировать излучение, 4) излучаемой мощностью (энергией), 5) мощностью (энергией), эффективно поглощаемой конкретным объектом контроля, 6) спектральным диапазоном (в случае использования оптического излучения), 7) шумами, создаваемыми в тракте регистрации температуры, 8) требованиями техники безопасности, 9) КПД

7.4. СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ (ТЕПЛОВИЗОРЫ)

Исследование пространственных распределений температуры по одной или

двум координатам требует сканирования поверхности объекта, которое осуществляют либо механически (оптико-механически), либо электронным способом

В течение второй половины XX-го века использование принципа оптико-механического сканирования было одной из основных черт, разделявших системы визуализации в видимом (ближнем ИК) и средневолновом ИК-диапазоне В оптико-механических устройствах отклонение угла зрения производят с помощью колеблющихся или вращающихся оптических элементов (призм и зеркал), что требует их прецизионной механической обработки и сборки В 1970-90-х годах в коммерческих тепловизорах применяли, в основном, две системы оптико-механического сканирования Первая система, воплощенная в приборах фирм AGEMA Infrared Systems (Швеция), использовала вращающиеся во взаимно-перпендикулярных направлениях кремниевые призмы, через которые проходил регистрируемый поток ИК-излучения (кремний обладает высоким коэффициентом преломления в ИК-диапазоне и обеспечивает необходимые углы отклонения оптического луча) Вторая система, в которой сканирование осуществлялось колеблющимися зеркалами, была запатентована и реализована фирмой Inframetrics (США)

Принцип электронного сканирования был реализован в разработанных в конце XX-го века матричных фотодетекторах нового поколения В англоязычной литературе этот тип фотоприемников называют матрицами, размещаемыми в фокальной плоскости объектива (Focal Plane Array—FPA) Основными преимуществами матричных систем тепловидения являются отсутствие движущихся механических частей и одновременное визирирование сцены всеми чувствительными площадками одновременно Последнее преимущество, которое реализовано только в устройствах мгновенного визирирования (snapshot), позволяет увеличить время экспозиции каждой чувствительной площадки, те

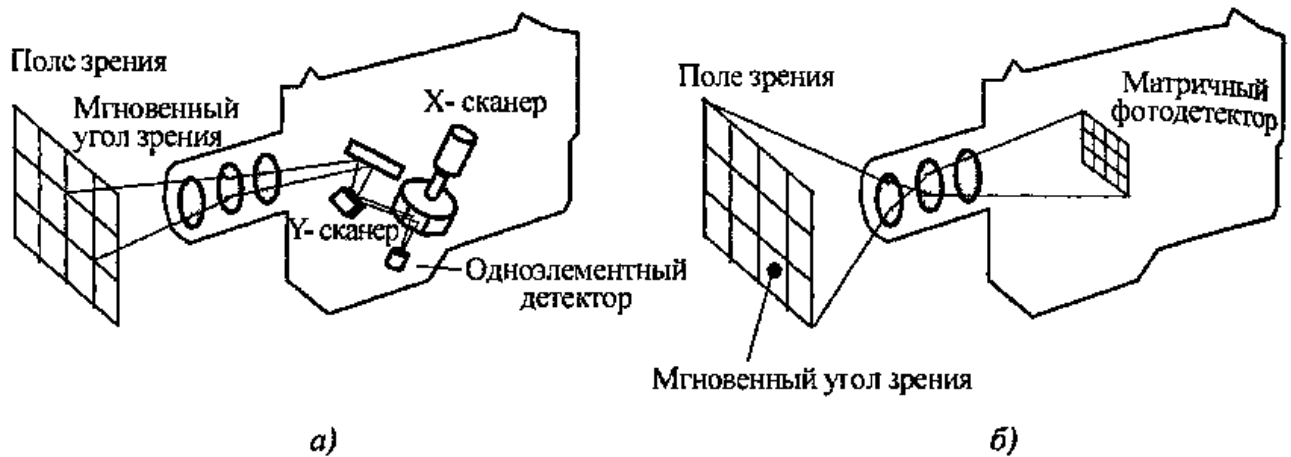


Рис. 7.5. Схемы тепловизоров с оптико-механическим (а) и электронным сканированием (б)

уменьшить шумы, и обеспечить одновременное наблюдение быстроменяющихся тепловых событий (например, при ТК коррозии тонких алюминиевых листов)

Упрощенные схемы тепловизоров, реализующих оптико-механическое и электронное сканирование приведены на рис 7.5 Оптико-механические системы содержат большое количество движущихся деталей, тогда как матричные тепловизоры фактически являются передающими телевизионными системами ИК-диапазона

Современные матрицы используют как фотонные, так и тепловые ИК-приемники Наиболее доступны по цене показывающие и измерительные тепловизоры, работающие на неохлаждаемых болометрических (ферроэлектрических) матричных детекторах Для специальных применений, где требуется высокая частота смены термоизображений, повышенное температурное разрешение или спектральная селективность, разработаны тепловизоры на охлаждаемых матрицах Наиболее распространены матрицы на основе силицида платины (PtSi), антимонида индия (InSb), тройных соединений (HgCdTe) и так называемых квип-материалов (QWIP), в частности арсенида галлия GaAs

Тепловизоры являются оптико-электронными приборами, состоящими из

- ИК-приемника (детектора излучения),
 - объектива,
 - сканера (кроме матричных тепловизоров),
 - устройства охлаждения ИК-приемника (отсутствует в ряде моделей),
 - встроенного эталона температуры;
 - электронного блока,
 - монитора,
 - программного продукта
- Коммерческие тепловизионные системы также включают
- систему записи и твердого копирования термограмм,
 - систему транспортировки прибора;
 - блок питания и/или аккумулятора.

Тепловизоры разного применения обладают различными техническими характеристиками и стоимостью, однако в основе их работы лежат общие физические принципы, рассмотренные ниже.

7.5. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники, или детекторы излучения, принимающие и преобразующие энергию оптического излучения в энергию других видов, подразделяют на *биологические* и *физические* Среди биологических приемников излучения (ПИ) следует выделить человеческий глаз, который реги-

стрирует видимый свет в диапазоне длин волн от 0,38 до 0,78 мкм и диапазоне яркостей, перекрывающем 11 порядков. После адаптации к темноте глаз воспринимает тепловое излучение объектов, начиная с температуры 450 °С. Таким образом, при соответствующих условиях, человек может "термографировать" перегретые электрические контакты, горячий металл и другие объекты с температурой выше упомянутого порога.

Физические ПИ генерируют электрический сигнал, пропорциональный мощности оптического излучения, поглощенного их чувствительными площадками. Приемники ИК-излучения включают

- чувствительный элемент (элементы),
- входное окно, отделяющее внешнюю среду от замкнутого объема вокруг чувствительного элемента,
- апертуру, ограничивающую поле зрения (возможно охлаждение и/или термостабилизация апертуры),
- сосуд Дьюара с хладагентом (возможна система охлаждения на базе термоэлектрических холодильников или микрокомпрессора Стирлинга, некоторые детекторы работают при температуре окружающей среды)

ПИ разделяют на два основных класса: *тепловые* и *фотонные* (фотозлектрические)

Принцип действия тепловых детекторов основан на одном из четырех явлений: 1) *болометрическом* эффекте (изменение электрического сопротивления чувствительного элемента при нагреве поглощенным ИК излучением), 2) *термовольтаическом* эффекте (выходное напряжение генерируется нагретым сплавом разнородных металлов), 3) *термопневматическом* эффекте (изменение температуры детектора вызывает расширение газового объема), 4) *пирозлектрическом* эффекте (изменение температуры вызывает модуляцию дипольного момента кристаллического чувствительного элемента)

В фотонных детекторах поглощенные кванты излучения (фотоны) увеличивают число свободных носителей электрического заряда, изменяя электрическое состояние чувствительного элемента. При использовании эффекта *фотопроводимости* поглощенное ИК-излучение изменяет электропроводность чувствительного элемента. В рамках *фотовольтаического* эффекта, поглощенное излучение создает электронно-дырочные пары вблизи р-п перехода, генерируя электрический ток. В меньшей степени в детекторах ИК-излучения используют *фотозлектромагнитный* эффект.

7.5.1. Тепловые приемники. Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла при нагреве чувствительного элемента поглощенным тепловым излучением. Исторически болометры были одними из первых видов ИК детекторов, однако их применение в тепловизорах в течение длительного времени сдерживалось их значительной инерционностью. В конце XX-го века появились малоинерционные микроболометрические (феррозлектрические) матрицы, на основе которых были созданы неохлаждаемые матричные тепловизоры, получившие в настоящее время большое распространение.

Пирозлектрические приемники излучения производят из материалов, называемых сегнетоэлектриками, например титаната бария. Эти материалы обладают постоянной электрической поляризацией, являющейся сильной функцией температуры. В течение длительного времени разрабатывали недорогие ИК-тепловизоры на базе пирозлектрических видиконов (пировидиконов), однако в настоящее время они практически полностью вытеснены тепловизорами с матричными детекторами.

Инфракрасные термометры (пирометры) часто используют тепловые приемники на основе гермоэлементов, работающих на принципе термоэффекта Зее-

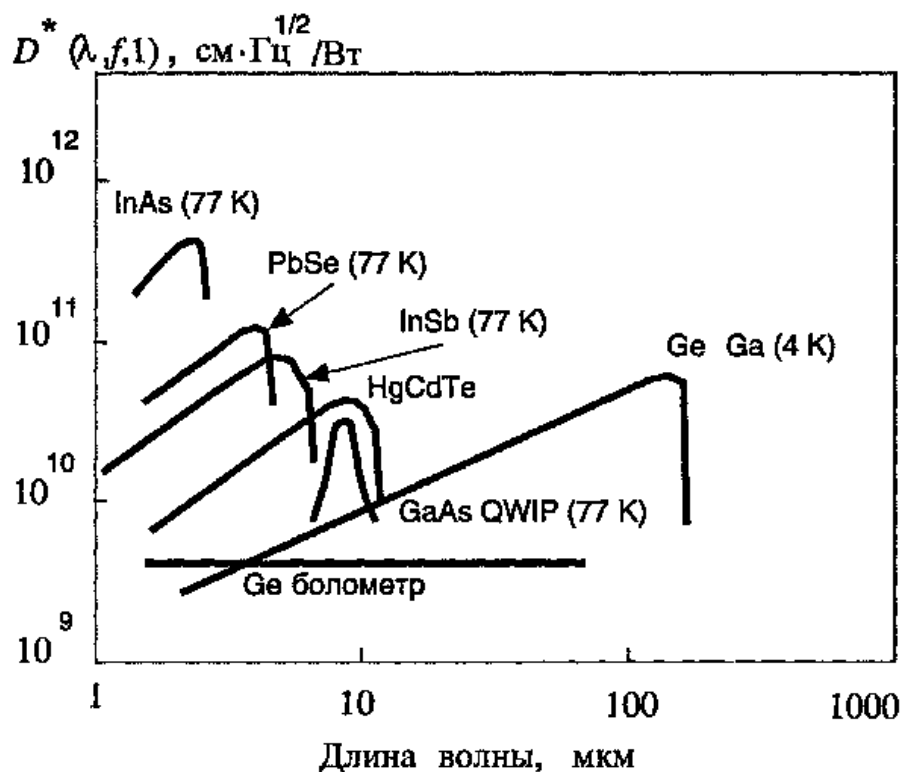


Рис. 7.6. Спектральная зависимость D^* для распространенных детекторов оптического излучения

бска В качестве материалов для металлических термоэлементов используют сурьмяно-висмутовые сплавы, серебро, железо, теллур, константан, хромель и различные сплавы этих веществ В полупроводниковых термоэлементах применяют сурьму, кремний, теллур, селен

Тепловые детекторы имеют плоский характер спектрального хода *обнаружительной способности* D^* (см определение D^* в п 7.5.6), т.е. они являются неселективными и не требуют охлаждения, но сама величина D^* при этом значительно хуже, чем у фотонных приемников (рис 7.6)

7.5.2. Фотоэмиссионные детекторы. В этих устройствах поток электронов, создающий электрический ток в первичной цепи, образуется за счет *внешнего фотоэффекта*, который имеет место на фотокатоде, подверженном воздействию оптического излучения Максимальная длина волны регистрируемого излучения определяется работой выхода электрона из фотокатода, в частности, для кислородно-серебряно-цезиевого фотокатода она со-

ставляет 1,3 мкм К фотоэмиссионным фотоприемникам относят вакуумные и газонаполненные фотозлемнты (ФЭ) и фотоэлектронные умножители (ФЭУ). В ФЭУ электроны ускоряются в электрическом поле и умножаются за счет вторичной эмиссии на динодах Коэффициент умножения в десятиступенчатой системе может составлять от 10^5 до 10^7 Типичная постоянная времени составляет около 10 нс Фотоумножители обычно используют для регистрации слабых световых потоков в микроваттном диапазоне мощностей, поскольку большие мощности регистрируемого излучения могут повредить последние диноды

В тепловизионных системах фотоэмиссионные приемники не используются

7.5.3. Фотонные детекторы. Фотонные детекторы реализуют явление *внутреннего фотоэффекта*, при котором носители заряда не покидают материал детектора, а переходят в зону проводимости либо с примесного уровня, либо из валентной зоны Спектральный ход детектирующей способности распространенных фотонных детекторов показан на рис 7.6.

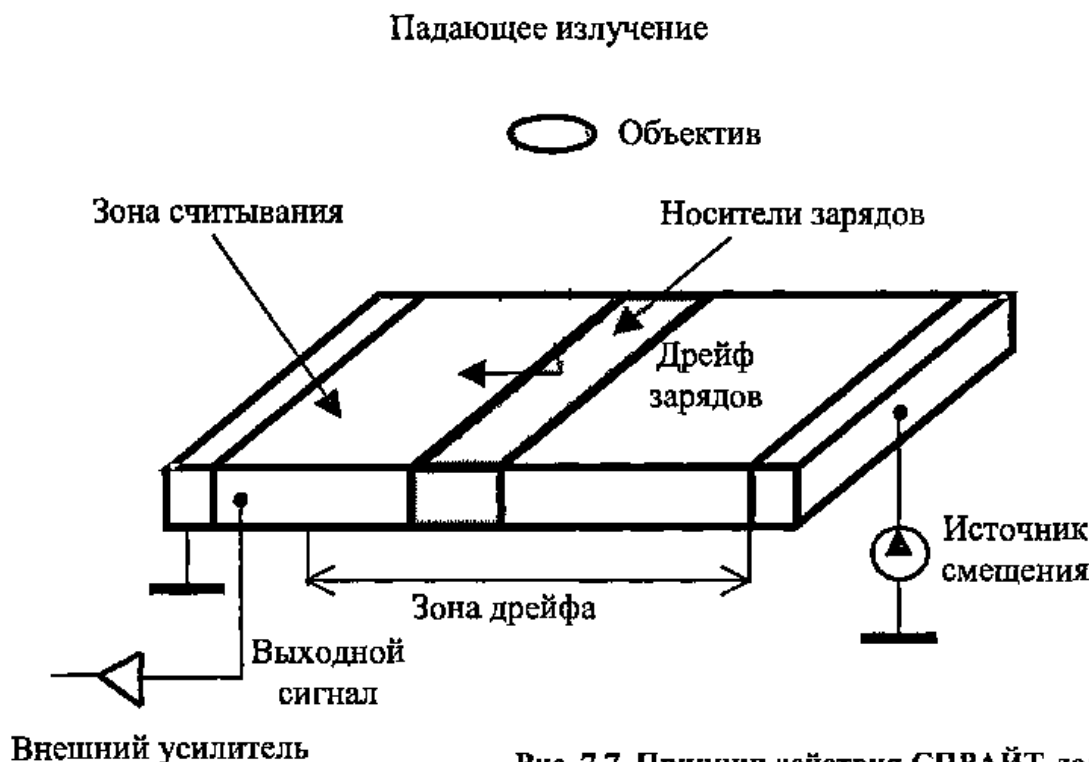


Рис. 7.7. Принцип действия СПРАЙТ-детектора

Сульфид свинца PbS был первым практическим детектором, разработанным в Германии перед второй мировой войной. В 50-е г. появление новых фотопроводящих материалов, таких как селенид свинца $PbSe$, теллурид свинца $PbTe$ и антимонид индия $InSb$, позволило освоить спектральный диапазон ИК-излучения до 3–5 мкм. Использование примесных уровней меди, цинка и золота в германии расширило диапазон до 30 мкм.

В конце 50-х годов в Великобритании разработан приемник на тройном соединении $HgCdTe$, который наряду с приемниками из антимонида индия, длительное время оставался одним из распространенных в силу стабильности свойств и возможности варьировать основные параметры. В начале 1960-х годов появилась технология *фотолитографии*, которая позволила создавать матричные детекторы, первоначально на основе PbS , $PbSe$ и $InSb$. К 1970-м г. большинство линейных матричных детекторов военного применения были изготовлены из $HgCdTe$.

Первые линейные мозаики, включавшие до 200 чувствительных площадок, имели физические выводы от каждой

площадки. По мере улучшения параметров детекторов, появились приборы, выполненные по так называемой СПРАЙТ (SPRITE—Signal Processing In The Element) технологии, которая была предложена И. Бейкером с соавторами [95].

Охлаждаемые до криогенных температур СПРАЙТ-приемники остаются одними из применяемых детекторов ИК-излучения (рис. 7.7). Их изготавливают в виде полоски из материала $HgCdTe$, которую размещают на сапфировой подложке. Сущность технологии состоит в том, что полоска выгнута в направлении сканирования и на нее подано электрическое смещение таким образом, что скорость дрейфа носителей заряда совпадает со скоростью сканирования. По мере того как точка изображения движется вдоль полоски детектора, индуцируемые ею заряды движутся синхронно, накапливаясь к концу полоски.

Таким образом, основным преимуществом СПРАЙТ-детектора является интегрирование сигнала в фокальной плоскости самим детектором, что снижает шумы. При последовательном считывании сигнала скорости сканирования СПРАЙТ и

одиноким приемником совпадают. Однако, если множество СПРАЙТ-детекторов собраны параллельным образом, скорость сканирования может быть уменьшена за счет одновременного интегрирования.

Длинноволновые фотонные приемники оптического излучения, как правило, требуют охлаждения до криогенных температур для того, чтобы снизить истощение энергетических уровней за счет теплового возбуждения атомов примесей и подавить излучение чувствительной площадки самой на себя. Поэтому первые фотонные приемники устанавливали внутри сосуда Дьюара, заполняемого жидким азотом с температурой 77 К. В зависимости от размеров и конструкции дьюаров, жидкий азот требовалось доливать каждые 2–8 часов (были предложены также схемы непрерывной подпитки хладагентом). С целью избежать проблем, связанных с жидким азотом, были разработаны микрохолодильники на основе эффекта Джоуля–Томсона (микрохолодильник Стирлинга), в которых использовалась замкнутая циркуляция жидкого гелия. Такие холодильники применяла известная в 1980–90-х годах американская фирма Inframetrics (в настоящее время фирма FLIR Systems). Наиболее практичными являются термоэлектрические холодильники, однако достигаемая с их помощью степень охлаждения ограничена температурами выше 190 К.

Постоянная времени фотонных приемников оптического излучения находится в пределах от 10^{-11} с для сверхбыстрых кремниевых детекторов до нескольких миллисекунд для приемников на основе PbS.

7.5.4. Фотоприемники на основе квантовых ловушек [96]. В последней декаде прошлого века стали коммерчески доступными приемники ИК-излучения, использующие принцип так называемых *квантовых ловушек*, или *ям* (quantum well). В англоязычной литературе такие приемники получили аббревиатуру QWIP

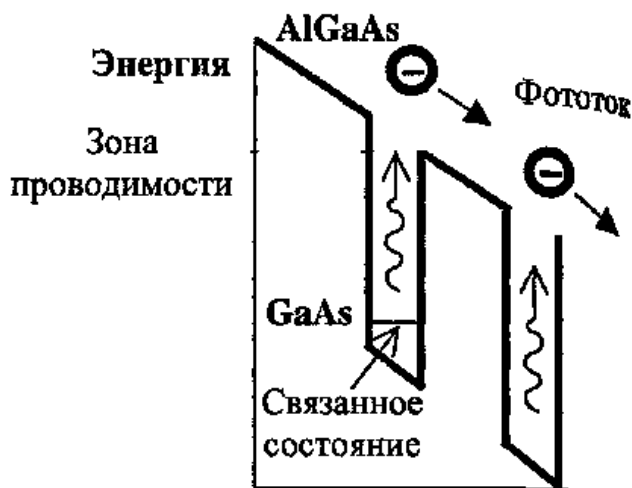


Рис. 7.8. Диаграмма работы "квип-детектора" (QWIP) GaAs–AlGaAs во внешнем электрическом поле: (поглощение ИК-фотонов переводит электроны из основного состояния в зону проводимости)

(Quantum Well Infrared Photodetectors). В "квип-детекторах" использован эффект фотовозбуждения электронов (дырок) между основным и первым возбужденным состоянием в зоне проводимости (валентной зоне) квантовой ямы (рис. 7.8). Структура квантовой ловушки такова, что фотовозбужденные носители заряда могут "выбираться" из нее и создавать электрический ток. Например, в одном из первых коммерческих матричных квип-детекторов была использована ловушка из GaAs высотой 45Å и барьер из AlGaAs высотой 500Å (см. рис. 7.8). Основные состояния электронов в квантовой ловушке создавались примесным кремнием (Si). Квип-детекторы, использующие GaAs, позволяют регистрировать ИК-излучение с длиной волны более 6 мкм .

В тепловизорах высокого уровня становятся все более популярными матричные КВИП фотоприемники (см. п. 7.5.5).

7.5.5. Матричные фотоприемники. Матричные фотоприемники (FPA), устанавливаемые в фокальной плоскости объектива, состоят из множества чувствительных элементов, расположенных по рядам и столбцам прямоугольной матрицы. Чувствительные элементы не заполняют всю площадь матрицы, поэтому од-

ним из важных параметров таких детекторов является коэффициент заполнения (fill factor). Чем выше коэффициент заполнения, тем качественнее изображение, особенно при мониторинге температур, близких к температуре окружающей среды, а также при анализе слабых температурных градиентов. В лучших матрицах коэффициент заполнения может достигать 90 %.

Различают две технологии изготовления матричных фотоприемников *монокристаллическую* (monolithic) и *гибридную* (hybrid). Монокристаллические матрицы дешевле и проще в изготовлении, поскольку в них чувствительные площадки и зоны передачи электрического сигнала расположены в подложке из одного материала, однако их коэффициент заполнения не превышает 55 %. В монокристаллических матрицах труднее реализовать современные алгоритмы встроенной обработки сигнала, например переменное время интегрирования. В гибридных матрицах зона чувствительных площадок и зона считывания сигналов расположены в двух слоях, разделенных индиевыми контактами, через которые происходит мультиплексирование сигналов каждой площадки. Такие фотоприемники обладают максимальным коэффициентом заполнения и обеспечивают наиболее высокое качество изображения с температурным разрешением до $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мультиплексор является устройством, которое организует и форматирует электрические сигналы, генерируемые отдельными чувствительными площадками, а также передает эти сигналы на специальный процессор. С точки зрения связи с процессором существует два типа устройств: приборы с зарядовой связью — ПЗС (charge-coupled-device — CCD) и приборы на комплементарных металл-оксидных полупроводниках — КМОП (complementary metal-oxide semiconductors — CMOS). В ПЗС детекторах сигнал каждой чувствительной площадки создается электронами, которые последовательно собираются в детекторе вплоть до последней колонки, где суммарный сигнал считыва-

ется. При этом возможна как потеря части сигнала (charge-coupled transfer loss phenomenon), так и размытие изображения за счет перетока избыточных электронов с одной площадки на другую при визировании объектов с чересчур высокой температурой (blooming). Охлаждаемые ПЗС детекторы являются более энергоемкими, чем МОП-детекторы. Они широко применяются в показывающих тепловизорах, где вышеуказанные недостатки не являются решающими. В измерительных тепловизорах требуются специальные меры учета потери сигнала и размытия изображения. КМОП-детекторы требуют эффективного охлаждения (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$), которое достигается использованием миниатюрных компрессоров Стирлинга, но обеспечивают наилучшие измерительные возможности тепловизоров.

Поскольку фотонные ИК-детекторы являются счетчиками фотонов, важной характеристикой приемников, в том числе матричных, является их *квантовый выход*, или *квантовая эффективность* (quantum efficiency), которая характеризует способность фотоприемника собирать кванты электромагнитного излучения и преобразовывать их в электрический сигнал. Интересно отметить, что квантовая эффективность одного из наиболее распространенных материалов фотонных матриц — силицида платины PtSi составляет менее 1 %. В целом, детекторы с высокой квантовой эффективностью обеспечивают лучшее температурное разрешение и более высокое качество изображения.

Еще одной характеристикой матричных фотоприемников является *время интегрирования* сигнала (integration time). Во многих случаях оно составляет 16 мс, что соответствует одному полному кадру. Матрицы с переменным временем интегрирования позволяют собирать ИК-фотоны в течение более коротких времен, что обеспечивает регистрацию температур до $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловизоры без переменного времени интегрирования требуют введения спектральных фильтров для регистра-

ции температур в широком интервале температур от -20 до $+2000$ °С

Оптика FPA-тепловизоров имеет свою специфику. Наиболее совершенной являются объективы (remaging optics), создающие две фокальные точки, в одной из которых располагают матрицу, а во второй размещают диафрагму поля зрения, которая предотвращает засветку от мощных посторонних излучателей (off-axis stray radiation). Обычные объективы (non-remaging optics) создают только одну фокальную точку и используются главным образом в показывающих тепловизорах, где засветка не искажает измерительные способности устройства.

Одной из неприятных особенностей матричных фотоприемников является *неравномерная чувствительность* от одной площадки к другой. Коррекцию (non-uniformity correction) осуществляют различными способами: 1) считывая температуру крышки, размещаемой на объектив (простейший способ), 2) периодически размещая в оптическом пути внутри камеры объект с равномерной известной температурой, которая служит для корректировки сигналов в отдельных пикселях, 3) осуществляя непрерывную коррекцию с помощью встроенного микропроцессора (наиболее метрологичный способ).

Другой проблемой тепловизоров, трудно решаемой для FPA-детекторов, является необходимость *компенсировать* изменения температуры окружающей среды. Чаще всего это осуществляют путем размещения нескольких датчиков температуры в критических точках оптической головки тепловизоров.

Неохлаждаемые микроболометрические матрицы. Технология изготовления болометрических FPA матриц, предложенная относительно недавно, получила быстрое признание, поскольку такие матрицы не требуют охлаждения и способны работать при температуре окружающей среды, позволяя создавать весьма практичные тепловизоры. Основные недостатки микроболометрических матриц более

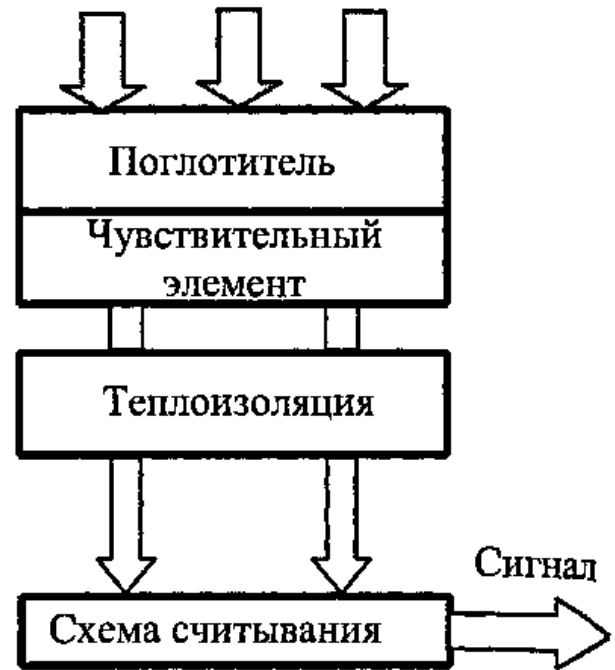


Рис. 7.9. Структура болометрической матрицы

низкая по сравнению с фотонными матрицами чувствительность и метрологическая стабильность.

Схема неохлаждаемой болометрической матрицы изображена на рис. 7.9. Каждый чувствительный элемент может реализовать принцип резистивного, пироэлектрического или ферроэлектрического детектора. В резистивных элементах поглощенное ИК-излучение изменяет их электрическое сопротивление, что регистрируется электронной схемой считывания сигнала. В пироэлектрических элементах, при температурах ниже точки Кюри, изменение их температуры приводит к модуляции поверхностного электрического заряда, т.е. к появлению электрического тока.

Пироэлектрический эффект может быть усилен наложением электрического поля, что приводит к ферроэлектрическим феноменам. В современных матрицах имеется поглощающий излучение слой, выполненный в виде четвертьволновой оптической полости толщиной около 1 мкм. Отдельные чувствительные площадки теплоизолированы друг от друга с целью обеспечить максимальное про-

пространственное и температурное разрешение

Как и в фотонных матрицах, используют два типа архитектуры элементов гибридную и монолитную

В гибридных матрицах детектор и устройство считывания сигнала, выполненное на основе кремниевой структуры, изготовлены отдельно друг от друга и затем собраны вместе

В монолитных матрицах детектор размещают над схемой считывания непосредственно в процессе изготовления, что обеспечивает лучшие детектирующие параметры

Типичная коммерческая болометрическая матрица состоит из 320×240 элементов и обеспечивает температурное разрешение на уровне 100 мК (в лабораторных системах достигнуто разрешение около 10 мК)

Фотонные матрицы. Наиболее распространенные типы фотонных матриц выполнены на основе барьера Шоттки (Schottky barrier), суперрешетках (superlattice), собственной проводимости (intrinsic) и Z-планарной (Z-plane) технологии

Матрицы на основе барьера Шоттки. Данный тип детектора был предложен Ф. Шепардом и А. Янгом в 1973 г [97]

В настоящее время многими компаниями разработаны матрицы размером до 512×512 , большей частью использующие силицид галлия $PtSi$. Данный материал работает в диапазоне 3–5 мкм, весьма стабилен во времени и устойчив к повышенным температурам. Несмотря на низкую квантовую эффективность (~1%), $PtSi$ фотоприемники обеспечивают температурное разрешение до 0,05 °С. Силицид галлия $GaSi$ позволяет расширить спектральный диапазон до 8–16 мкм

Матрицы на суперрешетках. В этих фотоприемниках, к которым также относят КВИП (QWIP) детекторы, перемежающиеся слои различных полупроводников различной толщины позволяют из-

менять область спектральной чувствительности

Наиболее перспективная технология использует материал $GaAs-GaAlAs$, созданный в 1987. Длинноволновая граница суперрешеток может изменяться от 6 до 11 мкм при обнаружительной способности в диапазоне от 10^{10} до 10^{11} см²/В1 (уровень охлаждения от 50 до 70 К). Обладая квантовой эффективностью от 5 до 10% на длине волны 9,5 мкм, эти фотоприемники обеспечивают весьма высокое температурное разрешение (до 0,01 °С)

По совокупности параметров матричные КВИП-детекторы большого формата позволили создать высокочувствительные тепловизоры, работающие в длинноволновом диапазоне

Матрицы на полупроводниках с собственной проводимостью. В этих матрицах используют обычные фотопроводящие и фотоэлектрические (фотовольтаические) детекторы. Как и в случае суперрешеток, наиболее перспективна гибридная технология, которая предусматривает внедрение (приклеивание) чувствительного элемента на кремниевую подложку чипа считывания электрического сигнала

Распространены матрицы из $HgCdTe$ (размером до 256×256) и $InSb$ (размером до 640×512). Квантовая эффективность приемников из $InSb$ достигает 80–90%, однако она не всегда реализуется вследствие переполнения квантовых ловушек электронами

Другой проблемой этих приемников оказалась их относительно невысокая стабильность во времени и при циклах охлаждения

Z-планарные матрицы. Данная технология была предложена с целью дополнить функцию обнаружения электромагнитного излучения рядом функций предварительной обработки сигнала. Кремниевые чипы размещают на гонкой керамической плате (толщиной 100 мкм), на боковой поверхности которой устанавливает

ИК-детектор Такие платы собирают вместе, формируя матрицу В Z-планарных детекторах можно осуществлять свертку сигнала, дифференцирование и встроенное аналого-цифровое преобразование

Современные матричные фотоприемники характеризуются следующими параметрами

- HgCdTe до 480×640 (размер пикселя от 20 мкм до 1 мм), рабочая (operating) температура $T_{op} = 80$ К,

- PtSi до 1024×1024 , $T_{op} = 80$ К,

- InSb до 640×480 , $T_{op} = 80$ К

Коммерческие матричные квиц-фотоприемники формата 320×256 и 640×486 работают при температуре 70 К и обеспечивают температурное разрешение около 30 мК в диапазоне длин волн 8–12 мкм

Описание и внешний вид некоторых коммерческих матричных фотоприемников показан на рис. 7.10 (См цветную вкладку)

7.5.6. Параметры ИК-приемников.

Детекторы ИК-излучения являются сложными оптико-электронными устройствами, которые характеризуются большим числом параметров, из которых основными являются

- удельная обнаружительная (детектирующая) способность (detectivity) D^* , см $\text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$,

- область спектральной чувствительности, мкм,

- интегральная, или вольтовая, чувствительность, определяющая амплитуду электрического сигнала на выходе фотоприемника, В/Вт,

- площадь чувствительного элемента A_d , см²,

- инерционность, или постоянная времени, с

Удельная обнаружительная способность. Удельная обнаружительная способность является спектральной функ-

цией и служит важнейшим критерием качества фотоприемников Ее определяют следующим образом

$$D^* = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{NEP}, \quad (7.3)$$

где NEP – мощность (поток), эквивалентная шуму (Noise Equivalent Power-NEP); Δf – полоса частот, Гц

Согласно ГОСТ 21934–83 величину NEP называют *порогом чувствительности* приемника излучения, выражают в Вт, в англоязычной литературе эту величину часто выражают в $\text{Вт}/\text{Гц}^{1/2}$ При правильной записи D^* следует указывать значение длины волны, частоту модуляции и полосы частот (единичной)

$$D^*(\lambda, f_m, 1) = D_\lambda^*(f_m, 1)$$

Коэффициент использования ПИ по конкретному излучателю определяется выражением

$$k(T) = \frac{\int_0^\infty s(\lambda) R_\lambda(T) d\lambda}{\int_0^\infty R_\lambda(T) d\lambda}, \quad (7.4)$$

где $s(\lambda) = D_\lambda^* / D_m^*$ – относительная спектральная чувствительность ПИ,

D_m^* – максимальное по спектру значение обнаружительной способности

При проектировании тепловизоров предложен аналог коэффициента использования – коэффициент сравнения ПИ

$$g^{-1} = \int_0^\infty \frac{\partial R_\lambda(T)}{\partial T} D_\lambda^* d\lambda, \quad (7.5)$$

который позволяет сравнивать эффективность ПИ при регистрации малых температурных перепадов

В СССР выпускалась весьма широкая номенклатура приемников излучения, на-

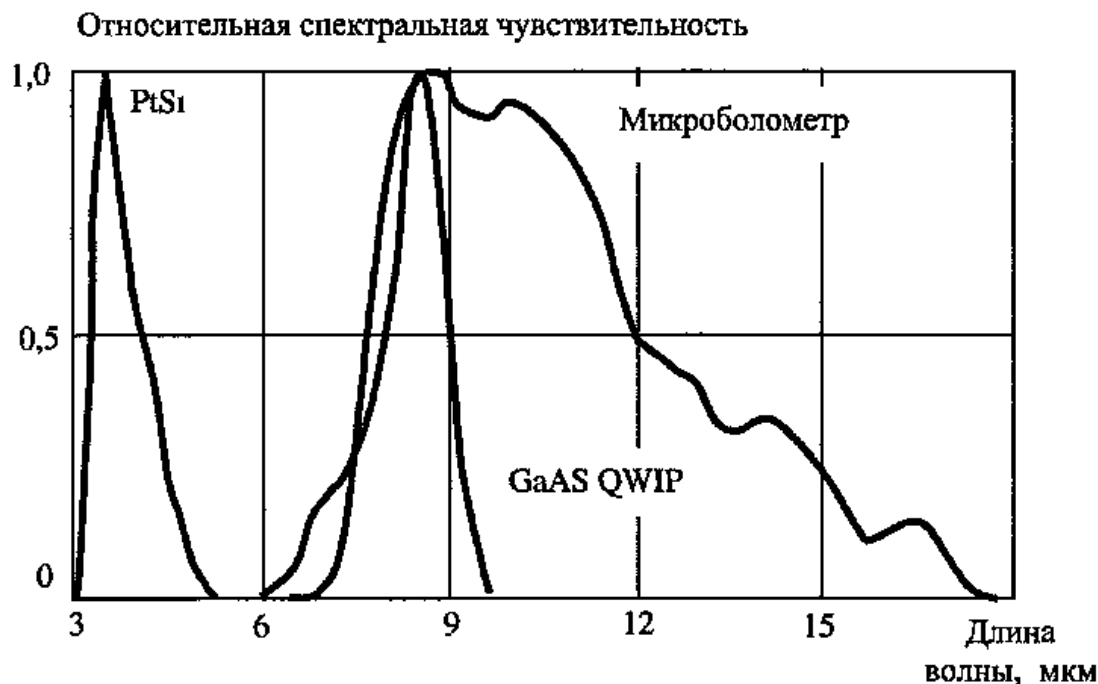


Рис. 7.11. Спектральная чувствительность тепловизоров с тремя различными приемниками излучения

раметры которых можно найти в соответствующей литературе [10, 98, 99]

Спектральная чувствительность. Область спектральной чувствительности тепловизоров определяется используемым приемником ИК-излучения (см рис 7 б)

Приборы, работающие в коротковолновом диапазоне, например передающие телевизионные трубки и ЭОПы, могут рассматриваться в качестве тепловизоров, измеряющих относительно высокие температуры. Тем не менее, термин "тепловизор" обычно применяют к системам со спектральной чувствительностью от 3 до 14 мкм

Исторически коротковолновыми тепловизорами (short wave-SW) называли такие, которые использовали приемники на антимониде индия (3 — 5 мкм), тогда как длинноволновые (long wave-LW) системы в течение многих лет использовали приемники на тройных соединениях HgCdTe (7 — 14 мкм)

На рис 7.11 изображена относительная спектральная чувствительность трех типов современных тепловизоров, рабо-

тающих в различных спектральных диапазонах

Устройства охлаждения приемника излучения. Для того, чтобы ИК-приемник не регистрировал преимущественно свое собственное излучение, а также для снижения собственных шумов, чувствительный элемент приемника должен быть охлажден. Длительное время в качестве хладагента применяли жидкий азот, снижающий температуру до -200°C . В зависимости от объема сосуда Дьюара одной заливки хватало на 2 — 8 ч, поэтому проведение ИК-съемки в течение рабочего дня требовало от оператора носить с собой сосуд Дьюара или, в лучшем случае, бытовой термос

С переходом на термоэлектрические холодильники нужда в жидком азоте отпала

Поскольку термоэлектрические холодильники обеспечивают понижение температуры только до -70 — -90°C , в ряде моделей тепловизоров применен миниатюрный компрессор (известный также под названием "холодильник Стирлинга"),

который охлаждает ИК-приемник до температуры жидкого азота

Первый коммерческий тепловизор серии Thermovision 500, в котором приемник излучения работал при комнатной температуре, был выпущен фирмой AGEMA Infrared Systems (ныне FLIR Systems) В данном приборе был использован FPA-детектор болометрического типа. Необходимость учитывать влияние изменяющейся температуры окружающей среды потребовало специальных технических решений, являющихся ноу-хау (know how) фирм-производителей. Использование фотонных FPA-детекторов излучения по-прежнему требует их охлаждения (при этом достигают наилучшего температурного разрешения)

7.6. ОПТИКА ТЕПЛОВИЗОРОВ

Во всех высококачественных тепловизорах ИК-объектив является сложным дорогостоящим узлом, включающим набор линз и зеркал, которые выполнены из хрупких, дорогостоящих и требующих прецизионной обработки материалов типа кремния, германия и специальных ИК-стекло

7.6.1. Фокусное расстояние и коэффициент увеличения оптической системы. Сложная оптическая система может быть сведена к одиночной линзе, которая характеризуется фокусным расстоянием $F = F'$. Такая линза создает изображение Y' объекта Y (см рис 7.12). Смещения Y и Y' от фокусных точек F и F' равны соответственно X и X' . Базовое уравнение тонкой линзы имеет вид

$$XX' = F^2 \quad (7.6)$$

Коэффициент усиления равен

$$Y/Y' = S/S', \quad (7.7)$$

где S – расстояние между объектом и линзой, S' – расстояние между изображением объекта и линзой

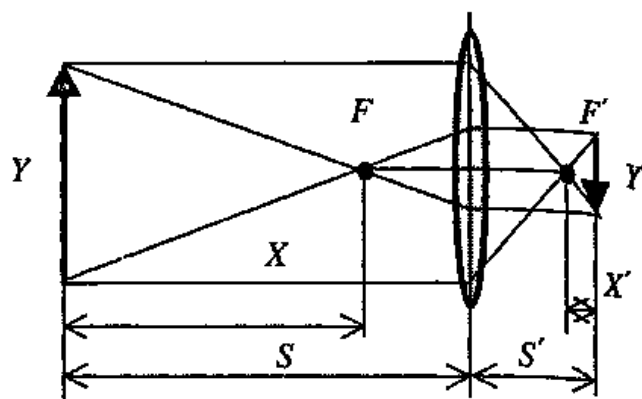


Рис. 7.12. Построение изображения в одиночной линзе

7.6.2. Мгновенный угол зрения и поле зрения. Если Y' – размер чувствительной площадки фотоприсемника, то величину $Y'/S' = Y/S$ называют *мгновенным углом зрения* (instantaneous field of view – IFOV), который определяет пространственное разрешение системы (рис 7.13). Сканирующие тепловизоры, использующие одиночный приемник, в любой момент времени собирают излучение в пределах мгновенного угла зрения, который непрерывно изменяет свое положение в пространстве в ходе сканирования, формируя таким образом *поле зрения*. В матричных тепловизорах поле зрения определяется размером матрицы, а мгновенный угол зрения связан с отдельными приемными площадками

Угол (поле) зрения (field of view – FOV) оптической системы схематично изображен на рис 7.13. Для наблюдения удаленных предметов необходим длиннофокусный узкоугольный объектив (ИК-съемка с борта вертолета, анализ элементов линий электропередач и т.п.), тогда как широкоугольная оптика удобна, если

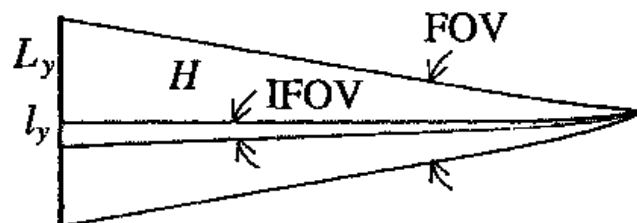


Рис. 7.13. Угол зрения и мгновенный угол зрения

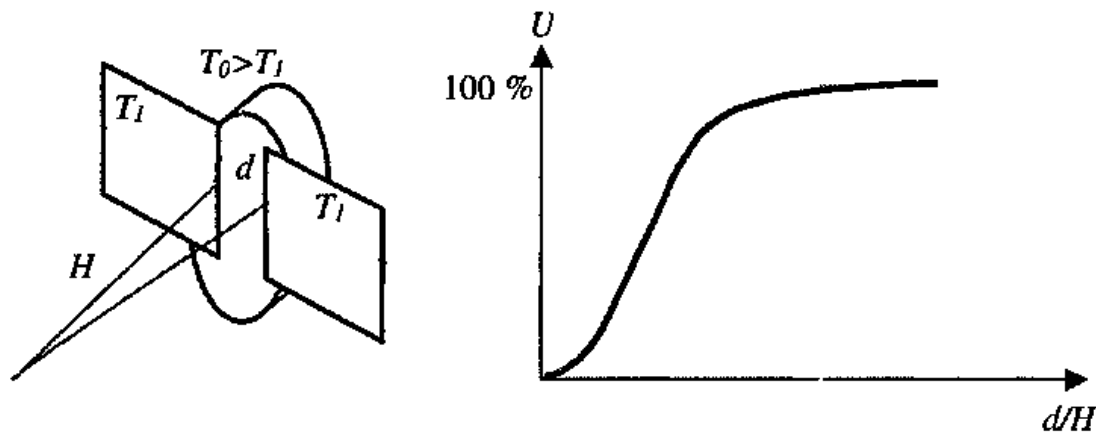


Рис. 7.14. Щелевая функция чувствительности

объект находится вплотную к оператору и следует просматривать как можно большую площадь (научные исследования, строительство и энергетика) Фирмы-производители поставляют тепловизоры со сменной оптикой, которую заказывают в зависимости от предполагаемой области применения В качестве компромиссного варианта часто принимают 12-ти градусный объектив, который обеспечивает приемлемое геометрическое разрешение в большинстве практических задач Например, в тепловизорах фирмы FLIR Systems часто используют пять объективов 2,5, 7, 12, 20 и 40°

В табл 7 4 приведены размеры зоны контроля на расстоянии 10 м для различных полей зрения Для расстояний иных, нежели приведенных в табл 7 4, производят простой пропорциональный пересчет размеров зоны контроля например, поле зрения 20° на расстоянии 100 м будет эквивалентно зоне размером $3,5(100/10) = 35$ м

7.4. Размер зоны контроля для объективов с различным углом зрения

Объектив	Размер поля зрения на расстоянии 10 м, м
7°	1,2
12°	2,1
20°	3,5
40°	8,2

Геометрически, оба параметра могут быть определены по обеим координатам сканирования

$$GOV = 2 \arctg \frac{L_y}{2H},$$

$$IFOV = 2 \arctg \frac{l_y}{2H} \approx \frac{l_y}{H}, \tag{7 8}$$

где L_y – размер контролируемой зоны по координате Y, определяемый полем зрения тепловизора, l_y – размер зоны, визируемой в пределах мгновенного угла зрения (по координате Y), как правило, $L_x \neq L_y$ и $l_x = l_y$

7.6.3. Щелевая функция чувствительности и модуляционная передаточная функция. Пусть на расстоянии H от детектора находится щель переменной ширины d (рис 7 14) За щелью размещен фоновый объект с температурой выше температуры окружающей среды Очевидно, что выходной сигнал ИК-детектора (тепловизора) U зависит от ширины щели d Функция $U(d/H)$ называется *щелевой функцией чувствительности* (slit response function – SRF) Угловой размер щели при 50 %-м спаде сигнала, будет соответствовать пространственному разрешению при 50 %-и модуляции При сравнении различных оптических систем важен не столько выбор уровня модуляции, сколько обеспечение одинаковых условий сравнения различных тепловизоров При ширине

щели меньше мгновенного угла зрения профиль сигнала соответствует импульсной реакции системы на линию, эта функция называется *функцией рассеяния линии* (ФРЛ) Модуль преобразования Фурье от ФРЛ представляет собой *модуляционную передаточную функцию* МПФ (modulation transfer function – MTF), которая дает контраст изображения в функции пространственной частоты при исходном (на нулевой частоте) контрасте, равном единице МПФ также получают, измеряя контраст мир, уменьшающийся с ростом пространственной частоты Недостатком МПФ как критерия качества тепловизора является то, что эта функция определяет ослабление глубины модуляции безотносительно к уровню шумов (см п 77)

7.7. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВИЗОРОВ

7.7.1. Формат и частота смены изображений. Формат изображения в матричных тепловизорах при правильно подобранной оптике соответствует числу отдельных элементов в матрице Например, если распространенный формат микроболометрических матриц 320×240 соответствует полю зрения $24 \times 18^\circ$, то мгновенный угол зрения будет одним и тем же по обеим координатам $IFOV = \frac{24^\circ}{320} = \frac{18^\circ}{240} = 4,5' = 1,3 \text{ мрад}$ Пространственное разрешение в горизонтальном направлении составит 320 элементов на каждую из 240 строк

В цифровом анализе изображений вводят число пикселей, которое в общем случае может быть больше, равно или меньше соответствующего числа сканируемых мгновенных углов зрения Например, строчный сигнал, определяемый 320-ю мгновенными углами зрения, может быть оцифрован на 640 компьютерных пикселей Однако такая операция будет искусственной, и реальное пространственное разрешение будет по-прежнему равно 320-ти различаемым элементам изображения

Частота смены изображений f_{fr} (frame rate) определяется полным временем τ_{sc} , в течение которого анализируют поле зрения Например, если выходной сигнал каждого матричного элемента сканируют электронным образом в течение $1/30$ с, соответствующая частота смены изображений будет $f_{fr} = 1/\tau_{sc} = 30 \text{ Гц}$ В оптико-механических тепловизорах параметр f_{fr} определяют аналогичным образом В ранних моделях тепловизоров сканировали два поля зрения (чересстрочная развертка – interlacing fields), которые накладывали друг на друга, формируя полный кадр Например, если поле зрения, состоящее из 70 линий, сканируется за $1/50$ с, то полный кадр будет состоять из 140 линий, сканируемых за $1/25$ с, т е $f_{fr} = 25 \text{ Гц}$

Последовательности ИК-изображений (термограмм) накапливают в аналоговой или цифровой форме Аналоговую запись чаще всего выполняют в видео (телевизионном) формате, с использованием стандартных видеоманитонов, к которым непосредственно подключают тепловизоры, имеющие PAL, NTSC или SECAM выход Согласование двух форматов (телевизионного и телевизионного) производят с помощью встроенных буферных процессоров

Цифровую запись можно производить с любой скоростью, определяемой типом тепловизора и скоростью аналого-цифрового преобразования (АЦП) Запись в реальном времени возможна, если АЦП осуществляют за время, меньшее времени анализа одного мгновенного угла зрения

Современные компьютерные термографические системы позволяют записывать весьма длинные последовательности термограмм, число которых может превышать несколько тысяч Запись осуществляют либо с максимальной скоростью, то есть накапливая все термограммы, или с фиксированным (регулируемым) интервалом, разделяющим две последовательные

термограммы Например, последовательность из 300 изображений, записанная с частотой 30 Гц, соответствует полному времени наблюдения $300/30=10$ с, причем интервал времени между соседними термограммами равен $1/30$ с Увеличение интервала записи до 1 с приведет к удлинению времени наблюдения до 300 с

7.7.2. Температурное разрешение. Эквивалентная шуму разность температур Эквивалентная шуму разность температур (Noise Equivalent Temperature Difference – NETD) является важной энергетической характеристикой тепловизоров, которую определяют как температурный сигнал ΔT_{NETD} , эквивалентный уровню собственного шума фотоприемника Пусть температуру поверхности некоторой мишени T_{ref} , рассматриваемой в качестве эталонного излучателя, поддерживают на постоянном уровне Тепловизор является электронным прибором, выходной сигнал которого можно характеризовать как электрическими, так и температурными единицами измерения Обычно шум выражают в терминах стандартного отклонения температуры $\sqrt{\Delta T^2}$ Величину NETD определяют как изменение температуры ΔT_{NETD} , которому соответствует отношение сигнал/шум S , равное единице: $S = \Delta T_{NETD} / \sqrt{\Delta T^2} = 1$ (иногда ΔT_{NETD} принимают равным двум или трем стандартным отклонениям)

Величина NETD является типичной паспортной характеристикой тепловизоров, приводимая в следующем виде $\Delta T_{NETD} = 0,07$ °С при температуре эталонного излучателя $T_{ref} = 30$ °С Этот же параметр часто называют температурным разрешением (resolution) тепловизора ΔT_{res} .

Для оценки конкретных тепловизоров рекомендована следующая формула определения ΔT_{NETD} [91]

$$\Delta T_{NETD} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{FN^2 \sqrt{\Delta f}}{D^* \sqrt{A_d} \frac{\partial R}{\partial T}} \right] = \frac{4}{\pi} \frac{F^2 \sqrt{\Delta f}}{D^* D^2 \sqrt{A_d} \frac{\partial R}{\partial T}}, \quad (7.9)$$

где $FN = F/D$ – показатель оптической системы, F – фокусное расстояние системы, D – эффективный диаметр оптической системы, Δf – полоса частот измерительного тракта, D^* – обнаружительная способность фотоприемника, A_d – эффективная площадь чувствительного элемента, $\frac{\partial R}{\partial T} = \frac{1}{\pi} \frac{\partial R}{\partial T}$, Вт/(м² К ср) – производная от функции Планка по температуре ($\partial R/\partial T$), отнесенная к единичному телесному углу

Недостатком параметра ΔT_{NETD} в качестве критерия сравнения тепловизоров является то, что улучшение температурного разрешения за счет увеличения площади чувствительного элемента A_d сопровождается ухудшением пространственного разрешения $IFOV = S'/Y' = \sqrt{A_d}/Y'$

Формула (7.9) справедлива для случая так называемого реального фотоприемника, не ограниченного шумами фона Шумы идеального приемника ограничены только флуктуациями потока регистрируемых фотонов В этом случае формулу для предельной величины ΔT_{NETD} можно найти в [1]

Минимальная разрешаемая разность температур. Минимальную разрешаемую разность температур ΔT_{MRTD} (minimum resolvable temperature difference – MRTD) определяют по эталонному излучателю (мире), образованному набором полос определенных толщины и температуры и рассматриваемому оператором в течение неопределенного времени Таким образом, этот параметр отражает как

пространственное, так и температурное разрешение тепловизора, но зависит от способностей оператора, его мотивации, влияния окружающей среды и т.п. Величину ΔT_{MRTD} обычно усредняют по нескольким операторам.

Величина ΔT_{MRTD} прямо пропорциональна ΔT_{NETD} и обратно пропорциональна модуляционной передаточной функции, определяя способность тепловизора различать детали теплового изображения. Параметр ΔT_{MRTD} более субъективен по сравнению с параметром ΔT_{NETD} .

Динамический диапазон сигнала. Динамический диапазон $ДД$ электронного устройства характеризует диапазон амплитуд сигналов между максимальным U_{max} и минимальным U_{min} значениями, которые передаются (анализируются) без искажений. Обычно $ДД$ выражают в децибелах

$$ДД = 10 \log \frac{U_{max}}{U_{min}} \quad (7.10)$$

Например, если фотоприемник регистрирует тепловой поток в интервале от 10^{-6} до 10^{-1} Вт, его $ДД = 10 \log \frac{10^{-1}}{10^{-6}} = 10 \cdot 5 = 50$ дБ, т.е. составляет 5 порядков.

В тепловизорах используют 8-, 12-, 14- или 16-битовое представление сигнала, что соответствует разбиению динамического диапазона на 2^8 , 2^{12} , 2^{14} , 2^{16} уровней и определяет минимальный различаемый температурный сигнал.

Пример. Пусть тепловизор измеряет температуру в диапазоне от -20 до $+1200$ °С. Для простоты можно принять, что анализируемый электрический сигнал пропорционален температуре, что, строго говоря, неверно вследствие нелинейности закона Планка. Полный анализируемый диапазон температур равен 1220 °С. В

случае 8-битного представления диапазон сигналов будет разбит на $2^8 = 256$ уровней, каждый из которых соответствует изменению температуры $1220/256 = 4,77$ °С. Такая глубина оцифровки недостаточна, если, например, детектор обеспечивает эквивалентную шуму разность температур $0,1$ °С. Поэтому 8-битовое представление сигнала не перекрывает указанного динамического диапазона, и в таком тепловизоре понадобится ручная перестройка диапазонов измеряемых температур. Современные тепловизоры используют 12- или 14-битную оцифровку сигнала, что позволяет анализировать большие динамические диапазоны сигналов без потери температурного разрешения и необходимости перестраивать установки тепловизора. Например, использование 14-битового формата ($2^{14} = 16\,384$) в вышеприведенном примере обеспечивает оцифровку всего диапазона с шагом $1220/16\,384 = 0,074$ °С.

7.8. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВИЗОРЫ

7.8.1. Сканер. Вплоть до 1995 г. большинство измерительных тепловизоров использовали одноэлементный приемник ИК-излучения, который посредством оптики в каждый данный момент времени был способен просматривать лишь часть сцены в весьма малом пространственном угле (мгновенном угле зрения). Для развертки сцены применяли оптико-механическое строчно-кадровое сканирование с помощью вращающихся зеркальных или прозрачных призм, которые в последнем случае выполняют из материалов, имеющих большой коэффициент преломления. Кажущаяся простота принципа сканирования, тем не менее, требовала прецизионного исполнения оптико-механических узлов.

Электронное сканирование в течение многих лет использовали в пироэлектрических тепловизорах, которые являлись не измерительными, а показывающими при-

борами. С развитием FPA технологии ведущие мировые фирмы перешли на выпуск приборов нового поколения, которые по сути дела являются ИК телевизионными камерами. Фактически, последним барьером, разделяющим "тепловизоры" и телевизионные установки является меньшее число элементов в измерительных тепловизорах (во многих измерительных тепловизорах использована FPA матрица, состоящая из 320×240 элементов, что эквивалентно принятому формату видеозаписи). Следует отметить, что проблема улучшения пространственного разрешения решается весьма быстро. В настоящее время уже имеются показывающие тепловизоры высокого разрешения (до 1024×1024 элементов в кадре), а измерительные тепловизоры начинают приближаться к данному пределу.

7.8.2. Электронный блок. Особенности обработки электрического сигнала на выходе ИК-приемника описаны в [1, 91, 98–101]. В электронном блоке тепловизоров осуществляют ряд преобразований сигнала в реальном времени, а также выводят его в форме, удобной для его визуализации, чаще всего в телевизионном стандарте NTSC, PAL или SECAM, а также в виде цифрового 8-ми, 12-ти или 16-ти битового сигнала. В последних моделях тепловизоров, наряду со стандартными "медленными" каналами обмена цифровой информации (RS 232), применяют "быстрые" цифровые каналы типа "горячей шины" IEEE-1394 (Fire Wire). При использовании нескольких тепловизоров в одной сети сбор информации осуществляют по протоколу R-45 Ethernet.

Микропроцессорная обработка в режиме on-line, как правило, предназначена для поддержания метрологических характеристик тепловизоров на требуемом уровне, реже – для выполнения каких-либо специфических процедур, из которых наиболее распространено усреднение по нескольким кадрам с целью снизить "белый" шум. Например, если в теплови-

зоре с паспортным разрешением $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ выбрать режим усреднения по 4-м кадрам, то частота кадров уменьшится в 4 раза (т.е. изображение быстро движущихся или быстроменяющихся объектов может быть смазано), однако температурное разрешение возрастет в $\sqrt{4} = 2$ раза (т.е. станет равным $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$). Более глубокую обработку тепловизионной информации, в особенности при использовании быстродействующих тепловизоров, обычно осуществляют не в реальном времени, а с помощью специальных компьютерных программ, работающих в режиме off-line.

Преобразование тепловизионного формата в телевизионный формат производят с целью облегчить стыковку тепловизора со стандартным телевизионным оборудованием. В большинстве современных тепловизоров имеется видеовыход, что позволяет записывать термоизображения с помощью видеомagneфона и показывать их на обычном телевизоре. Сами тепловизоры также снабжают черно-белыми или цветными мониторами. Имеются модели передающих тепловизионных модулей, которые могут быть подключены к стандартным цифровым видеокамерам, при этом на мониторе видеокамеры наблюдают либо видимое, либо ИК-изображение (модель тепловизора 2003 г. ThermoVision A20 фирмы FLIR Systems). В тепловизоре ThermoCam P60 той же фирмы использован отсоединяющийся цветной монитор, что позволяет производить осмотр объектов в труднодоступных местах.

7.8.3. Черно-белое и цветное представление термограмм. Цветное представление термограмм осуществляют путем псевдоцветового кодирования температуры, т.е. одной и той же температуре по желанию оператора могут соответствовать различные цвета. В тепловизорах используют различные цветовые палитры, имеющие специфические названия. Часто используют палитру "Радуга" (Rainbow), которая позволяет отобразить две близкие

температуры контрастными цветами Это бывает необходимым для подчеркивания слабых температурных перепадов Вместе с тем, оператору зачастую бывает трудно ориентироваться в разнообразно окрашенных областях, подчеркивающих относительно слабые изменения температуры Профессионалы применяют палитру "Радуга" при демонстрационных показах тепловизоров, а для практической работы предпочитают полутоновую "Серую" шкалу (Gray) В последнее время стала популярной палитра "Цвета каления" (Iron), которая совмещает в себе преимущества черно-белого и цветного представления изображений Следует отметить, что в современных тепловизорах глубина оцифровки (от 12 до 16 бит) перекрывает весь динамический диапазон измерений, например от -20 до $+2000$ °С, поэтому в процессе работы не требуется перестраивать уровень сигнала В то же время динамический диапазон сигнала на мониторе тепловизора значительно уже, чем глубина производимой оцифровки, что позволяет оценивать слабые температурные перепады визуально, но может приводить к условному зашкаливанию температурных сигналов

7.8.4. Метрология тепловизоров и дополнительные возможности представления информации. Высокие метрологические показатели тепловизоров достигаются использованием встроенных эталонов температуры и датчиков температуры отдельных критических (нагревающихся) узлов Специальные микропроцессорные системы сохраняют цифровые отсчеты температуры стабильными во времени и независимыми (слабозависимыми) от колебаний температуры окружающей среды

Зарубежные тепловизоры, поставляемые на российский рынок, помимо национального (и/или европейского) сертификата, должны иметь сертификат Госстандарта РФ для использования в качестве средства измерения температуры Для

большинства моделей тепловизоров заводская аттестация действительна в течение двух лет, после чего необходимо выполнить их поверку Для этого используют аттестованные эталонные излучатели Аналогичные сертификаты Госстандарта РФ или других ведомств имеет ряд моделей российских тепловизоров

Измерение температуры с помощью тепловизора производится оператором либо непосредственно на экране монитора путем размещения соответствующего маркера, либо расставляя характерные точки объекта контроля на термограмме при ее компьютерной обработке Аппаратным или программным способом возможно профильное представление температуры вдоль выбранных направлений, а также измерение статистических характеристик распределений температуры в областях прямоугольной или овальной формы

Следует отметить, что в тонких физических экспериментах, где требуется высокое температурное разрешение, а измерения проводят в течение длительного времени, проблема стабильности температурных отсчетов полностью не решена даже при использовании охлаждаемых детекторов излучения, а наибольшая нестабильность имеет место в случае неохлаждаемых болометрических матриц

7.8.5. Устройства записи и твердого копирования термограмм. Термограммы регистрируют одним из следующих способов

- посредством стандартной видеозаписи, в которой теряются абсолютные температурные значения, (за исключением цифровой записи в некоторых ранних моделях тепловизоров),

- записью изображений на 3,5-дюймовую дискету с сохранением всех температурных значений, обработку термограмм производят на персональном компьютере,

- записью изображений на PCMCIA (или flash) карту, вставляемую в соответствующий встроенный драйвер тепловизора; затем термограммы обрабатывают на компьютере типа "лэптоп", применение обычных персональных компьютеров требует специального интерфейса для чтения информации с малогабаритных дисков памяти (в последнее время широко используют USB порт),

- записью изображений на жесткий диск компьютера посредством специальной интерфейсной системы, включающей сам интерфейс и управляющую компьютерную программу,

- непосредственной записью изображений в реальном времени на быстродействующий жесткий диск, приобретаемый отдельно и являющийся дорогостоящим устройством, примером такого тепловизора является система Thermovision-900 (AGEMA Infrared Systems), которая используется преимущественно в научных исследованиях

Твердые копии термограмм получают:

- фотографированием с экрана,
- распечаткой с помощью видеопринтера,

- распечаткой изображений, введенных в компьютер, с помощью лазерного или струйного принтера

Компьютерные программы, поставляемые в комплекте с тепловизорами, помимо температурной калибровки и распечатки данных на стандартных принтерах, позволяют формировать и печатать отчеты по результатам ИК-съемки. Программы составлены таким образом, что они могут применяться при диагностике различных объектов в промышленности и медицине

7.8.6. Источники питания. Тепловизоры могут питаться от сети переменного тока через специальный адаптер, а также от аккумуляторов, размещаемых на поясе оператора или непосредственно в тепловизоре. В ряде последних моделей используют стандартные аккумуляторы, приме-

няемые в видеокамерах. Время работы тепловизора от заряженного аккумулятора может достигать нескольких часов

7.8.7. Программные средства для термографического анализа и составление отчетов. Программные средства обеспечивают согласование тепловизора с компьютером, стандартную или специализированную обработку изображений и составление отчетов. Например, фирма AGEMA Infrared Systems (FLIR Systems) каждое новое поколение тепловизоров сопровождала соответствующим пакетом программ, что позволяло пользователю приобретать не только отдельно тепловизор, но компьютерную термографическую систему DIPS с ранними приборами 700-й серии, систему TIC-8000 с программным пакетом CATS для сканеров 700-й и 800-й серии, систему BRUT для анализа изображений в реальном времени с помощью приборов 800-й версии, а также последние пакеты IrWin различных версий, предназначенные для работы с тепловизорами 400, 500, 600-й и других серий. Кроме того, специально для выравнивания излучательной способности объекта контроля, т.е. для повышения точности абсолютных температурных измерений, фирма поставляла отдельную компьютерную программу EQUAL. Эта программа применима, главным образом, при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры, поскольку требует предварительного нагрева объекта до фиксированной температуры

Компьютерные программы позволяют проводить анализ термограмм, в частности, изменять основные установки тепловизора (коэффициент излучения, диапазон измерения и т.д.), определять среднюю температуру в областях различной формы, строить профили, изотермы, гистограммы и т.п. При составлении отчетов возможно введение видимых изображений, полученных с помощью видеокамеры или электронного фотоаппарата (в модели ThermaCam 695 фирмы FLIR Systems имеется встроенная видеокамера, позволяю-

щая записывать видеоизображение объекта контроля практически в том же ракурсе, что и основное ИК-изображение) Программы дают возможность пользоваться стандартными функциями среды Windows, что делает их гибкими при написании и редактировании всевозможных документов. Последние версии позволяют работать сразу с несколькими изображениями. Из коммерческих программ, обладающих развитыми возможностями анализа, следует отметить программу ThermoCam Researcher фирмы FLIR Systems, которая может обслуживать целый ряд моделей тепловизоров данной фирмы. Следует заметить, что для российского потребителя стоимость зарубежных компьютерных программ представляется завышенной, поэтому определенное распространение получили доработанные программы обработки термограмм, в которых температурные значения могут не сохраняться, если формат кадра неизвестен. В последних моделях западных тепловизоров открытие файлов исходных (raw) изображений, в особенности с сохранением температурных отсчетов, затруднительно, поскольку фирмы изготовители используют различные форматы записи, составляющие их ноу хау. Например, тепловизоры фирмы FLIR Systems записывают изображения в формате img, японская фирма NEC использует свой формат svt, в то время как в США приобретает популярность публичный формат fits, описание которого можно найти в Интернете. Последовательности термограмм могут быть записаны в виде отдельных файлов, однако в последние годы популярна запись всей последовательности в один большой файл, для разделения которого на отдельные термограммы необходима специализированная программа.

С линейно-сканирующими радиометрами, например, типа Thermoprofile фирмы FLIR Systems, применяют специальные программы обработки данных, которые позволяют получать цветные термограммы движущихся или вращающихся объектов.

7.8.8. Аксессуары тепловизионных комплектов. В качестве аксессуаров тепловизоров фирмы-производители поставляют сменные объективы, спектральные фильтры (фильтр высоких температур или пламени, атмосферный фильтр, фильтр углекислого газа, солнечный фильтр, длинноволновый фильтр и фильтр для пластмасс), защитный чехол, предотвращающий перегрев корпуса тепловизора при работе в горячих помещениях, аккумуляторы, зарядные устройства, компьютерные программы, устройство совмещения видимого и ИК-изображений, портативные видеомагнитофоны, микрофон для записи речевых комментариев и т.п.

7.8.9. Классификация тепловизоров. Согласно классификации по техническим признакам тепловизионные системы подразделяются на

- системы с линейным обзором, или впередсмотрящие (Forward-Looking Infrared Systems—FLIR), и системы с двухкоординатным обзором (staring), или собственно тепловизоры,
- оптико-механические (первое поколение) и использующие матричные (FPA) детекторы (второе поколение);
- с охлаждаемым (с помощью жидкого азота, микрохолодильника Стирлинга или термоэлектрического микрохолодильника) или неохлаждаемым приемником ИК-излучения,
- показывающие (imaging) или измерительные (radiometric),
- стационарные, портативные или выполненные в виде специального кейса (gimbal), размещаемого под летательным аппаратом,
- коротковолновые (short wave—SW) и длинноволновые (long wave—LW).

Г Капланом была предложена "коммерческая" классификация тепловизоров по трем категориям, учитывающим технические параметры, области применения и стоимость.

К 1-й категории отнесены тепловизоры общего применения, использующие

неохлаждаемые FPA-приемники Типичным представителем этой категории является прибор Thermovision 695 фирмы FLIR Systems (США) со следующими основными параметрами

- температурное разрешение (NETD) 0,08 °С при 30 °С,

- спектральный диапазон 7,5 – 13 мкм,
- пространственное разрешение 1,3 мрад,
- формат изображения 320 × 240

(микроболометрический FPA-приемник),

- частота смены изображений 50/60 Гц (в зависимости от частоты промышленной сети).

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

- температурное разрешение (NETD) 0,07 °С при 30 °С,

- спектральный диапазон 3,4 – 5 мкм,
- пространственное разрешение 1,2 мрад,
- формат изображения 256 × 256 (PtSi FPA приемник),

- частота смены изображений 50/60 Гц

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

- температурное разрешение (NETD) 0,02 °С при 30 °С,

- спектральный диапазон 8 – 9 мкм,
- пространственное разрешение 1,1 мрад,
- формат изображения 320 × 240

(GaAs QWIP FPA-приемник),

- частота смены изображений от 50/60 Гц до 750/900 Гц

Современные тепловизоры второго поколения реализуют модульный принцип построения и используют FPA-приемники

(охлаждаемые или неохлаждаемые) Пример ИК-тепловизионного модуля показан на рис. 7.15 (См. цветную вкладку) Оснащение такого модуля ИК-объективом и телевизионным монитором превращает его в показывающий тепловизор Введение измерительной функции уже требует значительных технических усилий, составляющих предмет ноу-хау фирм-изготовителей, в особенности это относится к системам с неохлаждаемыми фотоприемными матрицами

7.8.10. Коммерческие тепловизоры

Основные технические характеристики тепловизоров приведены в табл. 7.5 Отметим, что ряд российских моделей, описанных в таблице, к настоящему времени устарел, а многие выпускались в единичных экземплярах

Ниже рассмотрены типичные коммерческие модели (см. рис. 7.16 на цветной вкладке) Фирмы-производители применяют гибкую ценовую политику, при которой стоимость тепловизионных систем зависит от их комплектации, в особенности от типа объектива, наличия фильтров, устройств записи и документирования термограмм, а также программного продукта

Ориентировочно отпускная цена фирм на базовые комплекты показывающих тепловизоров высокого уровня составляет от 12 до 30 тыс. долларов США, измерительные приборы камкордерного исполнения могут стоить 35 – 70 тыс. долларов, а стоимость специализированных моделей, например устанавливаемых на гироплатформах летательных аппаратов, может превышать 150 тыс. долларов США На мировом рынке тепловизоры одного класса, но выпускаемые различными фирмами, имеют близкие цены, колебания которых обычно связаны с различным уровнем сервиса в стране, а также с комплектацией системы всевозможными аксессуарами

7.5. Технические параметры отечественных и зарубежных тепловизоров
(данные по состоянию на апрель 2003 г) *

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
Отечественные приборы (СНГ)								
БТВ-3, «Исток»	-20 +200 °С	0,15 °С	ДВ	100 строк в растре	16	-	Через компьютер	20
ТВ-04, Исток	+10 +100 °С	0,15 °С	3,5 5,5	128 × 128	1/3	-	Через компьютер	3
Измерительный тепловизор, ТОО "Контар"	Измерит прибор +30 +400 °С	0,1 °С	3 5	-	-	-30 +40	-	-
Радуга-4, АОМЗ, Украина	25 +50 °С	0,2 °С		140 × 132	25	-	Через компьютер	-
ТН-1, "Спектр"	-30 . +300 °С	0,15 °С	8 13 (пировидикон)	150 линий	25	-	-	10,5
TRI-9301, МВН "Т-П-Т"	-	0,1 °С	8 13	175 × 200	6	-30 +40	-	8,4 (2 блока)
TRI-9400SL, МВП "Т-П-Т"	-20 +1500 °С	0,1 °С	8 . 12	175 × 200	6	-30 +40	-	8,4 (2 блока)
Метис-2, ГИПО	Показыв прибор	-	8 13	-	-	-50 +60	-	11
Сосна, "Метрон"	Показыв. прибор -20 ... +200 °С	0,1 °С	3 ... 5	48-ми элементный детектор	25	-20... +40	-	3,1

Продолжение табл 7 5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
ИРТИС-200, "ИРТИС"	-20 350 °С	0,05 °С	3 5 8 12	256 × 256	1/1,5	-10 +45	Через компьютер	1,8 (камера)
ИСКРА, ГИПО	-10 40 °С	0,1 °С	-	-	-	-	31 термограмма в RAM	-
ТКВр-ИФП, ИФП	+20 . +41 °С (медицин)	0,03 °С	2,9	128 × 128	-	-	-	5
ТЕРМ, КТИ ЦМ СО РАН	-	0,03 °С	2,8 . 3,5 (охлаждаем азотом)	128 × 128	10 50	-	-	3,5
"Сыч" (ОАО "Русэлектроника")	Показыв прибор	0,1 0,25	8 12	Микроболометр Пирозлектрик	-	-15 +45	Отсутствует	2,1-2,8 3,2-3,8
МТ, Загорский оптико-механический завод	-	0,1 °С	3 5	-	-	± 40	Встроенный монитор	2
Инфраком-9201, МНПШ "Нейроком"	Измерит прибор -1 +200 °С	-	8 12 (охлажд)	100 × 100	6	-	Дополнительно необходим компьютер	18 (сканер, насадка, питание)

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битовость цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
ИК-камера, "Орион"	—	0,05 °С	3,8 5,6	До 128 × 128 (охл жидким азотом)	—	—	—	—
ТН-4604МБ, МНПО "Спектр"	—	0,15 °С	8 13	160 × 120 (неохл)	25	—	—	1,5
ТН-4604МП, МНПО "Спектр"	Встроенный ИК термометр	0,15 °С	8 13	320 × 240 (неохл)	25	—	Ввод в компьютер	2,7
Зарубежные приборы ThermaCAM 545, FLIR Systems, США	Показыв прибор -20 +350 °С	0,1 °С	7,5 13	320 × 240 (неохл)	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта, 8 бит, PAL	1,9
ThermaCAM 695, FLIR Systems, США	Измерит прибор -40 2000 °С	0,1 °С	7,5 13	320 × 240 (неохл)	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта, 14 бит PAL Запись звука	1,9
ThermaCAM SC 500, FLIR Systems, США	Измерит прибор для научн исслед с подключением к РС -20 +500 (+2000)	0,1 °С	7,5 13	320 × 240	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта, 14 бит цифровой, 8-бит Витвар Видеовыход PAL Запись звука	2,6

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
ThermaCAM SC 1000, FLIR Systems, США	Измерит прибор для научн исслед с подключением к РС или независимо -20 . +450 (+2000) °С	0,07 °С	3,4 5	320 × 240	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта, 14 бит цифровой, 8-бит Витвар Видеовыход PAL Запись звука	2,7
ThermaCAM SC 2000, FLIR Systems, США	Измерит прибор для научн исслед с подключением к РС или независимо -20 . +500 (+2000) °С	0,1 °С	7,5 13	320 × 240	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта, 14 бит цифровой, 8-бит Витвар Видеовыход PAL Запись звука	2,7
ThermaCAM SC 3000, FLIR Systems, США	Измерит прибор для научных исслед -20 +2000 °С	0,02 °С	8 9 GaAs QWIP	320 × 240	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта 14 бит PAL Запись звука	3,2
ThermaCAM PM 390, FLIR Systems, США	Измерит прибор -10 +2000 (2000) °С	0,07 °С	3,4 5 PtSi FPA	256 × 256	50 (60)	-15 +50	PCMCIA карта 12 бит PAL	1,7
ThermaCAM E2, FLIR Systems, США	Измерит прибор -20 +250 °С	0,12 °С	7,5 13	160 × 120 (неохл)	50 (60)	-15 +45	Запись до 50 изображений JPEG на внутр диск	0,7

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
ThermaCAM P60, FLIR Systems, США	Измерит прибор -40 2000 °С	0,06 °С	7,5 13	320 × 240 (неохл)	NTSC, PAL	-15 +45	Флэш-карта, 128 МБ	2
Thermovision IRMV 320M, FLIR Systems, США	Показыв прибор для наблюдения в неблагоприятных условиях -20 +500 (2000) °С	0,1	7,5 13	320 × 240	50 (60)	-15 +50	Видеовыход PAL	3,0
ThermoVision A20-V, FLIR Systems, США	Модуль показыв тепловизора -20 +900 °С	0,12	—	160 × 120	50 (60)	—	Видеовыход PAL	0,8
ThermoVision A20-M, FLIR Systems, США	Модуль измерит тепловизора -20 +900 °С	0,12	—	160 × 120	50 (60)	—	Видеовыход PAL IEEE-1394 FireWire RJ-45	0,8
ThermoView T130, Raytek, США	Измерит прибор 0 +250 °С	0,25 °С	7 14	160 × 120	20	-10 +50	Флэш-карта, 100 избобр	1
IRRIS-256ST, Cincinnati Electronics, США	Показыв прибор -20 +300 °С	0,025 °С	2,2 4,6	Охл мозаичн детектор (Стирлинг) 256 × 256	—	—	12 бит, TTL	3,5
Sentinel, Amber, США	Показыв. прибор -20 ...+150 °С	0,01 °С	8 ... 12	320 × 240	30	-20 ... +45	NTSC, PAL	—

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
Jade П, CEDIP, Франция	Измерит прибор до +1200 °С	0,02 0,1 °С	8 .14 3 5	320 × 240 (неохл)	150	—	Вывод на РС	2
TVS-120, Nippon Avionics, Япония	Измерит прибор -10 +950 °С	0,2 °С	3 5,4	Неохл мозаичн детектор 320 × 240, 12 бит	10	—	PAL RS-232 Запись на 3,5" флоппи	3,8
TVS-620, Nippon Avionics, Япония	Измерит прибор -20 +900 °С	0,1 °С	8 14	320 × 240 12 бит	30	0 +40	PAL, NTSC, RS-232C Флоппи-диск	2
TVS-2000MKIIIW, Nippon Avionics, Япония	Показыв тепловиз сканер	0,1 °С	8 12	320 × 240 12 бит	30	0 +40	Видеовыход PAL, NTSC, RS-232 PCMCIA карта	2,3
IR-M700, Mitsubishi Electronics, Япония	Показыв прибор	0,08 °С	1,2 5,9	Охлаждаемый мозаичный детектор 801 × 512	60	-10 +50	Видеовыход NTSC, RS-232, 10 бит	4,9 (камера)
LAIRD-3ASH, Nikon, Япония	Показыв прибор -20 +2000 °С	0,09 0,15 °С	3 . 5	768 × 494	30	—	NTSC RS-232 Запись на компьютер	2,5
LAIRD-S270, Nikon, Япония	Показыв прибор -20 +2000 °С	0,2 °С	3 5	475 × 422	30	—	Видеовыход RS-422, 10 бит	2,5

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
IRC640, David Sarnoff Research Center, США	Показыв прибор	0,15 °С	PtSi	640 × 480 (охл жидким азотом)	30	—	RS-170, 12 бит	
MikroScan-5104, Mikron, США NEC, Япония	Измерит прибор -10 +1500 °С	0,1 °С	3 5,2	255 × 223	2, 22	-10 +50	PCMCI карта	2,5
MikroScan-7200, Mikron, США NEC, Япония	Измерит прибор -40 +2000 °С	0,1 °С	8 14	320 × 240 (неохл)	30	—	PCMCI карта	1,8
MikroScan-7515, Mikron, США NEC, Япония	Измерит прибор -40 +500 °С	0,08 °С	8 14	320 × 240 (неохл)	30, 60	-15 +50	PCMCI карта, 16 Мб	—
ExplorIR, Raytheon, США	Измерит прибор -20 +900 °С	0,15 °С	8 14	320 × 240 (неохл)	30	0 +40	RS-232 PCMCI карта 10 Мб	2,9
PalmIR 225 Digital, Raytheon, США	Показыв прибор	—	7 14	160 × 120 (неохл)	30, 25	-20 +49	—	1,2
PalmIR 250 Digital, Raytheon, США	Показыв прибор, интервал отн окр среды 500 °С	0,1 °С	7 14	Неохл мозаичный детектор 320 × 240	30 (NTSC) 25 (PAL)	-20 +49	—	1,8
Series 300, Raytheon, США (последняя версия ControlIR 300D)	ИК-видеокамера	0,08 °С	7 14	Неохл мозаичный детектор 320 × 240	30	-20 ... +49	Видеовыход RS-232	0,68

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
Pro 400 Digital, Raytheon, США	Показыв прибор	0,1 °С	7 14	320 × 240 (неохл)	50, 60	0 +40	Запись на флэш-карту 16 Мб	2,3
ProtectIR 400, Raytheon, США	Показыв прибор	—	7 14	160 × 120 (неохл)	50, 60	-40 +55	—	4,5
Radiometric 500 Digital, Raytheon, США	Измерит прибор	0,1 °С	7 14	320 × 240 (неохл)	50, 60	0 +40	Запись на флэш-карту 16 Мб	2,3
Galileo, Amber Raytheon, США	Измерит прибор	0,025 °С	3 5	Охл FPA детектор 256 × 256	1400 (при 64 × 64)	0 +50	12 бит	4,5
IRC640L, David Sarnoff Research Center, США	Показыв прибор	0,15 °С	—	640 × 480 (охл жидким азотом или Стирлинг)	—	—	Видеовыход NTSC, RS-232	—
IRH32043, David Sarnoff Research Center, США	Показыв камера и блок питания	0,08 °С	—	320 × 244 PtSi (жидкий азот)	30	—	Видеовыход NTSC, RS-170A видео	—
FireOptic, ICC, США	Показыв прибор (пожарн) -20 +60 °С	—	—	Неохл мозаичный детектор 320 × 240	—	—	—	—
SAT-GM18, Guangzhou Sat Infrared technology, Китай	Показывающий прибор, интервал отн окр среды +1000 °С	0,25 °С	8 14	Неохл мозаичный детектор	—	—	—	2,5

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
SAT-HY6800, Guangzhou Sat Infrared Technology, Китай	Измерит прибор -10 +2000	0,08 °С	8 14	320 × 240 (неохл.)	50	—	—	2,5
Ir913, Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай	Измерит прибор -20 +1500	0,06 °С	8 14	Неохл. мозаичный детектор 320 × 240	50	—	РСМСИ карта	—
ImageIR LC, Santa Barbara Focalplane, США	Показыв прибор	0,02 °С	3 5	Охлажденный мозаичный детектор 256 × 256	50/60	—	RS 170, 14 бит	—
DI-9800, Digital Imaging Infrared, США	Показыв прибор	0,05 °С	По выбору	Мозаичный детектор 320 × 240 различного типа	—	0 +70	Монохромное RS-232	1,8
DI-3500, Digital Imaging Infrared, США	Показыв прибор	0,06 °С	3 5	Охлажденный мозаичный детектор 320 × 256 InSb	—	-20 +55	12 бит	2,6
μCAM, AEG Infrarot-Module, Германия	Показыв прибор	0,1 °С	3,2 5	Охлажденный мозаичный 256 × 256 PtSi Стирлинг	—	—	Видеовыход 8-бит цифровой	1,7

Продолжение табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
AEG Infrarot-Module, Германия	Показыв прибор	0,01 °С	8 10	256 × 256 QWIP	200	—	—	—
VARIOSCAN-3011, Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерит -40 +1200 °С	0,03 °С	8 12	300 × 200 HgCdTe, жидкий азот	0,8, 0,2, 0,4	-10 +40	Флэш-карта	5
VarioTHERM, Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерит -25 +1200 °С	0,1 °С	3,4 5	256 × 256 PtSi, Стирлинг	50	-10 +50	PCMCIA	3,9
Leopard, NVT (Night Vision Technology Corp), США	Измерит прибор -20 +400 °С	0,08 °С	8 12	320 × 240	30	0 +40	LCD дисплей PCMCIA	2
Thermosensorik System CMT 384M, Thermosensorik, Германия	—	0,015 °С	3,4 5,2	384 × 288	130	—	14-бит цифровой выход	—
Lynx, NVT (Night Vision Technology Corp), США	Показыв стационарный	0,08 °С	8 12	320 × 240	30	0 +40	LCD дисплей PCMCIA	2
MerIm (неохл), Indigo Systems, США	Показыв прибор 0 +70 °С или 0 +600 °С	0,6 °С	8 13	Неохл мозаичный детектор 320 × 240	NTSC, PAL	—	12 бит	1,8
UMFLIR, Boeing, США	Показыв прибор	0,1 °С	8 12	Неохл мозаичный детектор 320 × 240	PAL	-30 +54	Видеовыход PAL, 12 бит	3,5

Окончание табл. 7.5

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг
Alpha, Indigo Systems, США	Показыв прибор	—	7,5 13,5	160 × 128	25 (CCIR) 30(RS170A)	0 +45	Монохромный RS-170 формат 12-бит цифровой выход	0,2
Omega, Indigo Systems, США	Показыв прибор с интервалом до 500 °С	0,085 °С	7,5 13,5	160 × 128	25 (CCIR) 30(RS170A)	0 +40	Монохромный RS-170 формат 14-бит цифровой выход	0,12
Phoenix, Indigo Systems, США	—	—	3 5	320 × 256	до 1000	—	—	—
VisIR T1 100, T1 200 Indigo Systems and Thermoteknix Systems, США	Измерит прибор -50 +500 °С	0,085 °С	7,5 13	160 × 120 (неохл)	30	—	14 бит PCMCIA карта	1,6
MicroIR LTC550, BAE Systems, США	Показыв прибор	0,1 °С	8 14	320 × 240 (неохл)	60	-20 +50	Видеовыход, RS170, RS422	2,5
IR Snapshot. ISI, США	Измерит прибор фотографич типа -30 +600 °С	0,1 °С	8 12	120 × 120	1/1.5	0 +50	RS232	<2
DVE.AlliedSignal Aerospaceal, Canada	Показыв прибор для ночи вожд	0,05	8 12	320 × 240 (неохл)	Видео-выход	-40 +50	RS-170 или CCIR	—

*Приведены по возможности наиболее представительные модели отдельных серий (использованы материалы выставки "АэроСенс-2003", Орландо, США). Данные таблицы не носят рекламного или рекомендательного характера и не отражают предпочтений автора

По мере удешевления матричных фотодефектов возникла тенденция к созданию простых измерительных тепловизиоров стоимостью около 15 тыс долларов США

Специализированный показывающий тепловизор DVE-1000. В 1998 г между фирмой General Motors и Raytheon было заключено соглашение об оснащении транспортных средств показывающими тепловизорами для ночного вождения. В последние годы фирма Digital Imaging Infrared разработала тепловизор DVE-1000 стоимостью около 6 тыс долларов США для установки на легковом автомобиле (рис 7 16, а). В качестве детектора излучения применена длинноволновая ферроэлектрическая матрица 320 × 240, вес камеры 1,5 кг

Показывающий тепловизор PalmIR Pro. Малогабаритная камера PalmIR Pro фирмы Raytheon является типичным представителем показывающих тепловизоров, предназначенных для использования в качестве приборов ночного видения и для технической диагностики (рис 7 16, б). Использована длинноволновая матрица 320 × 240 и 2,5-дюймовый цветной монитор, запись изображений производят на РСМСІ карту емкостью до 8 Мб (до 60 изображений), вес тепловизора 1,8 кг

Измерительный тепловизор ThermaCAM 695. Данный прибор является логическим завершением 500-й серии неохлаждаемых FPA измерительных тепловизоров, разработанных фирмой FLIR Systems, США (рис 7 16, в). Использована стандартная неохлаждаемая матрица 320 × 240, 12-битовую цифровую запись производят на РСМСІ карту емкостью до 170 Мб. Прибор снабжен цветным монитором. Основная область применений — техническая диагностика в промышленности.

Измерительный тепловизор Galileo. ИК-тепловизор Galileo (рис 7 16, г) фирмы Amber Raytheon (США) был одним из первых приборов с высокой частотой

смены кадров 1400 Гц (в Европе аналогичные системы поставляет французская фирма CEDIP). Использован охлаждаемый микрокомпрессором Стирлинга FPA детектор из антимонида индия

Измерительный тепловизор ThermaCam E2. Самый малогабаритный измерительный тепловизор (новинка 2002 г рис 7 16, д). Отсутствие видеокамеры компенсируется наличием лазерного целеуказателя. При стоимости около 25 тыс долларов США данный прибор содержит все основные опции более дорогостоящих систем. Рекомендуются областями его применения являются электротехника и техническая диагностика промышленных установок

Измерительный тепловизор Thermo View Ti30 является новинкой 2004 г фирмы Raytek (США), которая специализируется на ИК-термометрах. Стоимость около 15 тыс долларов США. Тепловизор может с успехом применяться в энергетике

Измерительный тепловизор ThermaCam P60. Данный прибор фирмы FLIR Systems также появился на рынке в 2002 г (рис 7 16, е). Особенностью тепловизора является отсоединяемый дисплей, лазерный целеуказатель и дистанционная система управления, что позволяет размещать прибор в труднодоступных местах

Тепловизор ТН-4604МП. В портативном тепловизоре МНПО "Спектр" (Россия, рис 7 16, ж) реализована попытка объединить опыт разработки неохлаждаемых пировидиконных тепловизоров с современными неохлаждаемыми матрицами фотодетекторов. Возможно измерение температуры в зоне с использованием встроенного ИК-термометра

Тепловизор ИРТИС 200. Данный тепловизор (последняя версия ИРТИС 2000) является одним из немногих отечественных приборов последних лет, выпускающихся в заметных количествах (разработка фирмы "ИРТИС", Россия, рис 7 16, з). Основные особенности тепловизора ИР-

ТИС 200 1) высокая температурная чувствительность и хорошее пространственное разрешение в результате малой скорости сканирования и применения фотоприемника, охлаждаемого жидким азотом, 2) двухблочная конструкция, включающая оптическую головку и компьютер типа лэптоп. Наибольшее применение прибор находит в энергетике.

7.8.11. Выбор тепловизора. Ввиду того, что тепловизор является универсальным прибором для температурных измерений и анализа тепловых полей, потребитель может испытывать сильное искушение применить его для решения максимального числа измерительных и диагностических задач. Тем не менее, при покупке тепловизора следует четко представлять основные области его будущих применений, что в сочетании с финансовыми возможностями пользователя позволит оптимизировать состав тепловизионного комплекта. Так, применение тепловизора в качестве "дальнобойного" и высокочувствительного прибора ночного видения невозможно без длиннофокусной оптики, но зачастую не требует измерения температуры. Простым прибором тепловизионного наблюдения является модель PalmIR-225 фирмы Raytheon, наилучшим прибором в данной области применения будет тепловизор ThermoCAM 1000 той же фирмы, который может быть установлен на гироплатформе летательного аппарата. В военных областях рекомендуется применять показывающие тепловизоры фирм FLIR Systems и Raytheon. Для ИК-диагностики в энергетике оптимальным прибором может быть прибор ThermoCAM E2 или Thermo View T130. Для многих применений важно наличие фильтров, которые позволяют снизить помехи от отраженного солнечного излучения или повысить точность измерений температуры ряда специфических объектов, таких как стекло, пластмасса, горячий газ и т.п. Многие промышленные применения требуют использования портативного тепловизора с автономным питанием, в то время как для медицинской

диагностики важна высокая чувствительность и развитая компьютерная обработка, а сам тепловизор может быть стационарным и питаться от адаптера переменного тока. Наконец, для научных исследований оптимальной будет модель ThermoCAM SC 3000, а также целый ряд приборов фирм CEDIP, Santa Barbara Focal Plane Array, которые обеспечивают запись длинных последовательностей ИК-изображений в реальном времени.

7.8.12. ИК-системы визуализации утечек газа. Помимо собственно тепловизоров, разработаны визуализирующие ИК-системы, которые используют эффект избирательного поглощения ИК-излучения газами в узких спектральных интервалах, поэтому использование соответствующего спектрального фильтра позволяет фиксировать наличие этого газа в облаке утечки. ИК-устройства обнаружения утечек бывают *пассивного* и *активного* типов (см. главу 9). Введение активной лазерной подсветки на длине волны поглощения целесообразно потому, что в пассивном режиме мощность собственного излучения гел в узких спектральных интервалах мала и необходимы специальные спектрометрические системы высокой чувствительности.

Примером визуализирующих ИК-систем пассивного типа являются спектрометры серии IMSS фирмы Pacific Advanced Technology – PAT (США), использующие дисперсионные хроматические свойства дифракционных оптических элементов. Приборы работают как в средне-, так и в длинноволновом ИК-диапазоне. Внешний вид и параметры модели IMSS-M1 приведены на рис. 7.17 (См. цветную вкладку).

Активные тепловизионные ИК-системы с лазерной подсветкой (лазер CO_2) разрабатывались фирмой Inframetrics (ныне FLIR Systems). Модель Gas Vue TG-5 предназначена для использования в технологических линиях для контроля теплообменников, насосов, цистерн и герметичных сосудов. В объект контроля вводят

пробный газ SF_6 и регистрируют поле отраженного лазерного излучения на расстоянии до 5 м. Минимальная обнаруживаемая утечка 50 г/год. Система является портативной и состоит из трех блоков: лазерно-тепловизионной головки, блока питания с устройством охлаждения и консоли. Модель MG-30 предназначена для обнаружения утечек основных продуктов из цистерн, трубопроводов, резервуаров и т.п. На расстоянии до 30 м данный прибор может различать до 77 различных газов, из которых 5 газов выбраны для стандартной калибровки. Облако утечки видно на экране тепловизионного монитора в виде темной зоны, соответствующей повышенному поглощению отраженного от объекта лазерного излучения. Минимальная обнаруживаемая утечка газа 1 кг/год.

7.9. ЛИНЕЙНЫЕ ИК-СКАНЕРЫ

Линейные, или строчно-сканирующие, ИК-системы по технической сложности и стоимости занимают промежуточ-

ное положение между тепловизорами и ИК-термометрами. Термин "сканирующие" применяется к этим системам, поскольку в течение нескольких десятилетий развертку пространства в них осуществляли оптико-механическим способом. В современных моделях все чаще применяют линейные многоэлементные фотоприемники (матрицы), что предельно упрощает схему приборов.

Линейные ИК-системы можно разделить на две большие группы: 1) приборы, устанавливаемые на летательных аппаратах (самолетах, космических станциях), и 2) приборы промышленного применения.

Сканеры первого типа обладают малым углом зрения, и их система развертки привязана к высоте H и скорости полета V , точнее к величине V/H , для того, чтобы обеспечить плотную укладку строк сканирования (рис. 7.18, а). При чрезмерно большой величине V/H будет происходить пропуск участков исследуемой поверхно-

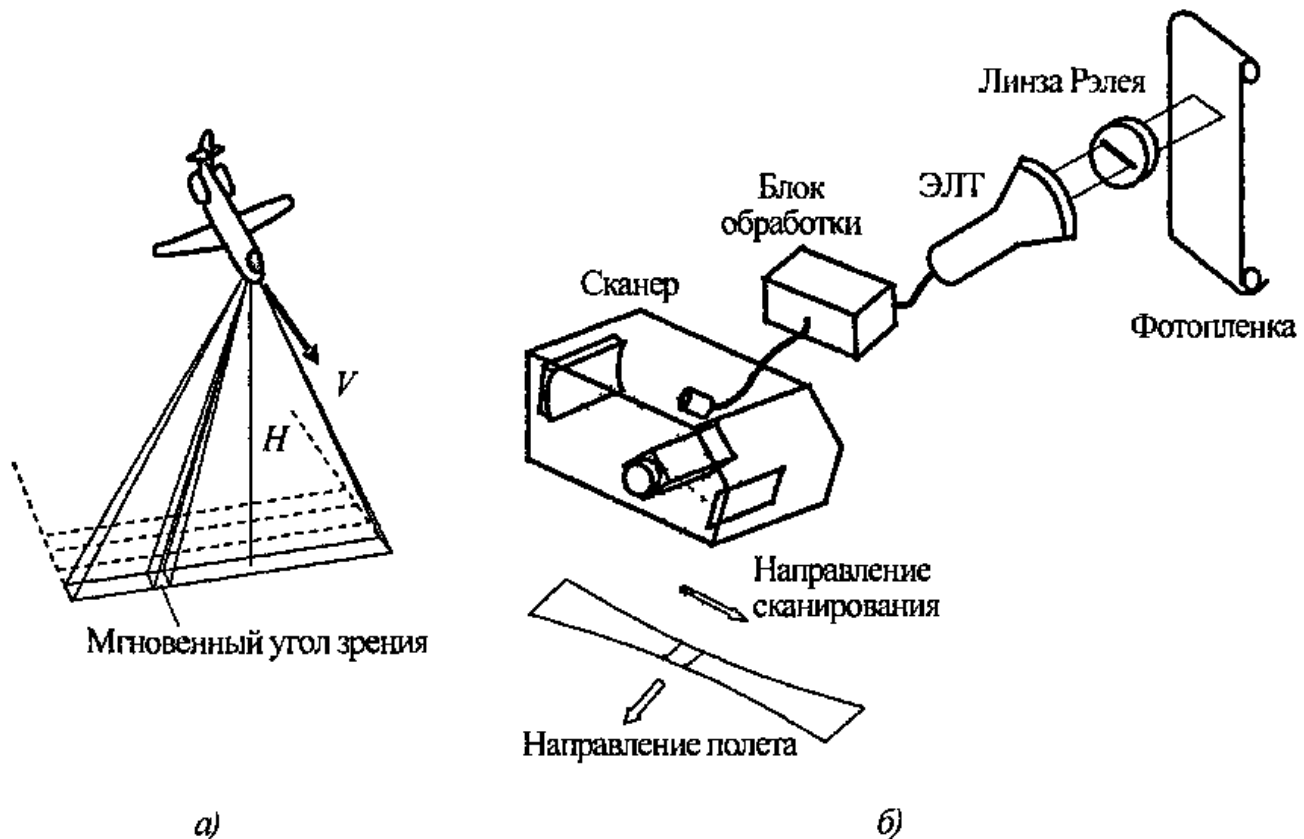


Рис. 7.18. Линейные ИК-сканеры, устанавливаемые на летательных аппаратах:

а – схема ИК-аэро съемки подстилающей поверхности, б – бортовой ИК-сканер с оптико-механической разверткой

7.6. ИК-системы с линейной (строчной) разверткой

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур	Температурная чувствительность	Спектральный диапазон, мкм	Частота строк (Гц) и/или формат кадра, угол зрения	Масса, кг
<i>Системы, устанавливаемые на летательных аппаратах (гиростабилизированные)</i>					
Thermovision 1000/Argus 350, FLIR Systems, США	—	0,08 °С	8 12	5-ти элементный спрайт-детектор 800 × 445	25 – гирос-платформа Argus 350
DI-2000, Digital Imaging Infra-red, США (на базе системы DI-9800)	—	0,08 °С	8 12	320 × 240	—
ИК-сканер ГосНИИ АС, г Москва	Показыв прибор	0,1 °С	3 5 и 8 14	—	—
"Везувий-ЭК", ВНЦ "ГОИ им С И Вавилова"	Многоспектр авиац сканер (показыв прибор)	0,1 0,3 °С	0,4 1,0 3 5 8 12 и др	12,5 25 50 100	80
<i>Приборы для промышленного применения</i>					
Thermoprofile-HT FLIR Systems, США	+75 +600 °С	1 °С	3 5	8 20 Гц 90°	—
Thermoprofile-50 FLIR Systems, США	0 +1600 °С	—	3 5	48 Гц 256 элементов/строку	—
GS100, Raytek, США (для стек-кольного про-изводства)	20 +950 °С	—	—	36 Гц и 48 Гц	—
"ИКСА-04", Томский НИИ ИН	+100 +450 °С	—	2 20 (пиро-прием-ник)	2 Гц 150 элемен-тов/строку	8
"Интрокон-05Ц", Томский НИИ ИН	+50 +600 °С	—	1,5 5,3 (PbSe)	2 Гц 360 элемен-гов/строку	6

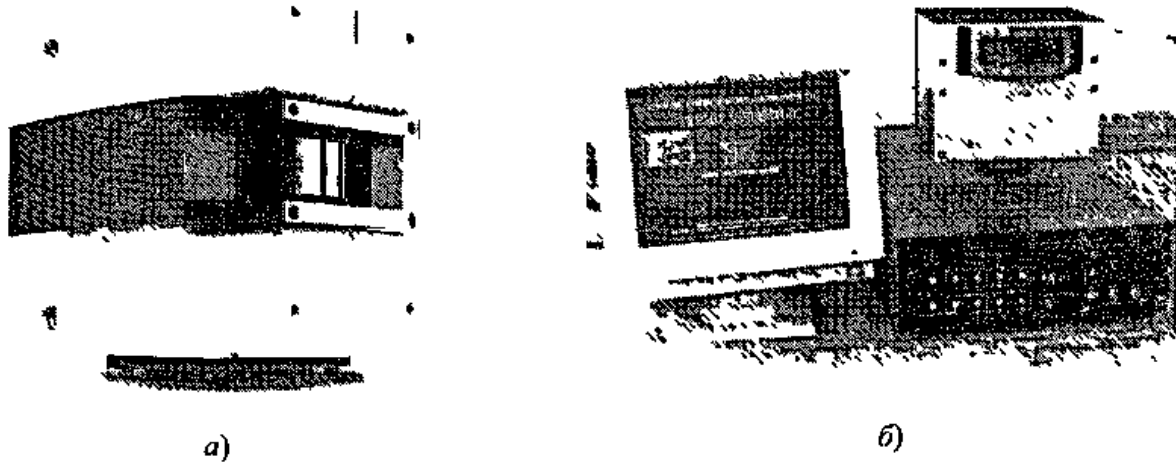


Рис. 7.19. ИК системы с линейной (строчной) разверткой:
 а – Thermoprofile-50 (FLIR Systems), б – "Интрокон-05Ц" (Томский НИИ интроскопии)

сти, а при чрезмерно малой – наложение строк друг на друга. Приборы такого типа разрабатываются для ИК-аэро съемки, в основном, в военных целях. За рубежом основными производителями являются фирмы FLIR Systems, Raytheon, Digital Imaging Infrared и др. Оптико-механические ИК-сканеры с высокими параметрами для космических применений были созданы в СССР. Среди систем, устанавливаемых на самолетах и вертолетах, следует отметить бортовой тепловизор "Везувий-ЭК" (развитие прибора "Вулкан"), разработанный ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова" и применяющийся для решения геофизических задач. При угле обзора 84 град прибор имеет типовое пространственное разрешение 1 мрад (возможно до 0,2 мрад) и работает в 4-х спектральных диапазонах. Непрерывное тепловое изображение земной поверхности может фиксироваться на фото пленку (рис. 7.18, б) или электронную память с последующей передачей информации на станцию слежения. В космической аэро съемке широко применяют спектрально-зонные системы, регистрирующие электромагнитное излучение Земли сразу в нескольких (до 24) каналах. В спутниковых системах ИК-разведки и в военных системах раннего обнаружения целей применяют разнообразные схемы сканирования, отличные от изображенной на рис. 7.18). Описание этих систем выходит

за рамки данной книги (см., например, справочник [101]).

В промышленных сканерах (строчно-сканирующих ИК-пирометрах) частоты развертки фиксированы, и сопутствующие компьютерные программы позволяют строить непрерывные тепловые изображения движущихся объектов. Основными потребителями строчно-сканирующих ИК-пирометров являются металлургическая, цементная, стекольная и бумагоделательная промышленность (см. табл. 7.6 и главу 9). На рис. 7.19, а показан внешний вид и основные параметры прибора Thermoprofile-50. Несколько типов линейных ИК-сканеров были разработаны в России (Томском НИИ интроскопии, Омском государственном техническом университете и др. организациях) для контроля температуры вращающихся печей, используемых для производства цемента. Внешний вид и характеристики отечественной системы "Интрокон-05Ц" приведены на рис. 7.19, б.

7.10. ИНФРАКРАСНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ (ПИРОМЕТРЫ)

Инфракрасные термометры (оптические пирометры) предназначены для бесконтактного измерения температуры в локальных зонах. В НК материалов эти приборы практически не используются (за исключением специализированных иссле-

довательских систем, в ряде случаев стыкуемых с точечными нагревателями), но их широко применяют в пассивной технической диагностике электротехнических установок, теплоэнергетике и строительстве, а также для измерения температуры в технологических процессах. Приборы выпускают трех типов: портативные ИК-термометры, бесконтактные датчики температуры, встраиваемые в промышленные установки, и исследовательские системы ТК, включая ИК-микроскопы. Пирометры для промышленного применения должны быть сертифицированы Госстандартом РФ и проходить поверку каждые 1–2 года.

Основными параметрами ИК-термометров являются

- диапазон измеряемых температур (стандартный диапазон -20 – $+900$ °С, однако возможно его расширение в обе стороны, в частности, до $+3000$ °С),

- показатель визирования, представляющий собой отношение диаметра визируемого пятна к расстоянию между прибором и объектом контроля, например, показатель визирования 1:80 означает, что на расстоянии 8 м диаметр визируемой зоны составит 10 см (строго говоря, оптическая диаграмма ИК-термометров является более сложной и обеспечивает минимальный размер исследуемой зоны на фиксированном расстоянии до объекта),

- постоянная времени (в зависимости от типа используемого фотоприемника

может составлять от микросекунд до сотен миллисекунд).

7.10.1. Портативные ИК-термометры. В большинстве западных и ряде российских портативных пирометров "пистолетного" типа наводку на объект осуществляют с помощью лазерного целеуказателя. Луч лазера указывает либо центр визируемого пятна (одиночный лазер), либо действительные размеры пятна (круговой лазер). На открытом воздухе и на больших расстояниях лазерный луч не виден, поэтому применяют оптическую наводку. Портативные пирометры высокого уровня, например приборы серии Zi фирмы Raytek (Thermopoint-90), имеют встроенную цифровую память измеренных значений, интерфейс ввода в компьютер и программное обеспечение, позволяющее накапливать результаты измерений и представлять их в удобной форме.

Стоимость большинства ИК-пирометров составляет от 100 до 1000 долларов США. Среди западных производителей этих приборов следует выделить фирму Raytek, выпускающую широкую номенклатуру бесконтактных ИК-термометров (эти же модели распространяются под торговой маркой Thermopoint фирмы FLIR Systems). Данный сегмент рынка успешно осваивается и рядом российских фирм.

Технические параметры ИК-термометров приведены в табл. 7.7 и на рис. 7.20.

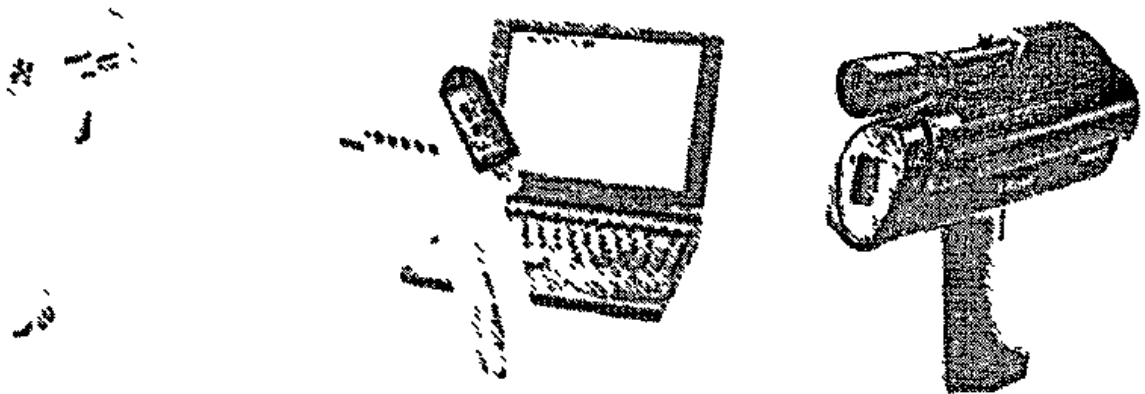


Рис. 7.20. Портативные ИК-термометры фирмы Raytek (США)
(эти же модели поставляются фирмой FLIR Systems)

7.7. Портативные ИК-термометры

Модель	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Дополнительные функции
<i>Отечественные приборы</i>			
С-110 "Факел" ("ТЕХНОАС")	-20 +200	100 1	Точечный лазер
С-210 "Салют" ("ТЕХНОАС")	-20 +600	100 1	Точечный лазер
С-300 «Фаворит» ("ТЕХНОАС")	-20 +200	100 1 150 1	Точечный лазер
С-500 "Самоцвет" ("ТЕХНОАС")	+400 +1600	100 1 150 1	Оптический прицел
С-600 ("ТЕХНОАС")	+700 +1900 +800 +2200	180 1	Оптический прицел
С-3000 ("ТЕХНОАС")	+1100 +1900	60 1	Оптический прицел Автом учет коэфф излуч
КТА ("КОНТАР")	+50 +2500	30 1	Многоканальный
ДИЭЛТЕСТ-ТВ ("Веста-С")	+500 +1800 +700 +3000	-	Память на 63 значения
ДИЭЛТЕСТ-ТВ ("Веста-С")	+200 +1200	-	Память на 63 значения
АСТРОТЕМ ("Астрон-лектро")	-20 +200	10 1, 30 1, 40 1, 120 1, 150 1	Лазерный или оптический прицел
Кельвин (НПО "Диполь")	-30 +400 0 +600 50 +700	150 1 180 1	Лазерный или оптический прицел
<i>Зарубежные приборы</i>			
MT2, Raytek, США	-18 +275	8 1	-
MT4, Raytek, США	-18 +275	8 1	Точечн лазер
MiniTempHS, Ray- tek, США	-30 +200	4 1	Точечн лазер Фиксир коэфф излуч
Raynger ST20, Ray- tek, США (аналог Thermopoint-2)	-30 +400	12 1	Точечн лазер Фиксир коэфф излуч
Raynger ST30, Ray- tek, США (аналог Thermopoint-3)	-30 +545	12 1	Круговой лазер Фиксир коэфф излуч

Продолжение табл. 7.7

Модель	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Дополнительные функции
Raynger ST60, Raytek, США (аналог Thermopoint-6)	-30 +600	30 1	Круговой лазер Регулир коэфф излуч. Термопара
Raynger ST80 (80-IS), Raytek, США (аналог Thermopoint-8)	30 +760	50 1	Круговой лазер Регулир коэфф излуч Термопара
MX2, Raytek, США (аналог Thermopoint-62, 64)	-30 +900	60 1	Круговой лазер Регулир коэфф излуч. (имеется модель с цифровым выходом и памятью на 100 точек)
MX4+, Raytek, США (аналог Thermopoint-64+)	-30 +900	60 1	Круговой лазер Регулир коэфф излуч. Цифровой выход Компьютер программа.
31, Raytek, США (аналог Thermopoint-90)	-30 +1200 (модель 1М до +1800 °С, модель 2М до +3000)	от 25 1 до 180 1	Круговой лазер Регулир коэфф излуч. Цифровой выход Компьютер программа Спектральные фильтры для стекла и пластмасс.
PhotoTemp MX6+, Raytek, США	30 +900	50 1	Встроенная цифровая фотокамера, позволяющая фиксировать зону измерения температуры
ULTIMAX-10	+900 +3000	-	Видеоискатель RS 232 (IRCON, США)
ULTIMAX-20	+600 +3000	-	
ULTIMAX-40	-50 +1000	-	
ULTIMAX-400	-20 +300	10 1	Точечный лазер

7.10.2. Устанавливаемые бесконтактные датчики температуры. Недостатком широко распространенных контактных измерителей температуры, в частности термомпарных, является относительно невысокий срок службы (без специальной защитной оболочки) или большая постоянная времени (при наличии защитной оболочки), а также невозможность измерять температуру в удаленных

от места установки зонах. Ряд мировых фирм, прежде всего фирма Raytek, выпускает ИК-датчики температуры, которые могут заменять термомпары. ИК-датчики обладают малой постоянной времени (доли секунды) и хорошо встраиваются в автоматизированные системы сбора данных и управления технологическими процессами. Аналоговый выход ИК-датчиков часто градуируют в соответствии с сигналами

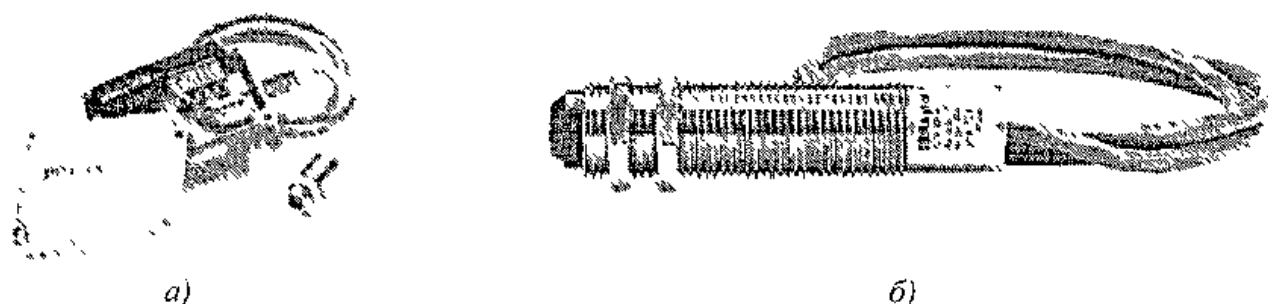


Рис. 7.21. Устанавливаемые ИК-датчики температуры фирмы Raytek, США:
 а – серия Compact MID, б – серия Compact CI

дом распространенных термопар. По цифровому каналу возможна связь с компьютером согласно протоколу RS-232 или RS-485. Ряд моделей, помимо самих датчиков, включает блок обработки сигнала, позволяющий устанавливать коэффициент излучения, определять экстремальные показатели температурного сигнала и выдавать

сигнал тревоги. При необходимости приборы комплектуются защитным кожухом, которые охлаждаются водой или воздухом. Стоимость датчиков – того же порядка, что и портативных ИК-термометров.

В табл. 7.8 и на рис. 7.21 описаны устанавливаемые ИК-датчики температуры фирмы Raytek.

7.8. Устанавливаемые ИК-датчики температуры фирмы Raytek, США

Модель	Диапазон измерений	Показатель визирования
Серия Compact MID LT	-40 – 600 °С	2 : 1 и 10 : 1
MID G5	150 – 850 °С	2 : 1 и 10 : 1
MID MTB	200 – 1200 °С	2 : 1 и 10 : 1
CI	0 – 500 °С	4 : 1
GP (с лазерной наводкой)	-8 – 540 °С	50 : 1
Серия Thermalert	-18 – 3000 °С	60 : 1 и 90 : 1
Серия Marathon (вкл. цветные и оптоволоконные пирометры)	250 – 3000 °С	

7.11. ЭТАЛОННЫЕ ИСТОЧНИКИ (МОДЕЛИ АЧТ)

Как отмечалось выше, заводская аттестация тепловизоров и ИК-термометров действует в течение 1–2 лет в зависимости от модели. В России схемы метрологических испытаний этих приборов в принципе хорошо разработаны, но их не всегда удается реализовать на практике из-за отсутствия аттестованных образцов

высокотемпературных излучателей (моделей абсолютно черных тел – АЧТ). Фактически только небольшое число российских организаций метрологического профиля, а также ряд специализированных фирм, в состоянии выполнять аттестацию и поверку ИК-приборов для измерения низких температур. Следует отметить, что на практике зачастую проверяют диапазон измерения температуры и основную по-

7.9. Эталонные излучатели для поверки тепловизоров и ИК-термометров

Модель	Диапазон температур, °С	Погрешность	Температурное разрешение, °С	Стабильность	Диаметр апертуры, мм	Кoeffициент излучения
BB1000 (Raytek)	-20 150	±0,3 °С	0,1	0,1 °С/8 ч	51	0,98
BB2500 (Raytek)	От окр среды +10 до +300	±1 °С или 0,25 %	1	0,5 °С/8 ч	76	0,98
BB5000 (Raytek)	+200 +1150	±1 °С или 0,25 %	1	0,5 °С/8 ч	51	0,999
BB5000 (Raytek)	+300 +1700	±1 °С или 0,25 %	1	1 °С/8 ч	25	0,99

грешность, хотя в принципе тепловизоры характеризуются достаточно большим набором метрологических параметров. Процедура аттестации и поверки может различаться в зависимости от назначения тепловизоров, в частности, в России реализована схема испытаний медицинских тепловизоров (ОСТ 3-4408-82 Минмедпрома СССР "Приборы тепловизионные медицинские. Методы измерений основных параметров")

Эталонные излучатели для тепловизоров и ИК-термометров сходны по конструкции, однако для поверки тепловизоров размер излучающей зоны превышает 5–10 см, тогда как для пирометров зачастую достаточно 2–4 см. Описание конструкций эталонных излучателей выходит за рамки данного справочника (см книги [1, 99–101]), технические характеристики некоторых зарубежных моделей приведены в табл 7.9

7.12. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Поскольку одним из основных преимуществ теплового метода НК является оперативный характер испытаний, который реализуется только в случае использования ИК-устройств измерения темпе-

ратуры, контактные датчики температуры, за небольшим исключением, не используются в ТК, или, по крайней мере, играют вспомогательную роль. В настоящем параграфе сделан лишь краткий обзор контактных устройств, основанный на материалах справочника [11]

Четыре основных типа температурных датчиков описаны в табл 7.10. Кроме того, существуют температурочувствительные покрытия, которые, будучи нанесенными на поверхность объекта, способны визуализировать его динамическое температурное поле (жидкие кристаллы) или свидетельствовать о достижении температурой определенного уровня (термоиндикаторы плавления)

7.12.1. Термопары. Открытый Т. Зебеком в 1821 г. термоэлектрический эффект состоит в том, что в цепи проводов, содержащих соединения (спаи) разнородных металлов, возникает электрический ток, если нагревать одно из соединений. Показания включенного в разрыв такой цепи вольтметра будут прямо пропорциональны температуре

$$e_{AB} = \alpha T, \quad (7.11)$$

где α – термоэлектрический коэффициент. В табл 7.11 описаны свойства некоторых распространенных материалов, используемых для изготовления термопар

7.10. Характеристика контактных температурных датчиков [11]

Преимущества	Недостатки
<i>Термопары</i>	
не требуют питания просты конструктивно прочны низкая стоимость работают в широком температурном диапазоне выпускаются различной формы и размеров	нелинейны низкий уровень сигнала требуется эталон наименее стабильны наименее чувствительны
<i>Термометры сопротивления</i>	
наиболее стабильны наиболее точны более линейны, чем термопары	высокая стоимость инерционны требуется источник тока малые изменения сопротивления измерения по четырем проводам
<i>Термисторы</i>	
высокий уровень выходного сигнала малоинерционны измерения по двум проводам	нелинейны ограниченный диапазон измерения хрупки требуется источник тока нагреваются в процессе работы
<i>Датчики на основе интегральных схем</i>	
наиболее линейны наиболее высокий уровень выходного сигнала низкая стоимость	$T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ требуется источник питания инерционны нагреваются в процессе работы выпускаются ограниченной конфигурации

Основной особенностью термопар является то, что при подключении к ним измерительных приборов (вольтметра) возникают *дополнительные* термопары, сигналы которых должны быть учтены при измерении. Например, подключение вольтметра с медными проводниками к медь – константановой термопаре (тип Т) не вызывает термоэлектрической электродвижущей силы (ЭДС) в месте контакта медь – медь, но вызывает ее в месте контакта медь – константан (рис 7.22, а)

Распространенным способом учета этого эффекта является термостабилизация дополнительного спая, например, помещая его в тающий лед (рис 7.22, б). Существуют разнообразные схемы подключения термопар, повышающие точность измерений.

В отличие от термисторов и термометров сопротивления, термопары не измеряют абсолютной температуры, поскольку требуют создания эталонного спая. Основным преимуществом термопар

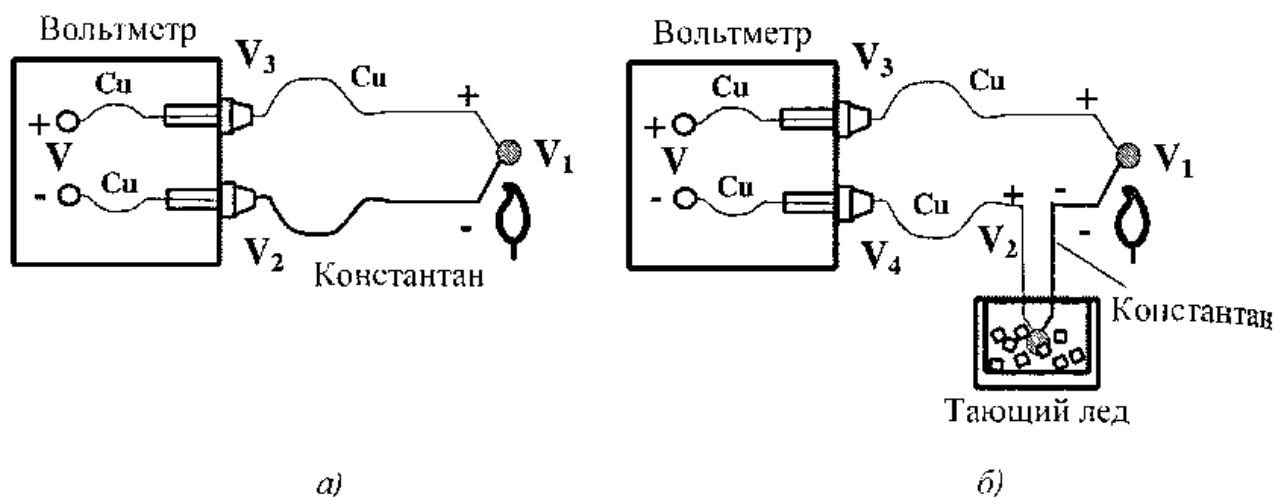


Рис. 7.22. Включение термопар:
 а - непосредственное ($V_1 = 0$), б - использование эталонного спая ($V_3 = V_4 = 0$)

7.11. Свойства термопар [11]

Тип	Материал (пропорции)	Электрическое сопротивление, Ом/305 мм при 293 К	Термоэлектрический коэффициент, мВ/К
В	(+) 0,7 платина, 0,3 родий (-) 0,94 платина, 0,06 родий	0,22	5,96 при 273 К
Е	(+) 0,9 никель, 0,1 хром (-) константан	0,71	58,67 при 873 К
J	(+) железо (-) константан	0,36	50,38 при 273 К
К	(+) 0,9 никель, 0,1 хром (-) никель	0,59	39,45 при 273 К
Т	(+) медь (-) константан	0,30	38,75 при 273 К

является широкий диапазон измерений и возможность работать в различных, в том числе, достаточно агрессивных средах. Термопары могут привариваться или прижиматься к объекту контроля.

Тепловые дефектоскопы на околоповерхностных термоэлектрических приемниках

В СССР Ю. Г. Гавицким были разработаны тепловые дефектоскопы активного типа для сканирования поверхности многослойных цилиндрических изделий с дефектами типа расслоения [10]. В дефекто-

скопах использованы многоэлементные термоэлектрические датчики площадью 1×1 см, которые прижимались к контролируемой поверхности через фторопластовые прокладки с воздушным зазором около 0,1 мм. Теплопередача в зазоре происходит путем теплопроводности, большая постоянная времени делает такие датчики пригодными для обнаружения дефектов достаточно большой площади, характеризующихся оптимальным временем регистрации более нескольких секунд (изделия типа резина-металл). Преимущества приборов простота и невысокая стоимость.

мость. Сведения о продолжении данных разработок в настоящее время отсутствуют.

7.12.2. Термометры сопротивления.

Параллельно с открытием термоэлектрического эффекта Х. Дейви обнаружил, что электропроводность металлов зависит от их температуры. В 1871 г. У. Сименсом было предложено использовать платину в качестве чувствительного элемента термометров сопротивлений. В 1936 г. К. Майерс разработал классическую конструкцию платинового термометра сопротивления, которая в основном сохранилась до настоящего времени. В промышленных термометрах сопротивления двойная платиновая проволока намотана на керамическую основу и залита стеклом. В последние годы приобрели популярность пленочные устройства, которые, по сравнению с проволочными аналогами, обладают меньшей инерционностью, габаритами и стоимостью, но большим электрическим сопротивлением, что уменьшает ошибки измерений, вызванные конечным сопротивлением соединительных проводов. В любом случае используют одну из мостовых схем подключения термометров сопротивления с использованием внешнего источника питания и вольтметра.

Электропроводность металлов (см табл. 7.12) увеличивается с ростом температуры. Наиболее используемые материалы: платина и сплавы никеля. Термометры сопротивления являются более линейными датчиками температуры по сравнению с термопарами, тем не менее, для аппроксимации зависимости электросопротивления от температуры используют формулу Каллендара-Ван Дузена

$$R_T = R_0 \left[\alpha \left(T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right] \right], \quad (7.12)$$

где R_T — сопротивление при температуре T ; R_0 — сопротивление при температуре

$T = 273$ К, α — температурный коэффициент, $\delta \approx 1,49$, $\beta = 0$, если $T > 273$ К и $\beta = 0,11$, если $T < 273$ К. Более точные значения α , β , δ определяют путем тарировки термометра сопротивления при четырех температурах.

7.12. Электропроводность металлов

Металл	Электрическое сопротивление, Ом мм ² /м
Золото	21,61
Серебро	14,63
Медь	15,39
Платина	98,08
Вольфрам	49,87
Никель	59,85

Следующие особенности термометров сопротивления должны быть приняты во внимание при их практической эксплуатации: 1) эти приборы более хрупки по сравнению с термопарами, и с ними нужно обращаться с осторожностью; 2) за счет прохождения электрического тока термометры сопротивления, особенно малой массы, могут нагреваться, что создает ошибки измерения (этот эффект подавляют, используя малые токи и металлы с высоким сопротивлением, а также погружая датчики в теплопроводные среды); 3) присоединение термометра сопротивления к объекту контроля может вызывать изменение температуры объекта за счет теплопроводности; 4) вследствие термоэлектрического эффекта (например, в соединениях медь — платина) может возникать термоэлектрическая ЭДС, что требует ее компенсации.

7.12.3. Термисторы. Термисторы подобны термометрам сопротивления, но в качестве чувствительного элемента они используют полупроводники, у которых зависимость сопротивления от температуры может быть весьма сильной. Поэтому термисторы являются наиболее чувстви-

тельными контактными измерителями температуры, тогда как термопары более универсальны, а термометры сопротивления наиболее стабильны

У большинства полупроводников электросопротивление падает с ростом температуры (хотя есть полупроводники с "положительной" характеристикой) Сравнение трех типов контактных термометров приведено на рис. 7.23 Видно, что термисторы являются весьма нелинейными датчиками, их характеристика описывается уравнением Штейнхарта–Харта [11]

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3}, \quad (7.13)$$

где T – температура в К, R – сопротивление в Ом, A , B , C – коэффициенты, определяемые по трем эталонным температурам При типичном электросопротивлении около 5 кОм при комнатной температуре, термисторы в меньшей степени подвержены ряду ошибок измерения, характерных для других термометров Их применение ограничено температурами до нескольких сотен Кельвина, а длительная экспозиция при высоких температурах требует их периодической тарировки

7.12.4. Интегральные датчики температуры Этот тип контактных термометров является относительно новым Коммерчески доступны приборы с выходом по току (1 мкА/К) и по напряжению (10 мВ/К) Будучи весьма линейными устройствами, интегральные датчики обладают теми же недостатками, что и термисторы, поскольку используют полупроводниковые материалы с относительно небольшим диапазоном измеряемых температур Их часто используют для компенсации ошибок измерения термопар, а также для создания многоканальных автоматизированных систем измерения температуры в промышленности

7.12.5. Жидкокристаллические термоиндикаторы. Открытые более стабильные жидкие кристаллы, занимающие

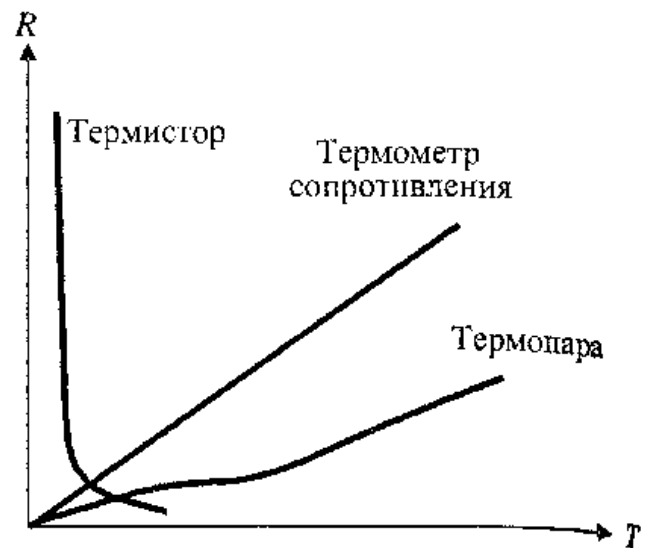


Рис. 7.23. Зависимость электросопротивления контактных термометров от температуры

промежуточное положение между твердыми кристаллическими веществами и жидкостями, долгое время рассматривались в качестве физического курьеза. В 70-х г. прошлого века произошло стремительное нарастание исследований и практического применения этих специфических веществ, список которых в настоящее время превышает сотню тысяч наименований

В качестве датчиков температуры используют жидкие кристаллы, в которых тип жидкой фазы зависит от температуры. Молекулы этих веществ, в зависимости от температуры, выстраиваются в определенном порядке, создавая так называемые нематические, холестерические или смектические мезофазы Рассеиванием белого света термоиндикаторы создают цветную картину температурных распределений при изменении цвета от красного к синему Для избежания обратного рассеяния света от подложки, на контролируемый материал либо наносят черное покрытие, либо используют зачерненные жидкокристаллические пленки, в которых сама пленка играет роль покрытия

Первые виды жидкокристаллических термоиндикаторов были подвержены быстрой деградации на открытом воздухе из-за загрязнения и воздействия ультрафио-

летового (УФ) излучения. Этот недостаток был быстро преодолен после внедрения технологии микрокапсулирования, дополнительным преимуществом которого является меньшая зависимость наблюдаемого цвета от угла зрения.

Уже к 1975 г. был накоплен определенный опыт использования жидких кристаллов в НК (обнаружение скрытых дефектов, перегрев радиоэлектронных компонент, контроль качества теплообменников, обнаружение трещин в авиационных конструкциях и медицинская диагностика).

Обычные жидкокристаллические пленки имеют постоянную времени до десяти миллисекунд, разработаны также индикаторы субмиллисекундного и даже микросекундного диапазона.

Жидкокристаллические термоиндикаторы поставляются следующих типов: 1) спреи, 2) покрытия для твердых поверхностей, 3) микрокапсулы для использования в качестве красящих веществ в водных средах (размер капсул 5–10 мкм), 4) пленки на полиэфирной основе, 5) компаунды и смеси для малоразмерных объектов (в последнем случае пространственное разрешение достигает микрометрового уровня).

Химический состав жидких кристаллов определяет их цветовой отклик на изменение температуры. Производители обычно указывают начальную температуру цветозменения и диапазон перехода цветов (точку перехода от красного к синему). Термоиндикаторы доступны в диапазоне от -30 до $+100$ °C с температурным разрешением $0,5$ °C. В СССР выпускалась широкая номенклатура жидких и пленочных термоиндикаторов.

По очевидным причинам количественное измерение температуры с помощью жидких кристаллов затруднительно, но во многих задачах НК этого и не требуется: например, с помощью жидких кристаллов легко осуществляют визуальный контроль за температурой радиоэлектронных компонент в процессе дизайна и экс-

плуатации. При необходимости измерять температуру используют узкополосные кристаллы с ярко выраженными цветовыми переходами.

Интерпретация цветов является субъективным процессом, хотя и были разработаны телевизионные системы наблюдения за жидкокристаллическими термоиндикаторами, в которых использована RGB (Red-Green-Blue) модель цвета.

Технология применения жидкокристаллических термоиндикаторов включает следующие этапы [11]:

- оценку максимальной и минимальной ожидаемой температуры,
- выбор жидкокристаллической смеси, подходящей для данного температурного диапазона,
- нанесение черного покрытия на контролируемую поверхность или использование жидкокристаллической пленки,
- обеспечение визуального доступа к контролируемой поверхности при минимальных отражениях,
- обеспечение устройств наблюдения цветов в реальном времени (если это необходимо),
- минимизацию экспонирования объекта контроля ИК- и УФ-излучению,
- калибровку цветов по температуре (если это необходимо),
- оценку температурного распределения по визуальной или зарегистрированной цветовой картине.

7.12.6. Термоиндикаторы плавления. В промышленности достаточно широко используют термоиндикаторы с температурозависимой точкой плавления (смеси органических и неорганических веществ), которые поставляются в виде красок, таблеток, термомелков и термокарандашей. Типичной процедурой является нанесение на объект контроля маркера, который плавится и изменяет цвет при достижении определенной температуры. Диапазон фиксируемых температур составляет от $+38$ до $+1370$ °C. Шаг оценки

температур с помощью термоиндикаторов плавления может достигать 3,4 °С, хотя обычная чувствительность составляет от 14 до 28 °С. Термоиндикаторы плавления удаляют с помощью воды или спирта, хотя при их сильном перегреве может потребоваться механическая зачистка поверхности.

Основные области применения термоиндикаторов плавления в качестве средства мониторинга температуры и свидетелей перегрева: металлургия, энергетика, сварка и другие промышленные процессы и производства, где температура является индикатором качества или функционирования.

Глава 8

ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДАННЫХ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

8.1. ПАРАМЕТРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТК

Как отмечалось выше, технология НК включает фазу *обнаружения* дефектов и фазу *оценивания* их параметров. Фаза обнаружения завершена, если оператор или автоматическое устройство либо признало объект контроля бездефектным, т.е. соответствующим нормативным требованиям по качеству, либо приняло решение о наличии тех или иных дефектов. На этой стадии обработки результатов НК параметры дефектов не определяют, а процесс принятия решения носит статистический характер. На стадии дефектометрии, используя математические методы решения обратных задач, оценивают параметры дефектов и степень их важности для безотказного функционирования объекта контроля, а в ряде случаев прогнозируют качество (срок службы, работоспособность) объекта. В ТК процедуры обработки данных согласно указанным стадиям разработаны слабо, в особенности, если речь идет о прогнозировании срока службы. В большинстве случаев ответственность за принятие решения о степени серьезности обнаруженных дефектов принимается конечным пользователем (заказчиком) на основе существующих норм и стандартов.

В ТК заключение о качестве изделий принимают на основе анализа 1) величины обнаруженных температурных аномалий; 2) особенностей их временного развития; 3) морфологии температурных зон на поверхности изделия.

Для обнаружения скрытых дефектов по их поверхностным температурным отпечаткам необходимо, чтобы 1) ТФХ дефектов отличались от ТФХ основного материала (или на поверхности раздела од-

нородных материалов имели место специфические граничные условия, например возникало контактное сопротивление), 2) дефекты создавали максимальное возмущение для тех тепловых потоков, которые ответственны за возникновение "полезных" температурных аномалий. Из последнего условия следует, что ТК эффективен при обнаружении газонаполненных дефектов большой площади, основная плоскость которых расположена перпендикулярно тепловому потоку, возбуждаемому нагревателем. К таким дефектам относятся 1) расслоения между связующими слоями и несплошности основного материала, 2) плоские трещины, 3) инородные включения, 4) участки аномальной влажности, 5) локальный унос материала (коррозия), 6) участки контакта двух материалов с повышенным тепловым сопротивлением, включая так называемые "целующиеся" (kissing) дефекты.

8.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Схему НК можно рассматривать согласно рис. 8.1. Входную информацию поставляет объект контроля, о состоянии (качестве) которого оператор или автоматическое устройство должны сделать заключение, используя тот или иной способ и аппаратуру НК. Выходная информация содержит четыре возможных результата диагностики или две пары заключений о том, содержит или нет объект контроля скрытые дефекты. Заключение может быть истинно-положительным (истина "дефект есть", заключение "дефект есть"), ложно-отрицательным (истина "дефект есть", заключение "дефекта нет"), истинно-отрицательным (истина "дефекта нет",

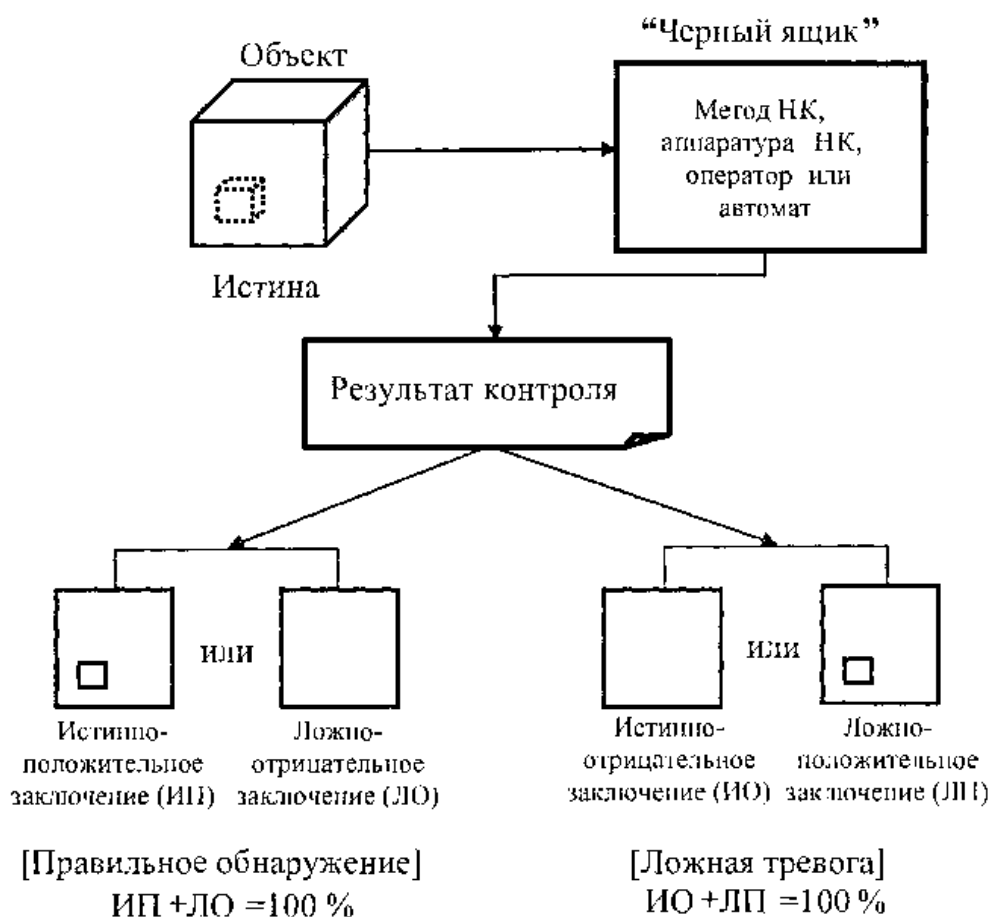


Рис. 8.1. Схема неразрушающего контроля

заключение "дефекта нет") и ложноположительным (истина "дефекта нет", заключение "дефект есть"). Выраженные в терминах вероятности, соответствующие пары заключений в сумме дают 100 % $ИП + ЛО = 100\%$ и $ИО + ЛП = 100\%$ (рис. 8.1). Истинно-положительное заключение характеризуется вероятностью правильного обнаружения (*correct detection*) P_{cd} , а ложно-положительное заключение – вероятностью ложной тревоги (*false alarm*) P_{fa} . Очевидно, что $P_{cd} + P_{fa} \neq 100\%$. Как будет показано ниже, в НК чаще всего применяют стратегию принятия решения Неймана–Пирсона, согласно которой фиксируют величину P_{fa} и оценивают P_{cd} .

Простейший случай принятия решения в одномерном пространстве информативных признаков изображен на рис. 8.2. Решение принимает оператор или автоматическое устройство на пиксельном уровне с использованием температуры в каче-

стве информативного параметра. Любая зона на поверхности объекта контроля характеризуется специфическим распределением амплитуд отдельных пикселей; таким образом, каждая зона может быть отнесена либо к классу "дефектных", либо "бездефектных" зон. Результатом классификации являются бинарные карты дефектов.

В статистике принятие решения сводят к проверке нулевой (H_0) и альтернативной (H_A) гипотез $H_0: \bar{T}_d = \bar{T}_{nd}$ и $H_A: \bar{T}_d \neq \bar{T}_{nd}$, где \bar{T}_d , \bar{T}_{nd} – средние температуры соответственно в дефектной и бездефектной областях. При этом используют различные статистические критерии, выбор которых зависит от характера распределения амплитуд сигнала и шума. Описание некоторых статистических критериев приведено в табл. 8.1.

Отношение сигнал/шум, определяемое как

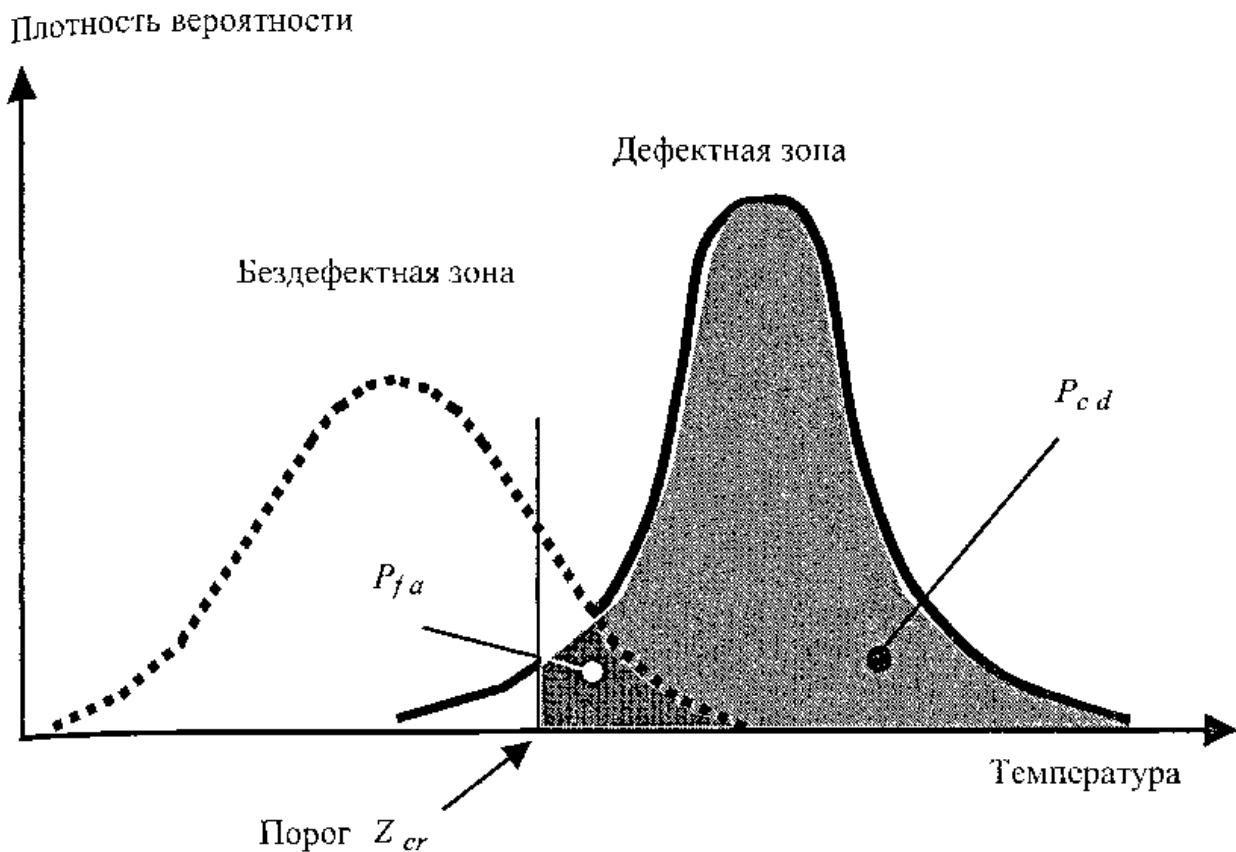


Рис. 8.2. Статистика принятия решений (одномерное пространство признаков)

$$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}, \quad (8.1)$$

где $F(z_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{cr}} e^{-x^2/2} dx$ – функция

служит общепринятым статистическим критерием при обнаружении дефектов (напоминаем, что σ_{nd} – стандартное отклонение информативного параметра в бездефектной области)

Если значения информативного параметра распределены по нормальному закону, часто используют *Z-критерий* [102]:

$$\hat{z} = \frac{|\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}|}{\sqrt{\frac{\sigma_d^2}{n_d} + \frac{\sigma_{nd}^2}{n_{nd}}}}, \quad (8.2)$$

где n_{nd} и n_d – количество пикселей в анализируемых зонах (бездефектной и дефектной) Определенное таким образом значение \hat{z} сравнивают с критическим значением z_{cr} , которое рассчитывают из уравнения

$$\alpha = P_{fa} = 1 - f(z_{cr}), \quad (8.3)$$

распределения, а α – вероятность того, что стандартная нормальная переменная величина z примет значения больше z_{cr} (α есть вероятность ложной тревоги P_{fa})

Две сравниваемые зоны (*популяции*) считаются статистически различными, если $\hat{z} \geq z_{cr}$. Описываемый подход не всегда оправдан при анализе пиксельных значений, поскольку из-за большого количества пикселей в изображениях *Z-тест* практически всегда подтверждает статистическое различие между зонами Поэтому *Z-критерий* рекомендуют для сравнения различных техник НК или алгоритмов обработки данных при прочих равных условиях, наиболее эффективная техника (алгоритм) обеспечивает наибольшее значение \hat{z}

8.1. Статистические критерии сравнения двух распределений

Критерий	Формула	Примечание
Отношение сигнал/шум (S)	$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}},$ <p>где σ_{nd} – стандартное отклонение в бездефектной области</p>	<p>Значения $S > 1$ означают наличие статистических различий между двумя распределениями</p> <p>Критерий применим к нормальным распределениям</p>
Z-критерий	$\hat{z} = \frac{ \bar{T}_d - \bar{T}_{nd} }{\sqrt{\frac{\sigma_d^2}{n_d} + \frac{\sigma_{nd}^2}{n_{nd}}}},$ <p>где n_{nd} и n_d – количество пикселей в сравниваемых областях, σ_d – стандартное отклонение в дефектной области</p>	<p>Значение Z-критерия сравнивают с критическим значением z_{cr}, полученным из уравнения $\alpha = P_{fa} = 1 - f(z_{cr})$, где</p> $F(z_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{cr}} e^{-x^2/2} dx$ <p>– функция распределения, α – вероятность того, что переменная z примет значения $\geq z_{cr}$ (вероятность ложной тревоги $\alpha = P_{fa}$)</p> <p>Критерий применим к нормальным распределениям</p>
D-критерий (тест Колмогорова–Смирнова)	$\hat{D} = \max \left(\left \frac{F_d}{n_d} - \frac{F_{nd}}{n_{nd}} \right \right),$ <p>где F_d и F_{nd} – эмпирические кумулятивные частоты</p>	<p>Максимальное значение D-критерия сравнивают с критическим значением D_{cr}, которое при $n_d + n_{nd} > 35$ определяют по формуле [102]</p> $D_{cr} = K_\alpha \sqrt{\frac{n_d + n_{nd}}{n_d n_{nd}}},$ <p>где K_α – константа, зависящая от уровня значимости α (табулирована в [102]); например, $K_\alpha = 0,136$, если $\alpha = 0,05$</p> <p>D-критерий применим к любым распределениям</p>
Вероятность ложной тревоги P_{fa}	<p>Величина P_{fa} численно определена как площадь под кривой "бездефектного" распределения справа от выбранного порога z_c (рис 8 2)</p>	<p>Решение о статистическом различии двух областей принимают с Риском I (уровнем значимости) α, равном P_{fa}</p>
Вероятность правильного обнаружения P_{cd}	<p>Величина P_{cd} численно определена как площадь под кривой "дефектного" распределения справа от выбранного порога z_c (рис 8 2)</p>	<p>Риск II принять ложную нулевую гипотезу Он равен $\beta = 1 - P_{cd}$</p>

Для сравнения распределений, не подчиняющихся нормальному закону, используют другие статистические критерии, например, *D*-критерий Колмогорова-Смирнова (см табл 8 1)

Статистические распределения, показанные на рис 8 2, служат простой графической иллюстрацией введенной выше вероятности ложной тревоги P_{fa} и вероятности правильного обнаружения P_{cd} , которые могут быть определены после того, как выбран порог принятия решения z_c . Величина P_{fa} численно равна площади под кривой "бездефектного" распределения справа от порога z_c . Это означает, что Риск I α принятия решения равен P_{fa} . Соответственно, величина P_{cd} численно равна площади под кривой "дефектного" распределения также справа от порога z_c . Риск II β принятия решения связан с принятием ложной нулевой гипотезы и равен $\beta = 1 - P_{cd}$

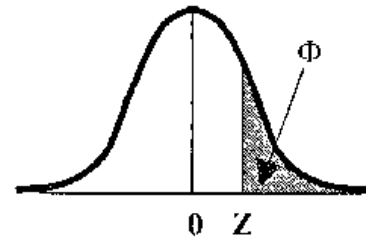
При нормальном распределении признаков дефектности в теории статистических решений известны следующие соотношения

$$P_{cd} = 1 - \Phi \left(Z = \frac{\bar{U}_d - U_{thr}}{\sigma_{nd}} \right),$$

$$P_{fa} = \Phi \left(Z = \frac{U_{thr} - \bar{U}_{nd}}{\sigma_{nd}} \right),$$
(8 4)

где $\Phi(Z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_Z^{\infty} e^{-x^2/2} dx$ - табулированный интеграл вероятности Лапласа, \bar{U}_d, \bar{U}_{nd} - средние значения сигнала (информативного параметра) соответственно в дефектной и бездефектной области, U_{thr} - порог принятия решения. Некоторые значения интеграла вероятности приведены в табл 8 2. Например, для получения $P_{fa} = 5\%$ необходимо установить порог принятия решения, равным $\bar{U}_{nd} + 1,6\sigma_{nd}$

8.2. Значения интеграла вероятности для одностороннего Z-теста



Z	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Φ	0,500	0,460	0,421	0,382	0,345	0,309	0,274	0,242	0,212	0,184	0,159	0,067	0,023	0,006	0,001

В качестве информативного параметра можно использовать избыточную температуру поверхности T , абсолютный перепад температуры ΔT относительно условно-бездефектной точки или текущий контраст S^{grin} . Неокрашенные металлические поверхности часто создают ложные дефектные отметки, обусловленные наличием ржавчины, грязи, царапин и т.п. При этом статистические распределения информативных параметров в бездефектных зонах могут быть сходными с теми, что имеют место в дефектных зонах. Очевид-

но, что существенное совпадение распределений означает практическую невозможность обнаружения скрытых дефектов. Другим крайним случаем является полное разделение статистических распределений в дефектных и бездефектных зонах, что имеет место для больших дефектов и представляет слабый практический интерес. Во всех других случаях, принятие решения по выбранному порогу, как отмечалось выше, приводит к определенным значениям P_{cd} и P_{fa} , которые принимают значения от 0 до 1.

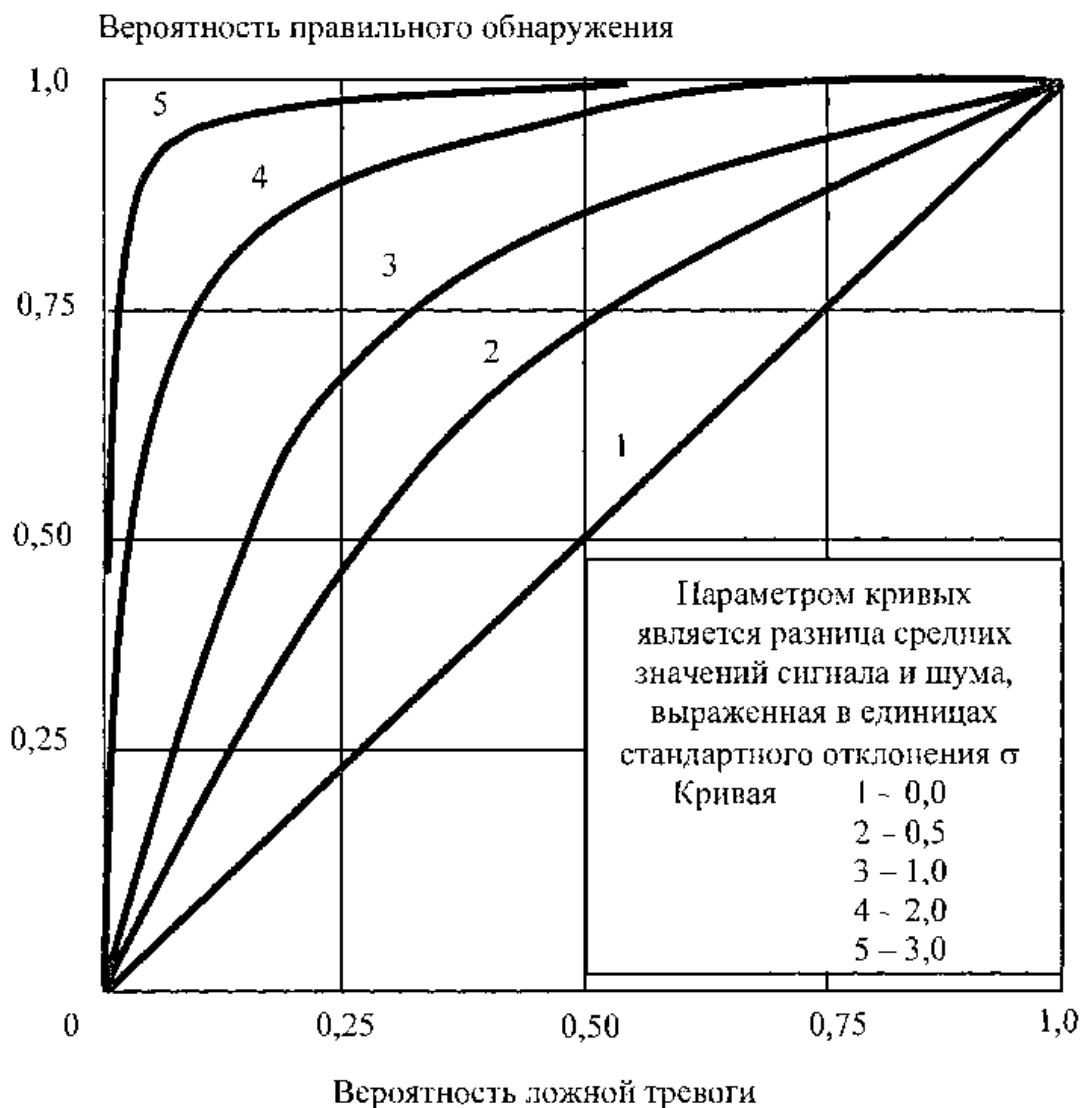


Рис. 8.3. Рабочая характеристика детектора (обнаружителя)

Связь между P_{cd} и P_{fa} можно выразить в виде *рабочей характеристики детектора (обнаружителя)*, параметром которой является степень сдвига "бездефектного" и "дефектного" распределения, выраженная в единицах стандартного отклонения. Пример рабочих характеристик дан на рис 8.3

При практическом сравнении методов НК часто используют зависимость P_{cd} от размеров дефектов (probability of detection — POD), усредненную по нескольким операторам, что позволяет учесть также человеческий фактор. Пример такого подхода приведен на рис 8.4, где зависимости вероятности правильного обнаружения от размеров дефектов приведены для УЗ-, ИК-термографического и голографиче-

ского контроля отслоений металлических сот из титанового сплава Inconel от обшивки толщиной 0,15 мм, выполненной из того же материала. Изделия такого вида использованы в тепловой защите нового космического челнока X-33, разрабатываемого в США [103] (см также главу 9). Статистические данные рис 8.4 были получены на 12 образцах, каждый из которых содержал 18 искусственных дефектов. Данные НК были усреднены по двум операторам. Видно, что УЗ-метод являлся наилучшим для очень малых дефектов (размером < 1,5 мм), однако тепловой метод оказался предпочтительным для дефектов большего размера. Результаты голографических испытаний были значительно хуже для всех типов дефектов.

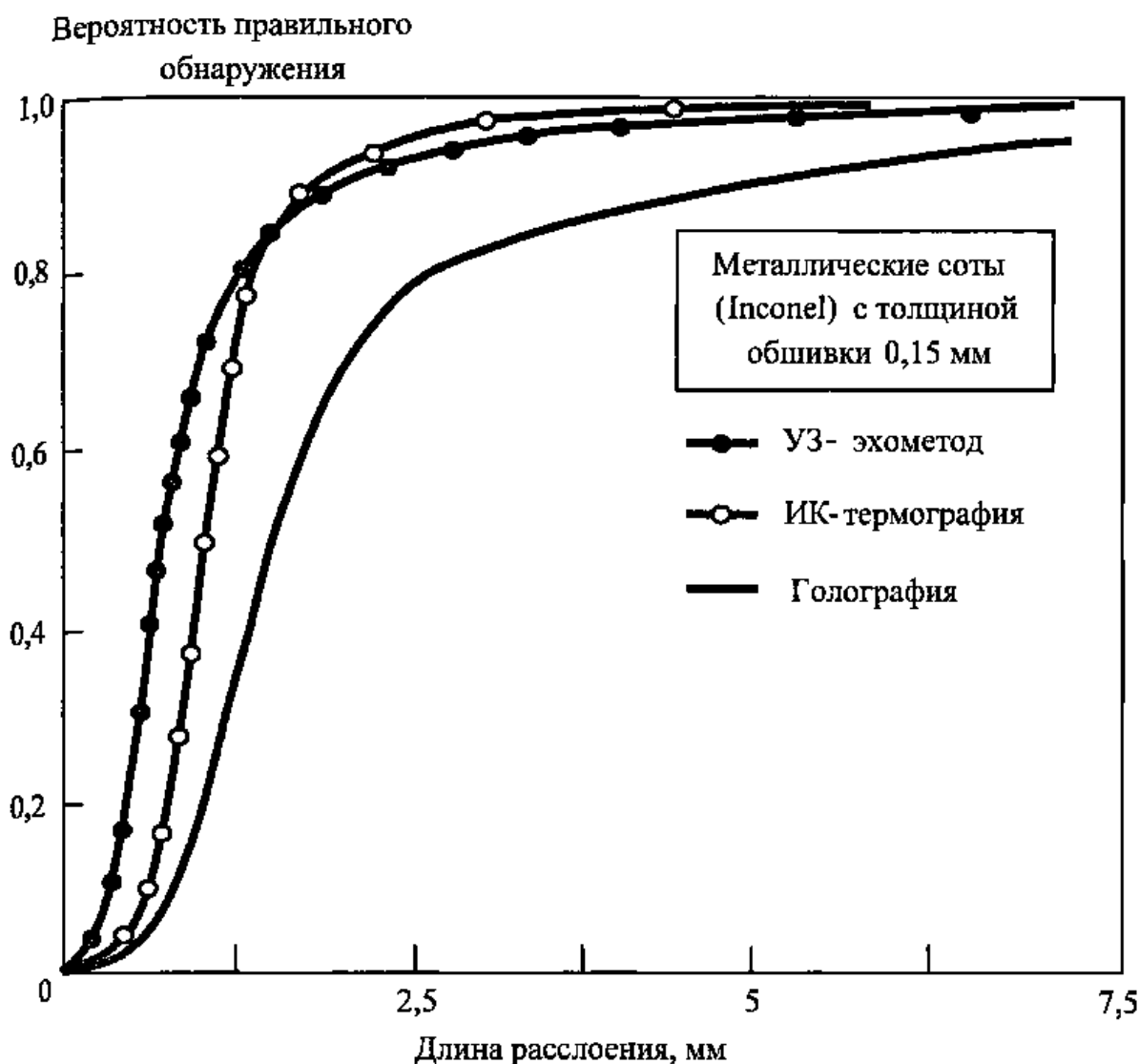


Рис. 8.4. Кривые вероятности правильного обнаружения для трех методов НК металлических сот (адаптировано из [103])

При анализе полутонковых термограмм В.А. Барановым (Томский НИИ ИН) был предложен простой критерий дефектности, известный в теории распознавания образов как критерий Танимото [10]

$$B = \frac{N_{rd} - N_{md}}{N_{rd} - N_{fd}}, \quad (8.5)$$

где N_{rd} , N_{md} , N_{fd} — количество истинных, пропущенных и ложных дефектных отметок (дефектов), выделенных оператором на изображении. Оценка достоверности НК по критерию Танимото зависит как от пропуска дефектов, так и от наличия ложных дефектов. Величина $B = 100\%$ возможна только, если $P_{cd} = 100\%$ и

$P_{fa} = 0$. Данный критерий целесообразно применять при сравнении различных методов НК и процедур обработки данных применительно к стандартным образцам.

В табл. 8.3 приведены статистические результаты применения критерия Танимото для оценки результатов ТК образца из углепластика с девятью искусственными дефектами в виде фторопластовых вставок размером 3×3 , 6×6 и 12×12 мм, расположенными на глубинах 0,25, 1,25 и 2,5 мм. Сделаны следующие выводы: 1) вопреки распространенному мнению количество ложных дефектных отметок было невелико (это можно объяснить регулярным расположением дефектов), 2) разнообразные формы графического

8.3. Значения критерия Танимото при ТК дефектов в углепластике (данные усреднены по 11 операторам)

Описание изображения	$B, \%$	$\sigma_B, \%$
Исходная ИК-термограмма	8,9	3,41
Исходная ИК-термограмма после выравнивания гистограммы (цветное)	52,2	1,6
Исходная ИК-термограмма после выравнивания гистограммы (черно-белое)	57,8	1,4
Исходная ИК-термограмма после выравнивания гистограммы (ксерокопия)	44,4	0
После нормализации на максимум нагрева	63,3	3,2
Таймограмма	65,6	1,1

представления данных (цветные, черно-белые изображения и их ксерокопии) не оказали существенного влияния на достоверность обнаружения дефектов, 3) самые высокие значения B соответствовали таймограмме и ее производным

8.3. КАРТА ДЕФЕКТОВ

Карта дефектов представляет собой бинарное изображение (binary, hit-miss), в котором единичный пиксель приписывают дефектным зонам, а нулевой – бездефектным. Карты дефектов, построенные для конкретной области на поверхности объекта контроля, характеризуются статистическими показателями P_{fa} и P_{cd} , которые возникают после введения порога бинаризации (порога принятия решения). В НК чаще всего используют критерий принятия решения Неймана–Пирсона, согласно которому задают требуемое значение P_{fa} , что эквивалентно заданию порога принятия решения z_{α} , после чего определяют P_{cd} . Простейший алгоритм построения карты дефектов можно выразить следующим условием

$$T(i, j) = 1, \text{ если } T(i, j) \geq T_{thr}, \\ \text{иначе} \quad T(i, j) = 0, \quad (8.6)$$

где $T(i, j)$ – используемый информативный параметр, T_{thr} – порог принятия решения. Построенная таким способом карта дефектов, согласно стратегии Неймана–Пирсона, характеризуется определенными значениями P_{fa} и P_{cd} .

Простая иллюстрация статистической обработки данных в медицинской ИК-термографии приведена на рис. 8.5 (см. цветную вкладку) (фирма "Инновация", Россия). Оператор выделяет на термограмме две области, покрывающие интересующие его зоны (на рис. 8.5, а, б для наглядности показаны прямоугольные зоны), после чего оценивают степень статистического совпадения зон. Например, у здорового пациента (рис. 8.5, а) отношение сигнал/шум $S = 0,064$, что говорит об идентичности температурных распределений в зонах. Рак левой молочной железы III степени (рис. 8.5, б), сопровождающийся некрозом тканей и резким понижением температуры, приводит к значению $S = 3,45$, что свидетельствует о резком различии температурных распределений. Карта дефекта на рис. 8.5, в отчетливо показывает пораженный орган.

Пример карт дефектов, полученных при ТК образца из углепластика (см.

табл 8 3), показаны на рис 8 6 на цветной вкладке. На исходном ИК-изображении выделим три дефекта прямоугольной формы, а также маркерную надпись на поверхности образца, выполненную белой краской (рис 8 6, а). Сравнение *a priori* известных дефектных зон с фоном показало, что отношение сигнал/шум для всех дефектов равно $S = 5,5$ (рис 8 6, б). Размещая между двумя распределениями порог принятия решения, можно определить вероятности P_{fa} и P_{cd} . Снижение уровня ложной тревоги, достигаемое перемещением порога вправо (рис 8 6, б), позволяет устранить температурный отпечаток маркера, но одновременно уменьшает размеры дефектных зон (сравнить карты дефектов на рис 8 6, в и 8 6, г. $P_{cd} = 100\%$, $P_{fa} = 10\%$ и $P_{fd} = 5\%$ соответственно).

8.4. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ В ТК

В простейшем случае решение о качестве принимают по одному информативному параметру, например по температуре. Пример обнаружения зон коррозии в образце из стали показан на рис 8 7, а. Интерес представляет случай, когда гистограммы температуры в дефектной и бездефектной областях частично перекрывают друг друга, что снижает надежность принятого решения. Улучшить статистические параметры обнаружения можно, введя в рассмотрение второй информативный параметр, например, момент оптимального наблюдения $t_m(\Delta T_m)$. Очевидно, что в общем случае дефектная и бездефектная области могут перекрываться по одному параметру, но быть существенно разделенными по другому параметру. Так, например, более глубокие дефекты характеризуются малыми сигналами ΔT_m и длительными временами t_m , тогда как для поверхностных аномалий соотношение этих двух параметров является хаотическим. Графическая иллюстрация принятия решения в пространстве двух признаков представлена на рис 8 7, б. В этом случае

границей разделения областей служит кривая в плоскости, параметры которой следует определить, исходя из требуемых показателей P_{cd} и P_{fa} . Еще одним информативным параметром может служить характерный геометрический размер анализируемой температурной аномалии h (см рис 8 7, а), что позволяет, например, улучшить разделение сигналов, обусловленных царапинами и внутренними дефектами большой площади.

В общем случае, любая область на поверхности изделия (как дефектная, так и бездефектная) может характеризоваться в процессе НК N параметрами, тогда решение о степени различия соответствующих статистических распределений будет приниматься в N -мерном пространстве информативных признаков. Таким образом, оптимальное обнаружение дефектов представляет собой стандартную задачу *распознавания образов* в многомерном пространстве признаков, которая сводится к определению параметров гиперплоскости, разделяющей дефектную и бездефектную области.

Важным условием повышения эффективности принятия решения путем введения дополнительных информативных параметров является слабая корреляция этих параметров между собой. Например, дефектная и бездефектная зоны на рис 8 7, б обладают сходными распределениями пиксельных амплитуд, но сильно различаются по параметру t_m . Анализ степени корреляции различных информативных признаков в ТК не исследован.

Скрытые дефекты можно обнаруживать *эвристически* или с помощью *автоматического устройства*. В первом случае решение принимает оператор на основании алгоритмов, которые до конца не изучены, хотя очевидно, что они основаны на анализе многомерного пространства признаков. Связь детерминированной техники получения ИК-термограмм и особенностей их зрительного восприятия была проанализирована Д. Ллойдом [100]. Ав-

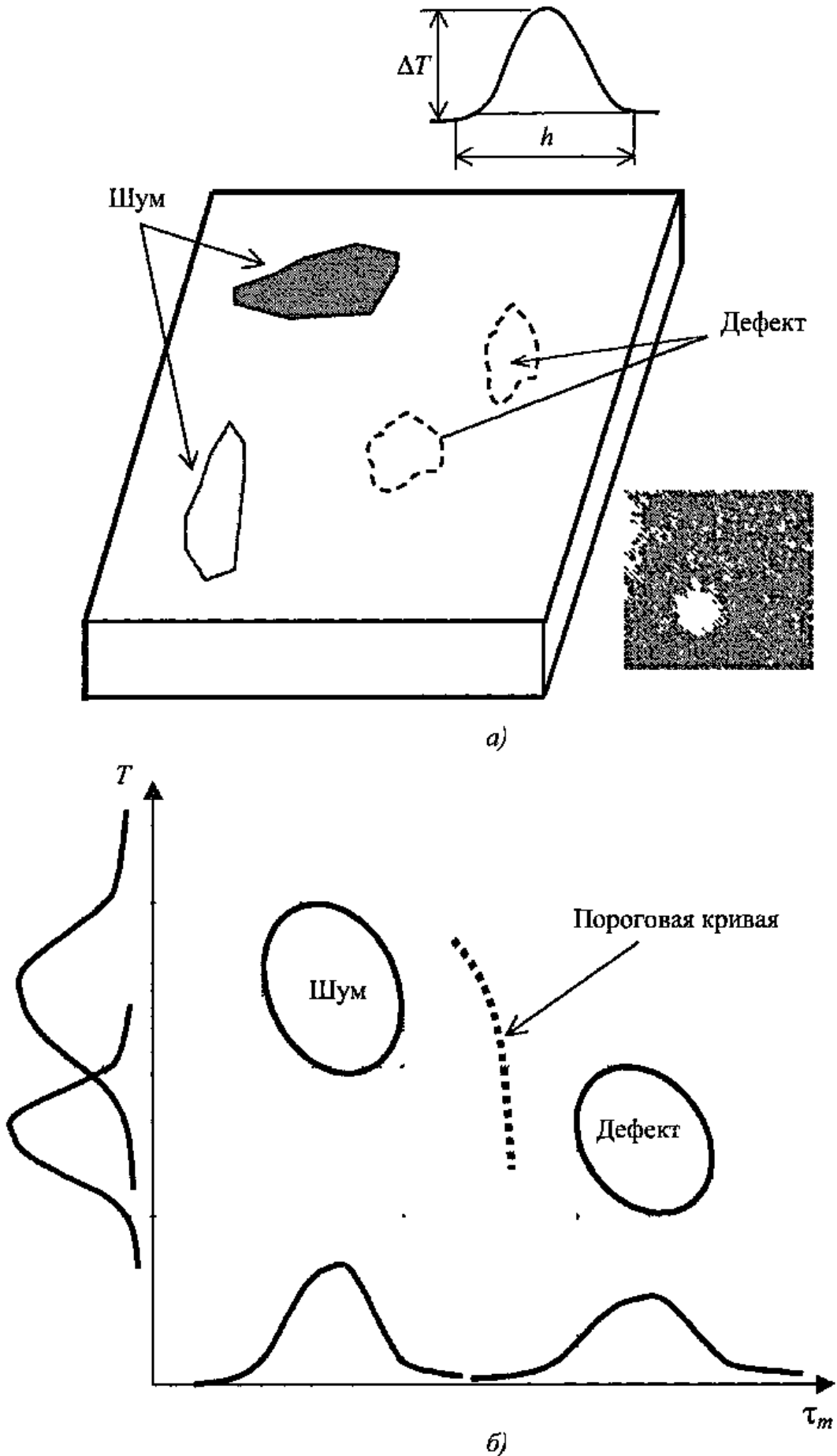


Рис. 8.7. Распознавание образов в ТК:

а – обнаружение скрытой коррозии, б – двумерное пространство информативных признаков

томатическое распознавание образов на практике часто сводится к простым пороговым устройствам, также разрабатываются сложные компьютерные алгоритмы распознавания образов. В частности, в последние годы в НК эффективно используют *нейронные сети*, которые обучают подобно операторам (см п 5 15)

8.5. ШУМЫ В ТК

Высокий уровень тепловых помех является своего рода платой за универсальность ТК. Удовлетворительные результаты лабораторных исследований, полученные на стандартных образцах, не всегда удается реализовать при испытаниях реальных изделий. Шумы и помехи возникают в самом объекте контроля, в окружающей среде и в регистрирующей аппаратуре. Шумы могут складываться с истинным температурным сигналом T (*аддитивный шум \tilde{A}*) или перемножаться с ним (*мультипликативный шум \tilde{M}*)

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M}T(x, y, \tau) + \tilde{A} \quad (8.7)$$

Очевидно, что регистрируемый сигнал $u \equiv T$ только, если $\tilde{M} \equiv 1$ и $\tilde{A} \equiv 0$

Наилучшей процедурой испытаний является такая, в которой чувствительность метода ограничена детектором излучения, т.е. $\tilde{M} \equiv 1$ и $\tilde{A} \rightarrow \min$. Предельной величиной регистрируемого сигнала является паспортное температурное разрешение тепловизора ΔT_{res} , достигающее в современных моделях $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейшее улучшение температурного разрешения возможно, используя метод накопления. Тем не менее, в естественных условиях конвекция воздуха и посторонние излучатели создают шум приблизительно на уровне $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, что и можно считать "температурным пределом чувствительности ТК" в реальных условиях.

Каждый тип шума можно описать в терминах температуры. Различают *структурный* $\sqrt{\Delta \bar{T}_{str}^2}$, *аппаратурный*

$\sqrt{\Delta \bar{T}_{opp}^2} = \Delta T_{res}$ и *внешний* $\sqrt{\Delta \bar{T}_{ext}^2}$ шум. С использованием этих терминов, для некоррелированных шумов, отношение сигнал/шум можно определить как

$$S = \frac{\Delta T(\tau)}{\sqrt{(\Delta \bar{T}_{res})^2 + (\Delta \bar{T}_{str})^2 + (\Delta \bar{T}_{ext})^2}} \quad (8.8)$$

При использовании временных параметров эквивалентный временной шум можно оценить по выражению

$$\Delta T = \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} \Delta \tau \quad (8.9)$$

Шум окружающей среды создается тепловым потоком окружающих предметов, либо отраженным от объекта контроля, либо непосредственно попадающим во входной зрачок тепловизора. Источниками этого шума являются нагреватели, Солнце, калориферы, лампы электрического освещения и т.п. Прямое излучение устраняют, используя блинды, экраны, фильтры и т.п. Труднее устраняется излучение, отраженное от объекта контроля. В активном ТК основным источником внешнего шума является 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.

На рис. 8.8 показаны временные профили излучения нагрева импульсной лампы Bowens энергией 2,4 кДж. Профиль $\gamma(\tau)$ на рис. 8.8, а, зарегистрированный с помощью длинноволновой камеры ThermaCam SC 3000, показывает, что значительная энергия поступает к изделию в течение первой секунды, при этом полное

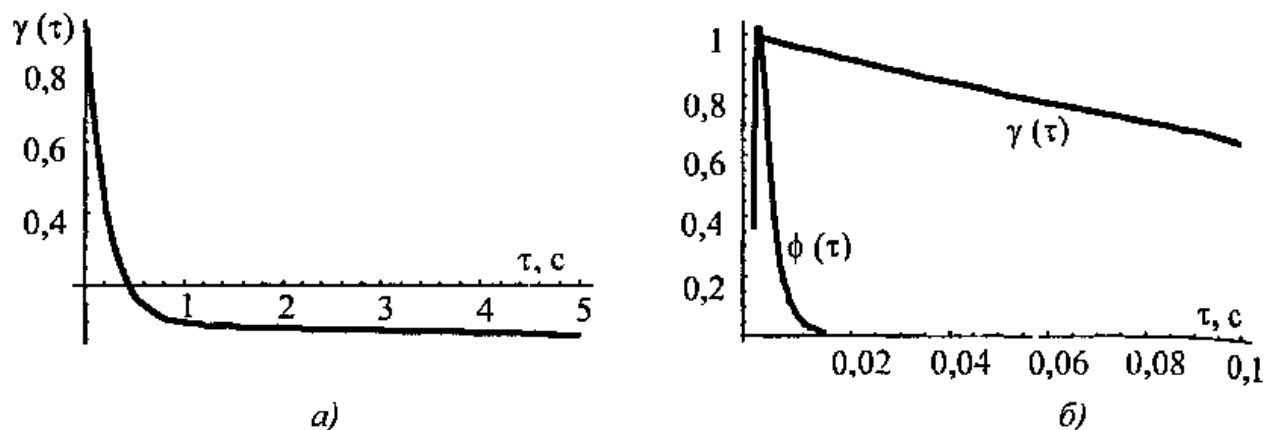


Рис. 8.8. Временные профили импульсной лампы Bowens:

a – $\gamma(\tau)$ – профиль нагрева, зарегистрированный длинноволновым тепловизором GammaCam Sc300;
b – $\phi(\tau)$ – профиль энергии нагрева во всем спектральном диапазоне (зарегистрирован "всеволновым" пирозлектрическим приемником)

излучение вспышки $\phi(\tau)$, сосредоточенное, в основном, в видимой части спектра находится в интервале времен до 10 мс (рис 8.8, б), что и является паспортной характеристикой лампы. Остаточное излучение обусловлено нагревом стекла лампы, и его отраженная от изделия компонента может существенно исказить результаты идентификации дефектных параметров по температуре. Для функций нагрева найдены следующие аппроксимации (в относительных единицах)

$$\gamma(\tau) = 0,8933e^{-4,761\tau} + 0,09082e^{-0,08477\tau}, \quad (8.10)$$

$$\phi(\tau) = \frac{-0,00174\tau^2 + 3,52 \cdot 10^{-5}\tau + 4,39 \cdot 10^{-9}}{\tau^4 + 0,00272\tau^3 + 2,40 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 6,02 \cdot 10^{-8}\tau + 7,08 \cdot 10^{-11}}, \quad (8.11)$$

где время τ выражено в с

В пассивной диагностике внешние источники теплового излучения могут создавать ложные сигналы, которые оператор может трактовать как дефектные отметки. Внешнее излучение отражается не только металлическими, но и гладкими неметаллическими поверхностями, например, в строительной диагностике при неправильном выборе угла визирования окон оператор может наблюдать свое собственное тепловое отражение в стекле окна. В табл. 8.4 приведена относительная методическая погрешность температурных измерений с помощью тепловизора при наличии внешних помех.

При ИК-съемке вне помещений источниками шумового излучения являются Солнце, небо и подстилающая (земная) поверхность. Солнечное излучение достигает земной поверхности в диапазоне 0,3–3 мкм, обеспечивая в безоблачный день плотность энергии $I = 1,3 \text{ кВт/м}^2$.

8.4. Относительная методическая погрешность тепловизионных измерений температуры при наличии внешней засветки [104]

Расстояние между объектом контроля и источником засветки	Ошибка измерения, обусловленная излучением, %	
	человека	электрической лампы
1	6,7	3,1
2	1,9	0,8
3	0,8	0,3
4	0,4	0,2

В ряде задач ТК это излучение можно использовать для нагрева объектов, хотя в других случаях такой дополнительный нагрев может лишь маскировать искомые температурные сигналы, например, при тепловизионной диагностике дымовых труб (см главу 9). Атмосфера рассеивает солнечное излучение и излучает в полосах поглощения водяных паров, двуокиси углерода, озона и других компонент. При съемке безоблачного неба тепловизор показывает относительно низкие температуры (до -20°C в зависимости от угла визирования). Облака излучают как АЧТ с температурой, равной температуре окружающей среды. Излучение элементов земного ландшафта состоит из отраженного солнечного излучения и собственного излучения подстилающей поверхности, которая может рассматриваться как серое тело.

Статистические характеристики излучения фонов хорошо изучены в аспекте военной ИК-съемки.

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. Объемные неоднородности, как правило, не столь важны, тем более, что в их качестве могут выступать сами искомые дефекты. 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. Амплитуду шума можно выражать в температуре, однако более предпочтительны относительные единицы, которые в меньшей степени зависят от мощности нагрева.

Типовой феноменологический подход к оценке шумов состоит в оценке стандартного отклонения динамического температурного сигнала в бездефектных зонах $\sigma_n(\tau)$, $^{\circ}\text{C}$, и безразмерного текущего

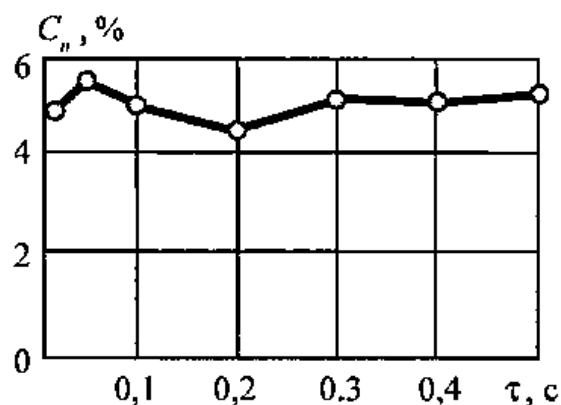


Рис. 8.9. Изменение текущего контраста шума во времени на поверхности керамического теплозащитного покрытия (импульсный ТК; нагрев в течение 10 мс)

контраста шума C_n^{rnm} . 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 неисключенных аддитивных шумов, имеет место определенная зависимость контраста шума от времени при нагреве/охлаждении изделия. Тем не менее, во многих случаях относительный шум поверхности можно считать постоянным во времени и выражать его в терминах усредненного по времени и по определенной зоне шумового контраста $C_n^{rnm} = \sigma_n(\tau)/T(\tau)$. На рис. 8.9 показано поведение контраста шума керамического теплозащитного покрытия турбинных лопаток в процессе импульсного ТК. В среднем шум покрытия характеризуется величиной $C_n^{rnm} \sim 0,05$ (5 %).

Таким образом, тепловой метод в состоянии уверенно обнаруживать такие дефекты теплозащитных покрытий, которые создают текущий температурный контраст в месте дефекта более 5 %.

Оценки шумовых контрастов для некоторых материалов приведены в табл. 8.5. Следует заметить, что, как и в случае коэффициента излучения, величина C_n^{rnm} зависит от материала, состояния его поверхности, а также от размера пространственной области, в пределах кото-

8.5. Текущие шумовые контрасты (на уровне одного σ_n) для различных материалов (процедура активного ТК; нагреватель с открытой спиралью; детектор на основе антимолибдита индия; размер пятна сканирования 0,8 мм) [105]

Материал и состояние поверхности	$\sigma_n, \%$
Сталь нержавеющая	7,2
Сталь с участками коррозии	17,1
Сталь с участками коррозии (пятно сканирования увеличено до 2,5 мм)	11,1
Медь окисленная	2,5
Медь, покрытая черным лаком	5,1
Медь, покрытая масляной краской красного цвета	4,4
Медь, покрытая черной сажей	2,8
Медь, покрытая черной сажей (с царапинами)	14,0
Алюминий	7,2
Текстолит	1,1
Стеклопластик	1,5
Углепластик *	6,4
Углепластик (обработка ФНЧ 3 × 3)*	5,2
Углепластик (обработка ФВЧ 3 × 3)*	13,6

* Данные получены с помощью тепловизора Inframetrics 640

рой усредняют шум. Очевидно, что наибольшей дисперсией обладает пиксельная функция $T(i, j, \tau)$, однако на практике всегда производят усреднение в некоторой области. Стоит заметить, что аналогия с коэффициентом излучения ϵ является принципиальной, поскольку именно флуктуации ϵ и коэффициента поглощения $\alpha \approx \epsilon$ вносят основной вклад в шум.

По данным табл. 8.5: 1) наименьший шум создают диэлектрические материалы и сажевые покрытия, 2) наибольший шум возникает в участках коррозии металлов, 3) металлы в состоянии поставки, например медь, могут иметь низкий уровень

поверхностных шумов (однако они создают сильную помеху за счет отраженного излучения, 4) низкочастотная фильтрация незначительно снижает шум, а высокочастотная фильтрация существенно его увеличивает.

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 ТК. Иллюстрация этому положению приведена на

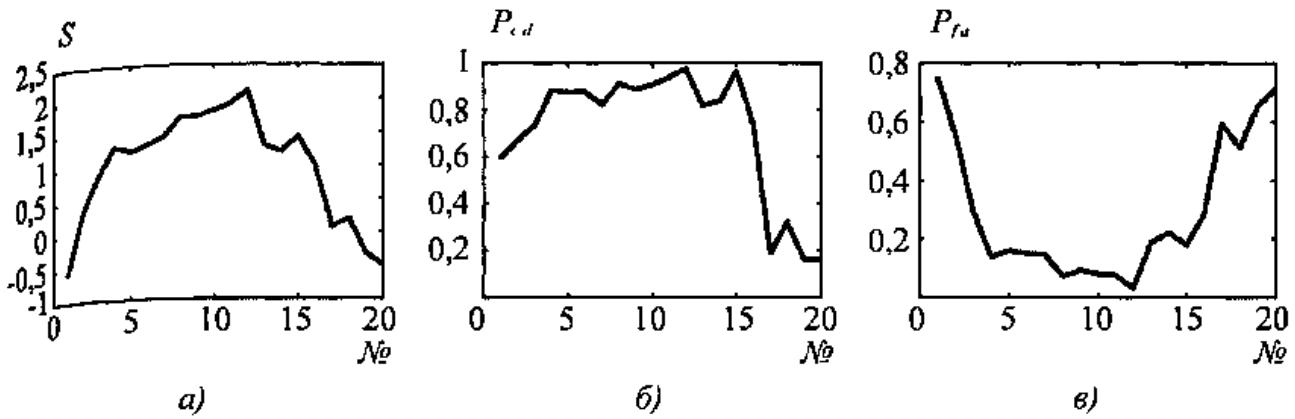


Рис. 8.10. Выбор оптимального момента ТК дефектов в углепластике:
a – отношение сигнал/шум, *б* – вероятность правильного обнаружения, *в* – вероятность ложной тревоги

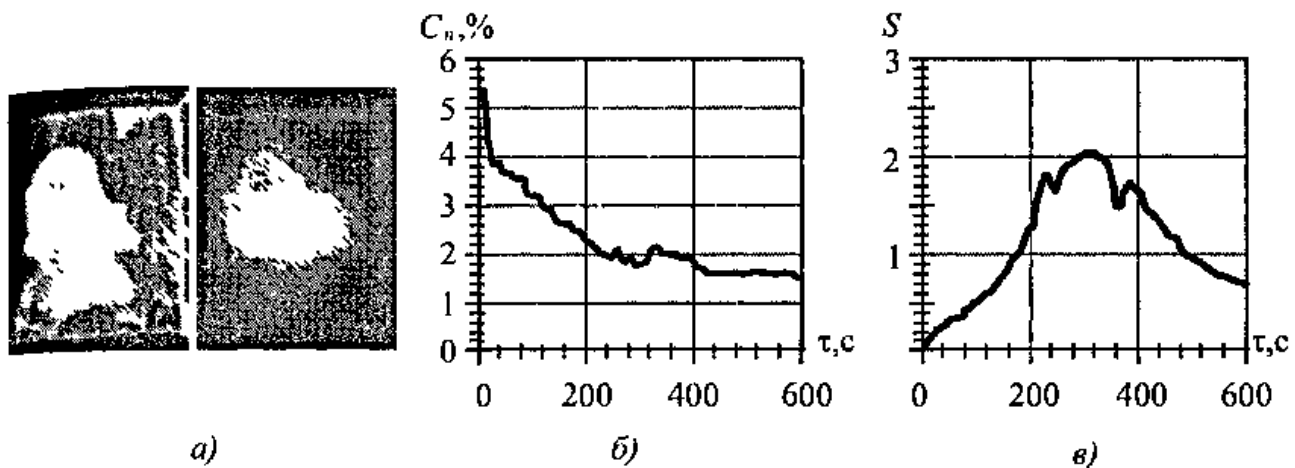


Рис. 8.11. Тепловой неразрушающий контроль нагретых фресок:
a – термограмма в конце нагрева (слева) и в оптимальный момент наблюдения воздушного дефекта (справа), *б* – текущий шумовой контраст, *в* – отношение сигнал/шум

рис. 8 10 (ТК расслоения размером 6 мм в углепластике на глубине 1,25 мм) По оси абсцисс отложены номера изображений в последовательности, поэтому графики рис. 8 10 позволяют выбрать изображение с наилучшей "видностью" дефектов (№ 12)

Другой пример временного поведения вышеуказанных параметров изображен на рис 8 11 (обнаружение воздушного расслоения под фреской, см также главу 9) [106] Непосредственно после равномерного нагрева фрески в течение 120 с с помощью 4-х электрических ламп вид

термограммы существенно определяется самой фреской, неоднородное "окрашивание" которой приводит к резко неоднородному поглощению оптического излучения (левая термограмма на рис 8 11, *a*), при этом шумовой контраст максимален. Затем, вследствие диффузии тепла, шумовой контраст непрерывно уменьшается во времени (рис 8 11, *б*) Максимальное значение отношения сигнал/шум имеет место при 300 с (рис 8 11, *в*), хотя максимальное значение сигнала ΔT было отмечено уже при 180 с

Глава 9

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ

Как отмечалось выше, области применения тепловых методов (ИК-термографии) подразделяют на *техническую диагностику* объектов со стационарным или квазистационарным тепловым полем и на активный *неразрушающий контроль* материалов и изделий. Первая область является наиболее развитой и обеспеченной нормативной документацией, в то время как собственно ТК материалов, за редкими исключениями, остается фрагментарным методом, доверие к которому среди специалистов по НК относительно невелико.

По-видимому, единственной областью, где можно говорить о широком практическом применении собственно ТК, является аэрокосмическая техника, в которой разнообразие задач НК не позволяет ограничиться одним или несколькими методами. В то же время и в некоторых традиционных областях тепловизионной технической диагностики можно использовать приемы активного ТК, например, при обследовании настенных фресок, анализе состояния штукатурки на фасадах зданий и т.п. Ниже приведены основные области применения ТК вне зависимости от степени стационарности исследуемых тепловых полей.

Прейскурант на различные виды тепловизионных обследований в свое время был разработан Минэнерго СССР. С учетом изменения масштаба цен стоимость обследования в настоящее время состав-

ляет от 300 до 3000 долларов США на объекты типа электрической подстанции, жилого дома, дымовой трубы, участка теплотрассы и т.п. Тепловизионная техническая диагностика признана Минэнерго РФ и РАО "ЕЭС России" в качестве платного средства испытаний электроустановок. Расширяется применение тепловидения при обследованиях дымовых труб, котлов и печей и т.п. Тепловидение рассматривается органами Госархнадзора, Госэнергонадзора и администрациями ряда городов в качестве важного инструмента диагностики качества строительства и энергосбережения.

Работы по оценке рабочего ресурса потенциально опасных промышленных объектов, проводимые Госгортехнадзором, также могут включать оперативную и бесконтактную тепловизионную съемку; в частности, это относится к дымовым трубам, строительным сооружениям, химическим реакторам и др. объектам. Тем не менее, систематические исследования экономической эффективности применения тепловидения в России не проводились, поэтому ниже приведены лишь отрывочные сведения, главным образом, из зарубежного опыта.

В табл. 9.1 перечислены основные направления тепловизионной технической диагностики и приведены сведения о ее экономической эффективности.

9.1. Эффективность ИК диагностики оборудования (включая материалы фирмы FLIR Systems)

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
<i>Электрическое оборудование</i>		
Распределительные щиты и приборы, конденсаторы, заземление, рубильники, проводники, места соединений, разъединители	Неплотные (проржавевшие) соединения, неработающий конденсатор, отслужившее заземление, плохие контакты рубильника, перегрев, перегрузка, повреждение проводников в электрических цепях	Перегрев, искрение или образование электрической дуги, скрытое горение или открытый огонь, при повреждениях проводников в электрической цепи возможен ее полный разрыв. Неработающий конденсатор приводит к неадекватности от перепадов напряжения, что может привести к раннему выходу оборудования из строя. Замена и ремонт 1 - 100 тыс долларов США. Соображения безопасности.
Различные электроприборы, переключатели, рубильники, щиты и пульты управления	Неплотные (проржавевшие) соединения, плохие контакты, несбалансированная нагрузка, перегрузки и перегревы	Искрение или образование электрической дуги, скрытое горение или открытый огонь. 25 % всех отказов и сбоев электрооборудования происходит из-за неплотных соединений. Стоимость ремонта главной панели переключения или главного пульта управления 10 - 70 тыс долларов США, замены 80 - 100 тыс долларов США. Соображения безопасности.
Трансформаторы (преобразователи)	Неплотные или расшатавшиеся соединения, плохие контакты, перегретые шины, дисбаланс трехфазной нагрузки, блокирование трубок охлаждения, уровень жидкости	Дуга, короткие замыкания, пожар. Перемотка трансформатора 5000 КВт 10 - 50 тыс долларов США. Замена 80 - 140 тыс долларов США.

Продолжение табл. 9.1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Электродвигатели и генераторы	Перегрев подшипников, дисбаланс нагрузки, короткозамкнутые или разорванные витки, перегрев щеток, колец и коллекторов, общая перегрузка и перегрев, блокирование вентиляционных каналов	Некондиционные подшипники вызывают повреждения механизмов или обмоток. Вышедшие из строя щетки приводят к поломке токосъемных колец или коллекторов, в результате чего повреждается обмотка. Перемотка двигателя (5000 л.с.): 50 - 100 тыс. долларов США. Замена 100 - 200 тыс. долларов США. Соображения безопасности
Аварийные резервные генераторы электроэнергии, батареи, контакты, контакторы, автоматические аварийные переключатели	Неверная полярность батарей, выход из строя батарей, испорченные или неработающие контакторы или аварийные переключатели	Потеря резервных систем электроснабжения для ключевых отраслей и предприятий больницы, телефонная связь, компьютеры и т.п.

Бойлеры и паровые системы

Бойлеры и печи	Разрушение теплоизоляции и футеровки, накипь в литых секциях, утечки горячего газа, блокирование трубчатых печей, гарь в трубах, протечки в предохранительных клапанах	Повышенные теплопотери и механическое разрушение. Замена секций 1,2 - 5 тыс. долларов США. Замена бойлера 8 - 30 тыс. долларов США. Перегрев и выход из строя печей, что требует замены труб или бойлера. Соображения безопасности
Паровые системы	Протечки в клапанах и фланцах, плохая теплоизоляция, утечки из подземных коммуникаций, блокирование "обраток"	Потери пара и энергии. Стоимость утечек пара 10 - 30 тыс. долларов США в год. Повреждение оборудования в результате утечек. Ремонт от 100 долларов США до 50 тыс. долларов США.

Продолжение табл 9 1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Пароотводчики, клапана, редукторы	Неисправности в пароотводчиках, неверный размер пароприемников	Открытый пароотводчик, потери пара и энергии Стоимость утечек пара до 30 тыс долларов США в год Закрытый пароотводчик перенос воды, воздуха и несконденсированных газов к оборудованию Ремонт от 100 до 50 тыс долларов США
<i>Механическое оборудование</i>		
Двигатели внутреннего сгорания	Неисправности клапанов и систем впрыскивания, блокирование трубок радиатора и системы масляного охлаждения	Перегрев, разрушение клапанов, поршня, шпилек и цилиндра Повреждения приводных механизмов Ремонт 1 40 тыс долларов США
Системы охлаждения и нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха	Утечки воздуха, потери электроэнергии, засорение трубок теплообменников Утечки охладителя/горячей воды/пара, воздушные пробки	Неэффективное функционирование и потери энергии, выключение
Конвейеры, опорные подшипники	Перегретые подшипники или ролики, кривизна оси или ролика, неравномерное давление	Дефектные подшипники приводят к повреждению оборудования, неравномерное давление или кривизна выводит из строя подшипники/ролики, что может привести к повреждению конвейера Ремонт до 500 тыс долларов США
Насосы, компрессоры, вентиляторы, нагнетатели воздуха	Перегретые подшипники, повышенная температура компрессии и/или масла, разрушенные или дефектные клапана	Разрушение подшипников и внутренних деталей, возможное разрушение агрегата в целом
Турбины механического привода и малые турбинные генераторы	Повышенная температура смазывающего масла и подшипников, блокирование выпускных клапанов и пароотводчиков, неравномерный нагрев металла, протечки в прокладках цилиндров	Проникновение воды внутрь и разрушение подшипников и внутренних деталей, возможное разрушение агрегата в целом

Продолжение табл. 9.1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Обжиговые печи	Разрушение футеровки, перегрев подшипников и редукторов	Потери энергии, разрушение подшипников и редукторов Замена до 1 млн долларов США
Целлюлозно-бумажное производство	Колебания влажности, пересушивание, искривления прижимных роликов, сбой в работе парораспределительной камеры Поломка вакуумных камер, теплоотводов, вытяжных колпаков сушильных камер Дефектные прижимные ролики, нарушения процесса формирования целлюлозной массы, неправильное распределение пара	Несоблюдение параметров влажности приводит к напрасной трате энергии, низкому качеству продукции, снижению емкости производства, увеличению повреждений волокнистой массы из-за пересушивания
Печи, трубы топков, огнеупорный материал, теплоизоляция	Наброс факела на стенку топки, образование нагара на внутренних поверхностях труб, сбой в работе печей	Потери энергии, низкая производственная емкость, перегрев и коробление труб или их полный выход из строя, что может привести к взрыву, с последующей заменой трубы или полностью трубы с топкой Соображения безопасности
Оборудование, работающее в тяжелых режимах, подшипники, тормоза, гидравлика, ролики, привод, двигатели, моторы постоянного/переменного тока	Перегрев тормозов, покрышек, подшипников, роликов, привода, блокировки в гидравлике, кривизна привода и роликов	Отказ тормозов, поломки подшипников Расхождение в выравнивании зубчатого колеса многопоточной зубчатой передачи и шариковых подшипников. Ремонт до 2 млн долларов США. Соображения безопасности
<i>Здания и сооружения</i>		
Электричество	См <i>Электрическое оборудование</i>	

Продолжение табл 9 1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Ограждающие конструкции	Потери тепла, дефекты строительства, утечки воздуха, увлажненные участки, утепление окон, архитектурные решения	Потери энергии, плохие жилищные условия, структурные проблемы вследствие увлажненности, растрескивание и выпадение кирпичей, преждевременное старение анкера кирпичной кладки и возможное разрушение Ремонт до сотен тысяч долларов США
Железобетонные конструкции	Обнаружение арматуры и определение степени их износа, контроль систем обогрева стоянок автомобилей, обнаружение трубопроводов горячей или холодной воды, паропроводов, обнаружение утечек и излишних потерь тепла	Вовремя не обнаруженная коррозия арматуры и отслоение бетона приводят к появлению серьезных структурных проблем. Неработающее оборудование для растапливания снега на автомобильных стоянках может привести к несчастным случаям
Обогревательные системы и системы кондиционирования воздуха	См раздел Системы охлаждения и нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха	Потери энергии, плохие жилищные условия
Крыша	Протечки и места проникновения влаги на плоских крышах	Потери энергии, протечки в помещениях зданий вызывают дальнейшие дорогостоящие повреждения Ремонт от 1 до 10 тыс долларов США
Дымовые трубы тепловых станций и промпредприятий	Трещины ствола, обрушение футеровки, нарушение теплоизоляции	Преждевременный выход труб из строя Ремонт от 5 до 20 тыс долларов США
<i>Другие применения</i>		
Резервуары для хранения жидкостей и газов	Измерение уровня жидкости, плохая изоляция	При переполнении емкостей – пролив жидкостей, потери энергии, утечки газа в окружающую среду потенциально смертельно опасны

Продолжение табл. 9Г

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Сушильные цилиндры	Образование конденсата, высокая температура подшипников	Повреждения подшипников приводят к повреждениям опорных роликов, выпадению цилиндров и выводят из строя другие цилиндры Ремонт до 2 млн долларов США
Доменные печи, ковшовый отжиг, технологическая обработка нагретом	Износ огнеупорного материала, неэффективно работающие или вышедшие из строя нагреватели	Потери энергии, низкая производительность, брак, перегрев и коробление структуры
Летательные аппараты — фюзеляж, двигатели (турбореактивные, внутреннего сгорания), лопасти, тормоза, покрышки и другие составные части	Отслоения, пустоты, проникновение влаги в планер, лопасти и несущие плоскости, включая сотовые конструкции. Заблокированные вентиляционные отверстия в лопатках турбин двигателей, работоспособность противообледенительных систем, протечки в гидравлических системах фюзеляжа, проверка пористых структур планера на предмет наличия влаги и отслоения материала. Проверка систем обогрева и устранения обледенения фонаря кабины	Протечки в фюзеляже могут вызвать проблемы в гидравлических системах, проникновение влаги приводит к просачиванию топлива через изоляционный материал, что приводит к напрасной потере топлива в полете и особенно при взлете. Более высокое влагосодержание приводит к разрушению конструкций
Автомобилестроение	Неэффективная работа тормозов, перегретые подшипники, неоднородное сцепление шин с дорогой, системы обогрева стекол, узлы двигателей, радиатор	Экономические оценки отсутствуют. В случае гоночных автомобилей своевременное обнаружение дефектов способно предотвратить аварии

9.1. АДМИНИСТРАТИВНЫЕ, ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ

9.1.1. Общие сведения. Одним из основных путей экономии топлива является уменьшение теплопотерь и теплопотерь через ограждающие конструкции строительных сооружений, достигающих до 30 % общих энергопотерь

Тепловизионное обследование строительных сооружений, благодаря своей оперативности, наглядности и достоверности получаемых результатов, успело зарекомендовать себя в качестве одного из основных способов диагностики ограждающих конструкций по окончании строительства и в период эксплуатации [15, 104, 107–112] Первые систематические исследования в области строительной тепловизионной диагностики были выполнены по инициативе фирмы AGA (ныне фирма FLIR Systems) в Швеции и других скандинавских странах, где необходимость экономии энергии диктуется климатом Аналогичные работы были выполнены в Германии, Канаде и США, причем, например, в южных штатах США решалась обратная задача не допустить проникновение наружного тепла внутрь зданий.

С 1980 по 2000 гг в вышеуказанных странах выпущен ряд стандартов и методических документов по применению тепловидения в строительстве (см главу 10)

В СССР исследовательские организации строительного профиля (ВНИИ строительной физики, НИИ Мосстроя и др.) выполняли исследования по теплопередаче в строительных конструкциях и их тепловизионной диагностике Опыт этих исследований обобщен в монографии В.А Дроздова и В.И Сухарева [104], а также в ряде недавних публикаций [15, 110]. Тем не менее, в силу невысокой отпускной стоимости энергии и общей низкой культуры строительства, экономиче-

ская мотивация внедрения ИК-термографии в отечественное строительство в доперестроечные годы была низкой

Ситуация изменилась с переходом к рыночной экономике, что привело к удорожанию энергоносителей и обусловило повышенный интерес к экономии энергии Непосредственным толчком к интенсификации исследований по строительной теплотехнике явилось введение в 1998 г новой редакции строительных норм и правил (СНиП II-3-79* "Строительная теплотехника"), согласно которым теплозащита строительных сооружений должна быть усилена приблизительно в 3 раза Невозможность обеспечить нормируемые показатели теплозащиты с использованием традиционных строительных материалов обусловила разработку новых строительных материалов и конструкций, в связи с чем встал вопрос экспрессной инструментальной диагностики показателей теплозащиты

Администрации ряда городов, взаимодействуя с органами архитектурно-строительного надзора, все более активно интересуются тепловидением как инструментом решения задач, стоящих перед жилищно-коммунальным хозяйством реновации жилья, повышения качества строительства, оптимизации расходов на отопление и т.п. С 1998 г в г. Северске Томской области введена обязательная 100 %-я ИК-термографическая диагностика сдаваемых в эксплуатацию жилых зданий Пакет нормативных документов по энергосбережению в строительстве принят в г. Москве и Санкт-Петербурге

Согласно методике тепловизионной диагностики строительных сооружений, утвержденной Госстандартом РФ (МВИ № 1305/442 от 10.01.2001), понятие тепловизионной диагностики строительных сооружений включает

- определение частичных и общих теплопотерь,
- обнаружение скрытых дефектов строительства,

- определение (оценку) сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Отдельной областью возможного применения тепловизионной диагностики является прогнозирование возможных разрушений строительных сооружений путем обнаружения "тепловых предвестников" катастроф. Периодически случающиеся в России и за рубежом непредсказуемые разрушения зданий, в том числе и с человеческими жертвами, делают эту область применения социально значимой. Лабораторные исследования, выполненные М. Люонгом (Франция), показали, что при циклическом нагружении бетона температурные градиенты могут достигать нескольких градусов [84]. Пример феноменологического подхода к экспериментальному анализу катастрофы, произошедшей в 1997 г. в г. Томске, описан в п. 9.1.7. В целом, возможность тепловизионного прогнозирования разрушения зданий с работающей системой отопления представляется сомнительной ввиду трудностей обнаружения предвестников катастроф малой амплитуды на фоне многочисленных тепловых шумов.

9.1.2. Определение теплопотерь.

Нормативными характеристиками жилых зданий являются расчетная температура наружного (своя для каждой географической местности) и внутреннего воздуха ($20 - 21 \text{ }^\circ\text{C}$), его относительная влажность ($50 - 60 \%$), перепад между температурой воздуха в помещении и на внутренней поверхности наружной стены ($4 - 6 \text{ }^\circ\text{C}$), температура на внутренней поверхности стены, которая должна превышать температуру точки росы. Главной эксплуатационной характеристикой зданий являются удельные энергозатраты на отапливаемой площади за один отопительный период в годовом цикле, выраженные в кВт ч/(м² год).

На рис. 9.1 представлена схема формирования теплового баланса здания в отопительный период годового цикла [112]

Доходная часть обусловлена 1) отопительными приборами, 2) бытовыми электрическими приборами, 3) солнечной радиацией

Расходная часть представлена 1) теплопередачей через стены, окна, чердачное перекрытие, полы первого этажа; 2) дополнительными затратами тепловой энергии на нагревание в объеме помещения инфильтрующегося холодного воздуха, 3) энергозатратами на горячее водоснабжение. Наибольшая доля теплопотерь (до 50 %) приходится на инфильтрацию холодного воздуха, основная часть которого поступает через притворы и неплотности окон и балконных дверей.

Тепловизионный метод, позволяет проанализировать работу системы вентиляции, оценить интенсивность инфильтрации воздуха, а также выявить нарушения теплозащиты ограждающих конструкций, возникшие в результате следующих причин

- ошибок проектирования,
- нарушений технологии изготовления строительных материалов, правил складирования, перевозки и т.п.,
- ошибок и нарушений технологии при строительстве зданий,
- неправильного режима эксплуатации

Перечисленные факторы приводят к преждевременному снижению теплозащитных свойств в отдельных участках ограждающих конструкций в результате воздействия погодных (ветер, атмосферные осадки) и естественно-климатических условий (циклы тепло-холод, влажность). Это, в свою очередь, приводит к ухудшению микроклимата внутри зданий и перерасходу топлива на обогрев вследствие увеличения теплопотерь. ИК-термография позволяет определить пути устранения ошибок проектирования, в результате которых температура в помещениях держится на недопустимо низком уровне.

Таким образом, тепловизионная диагностика может служить одним из важных инструментов *энергоаудита* жилых и

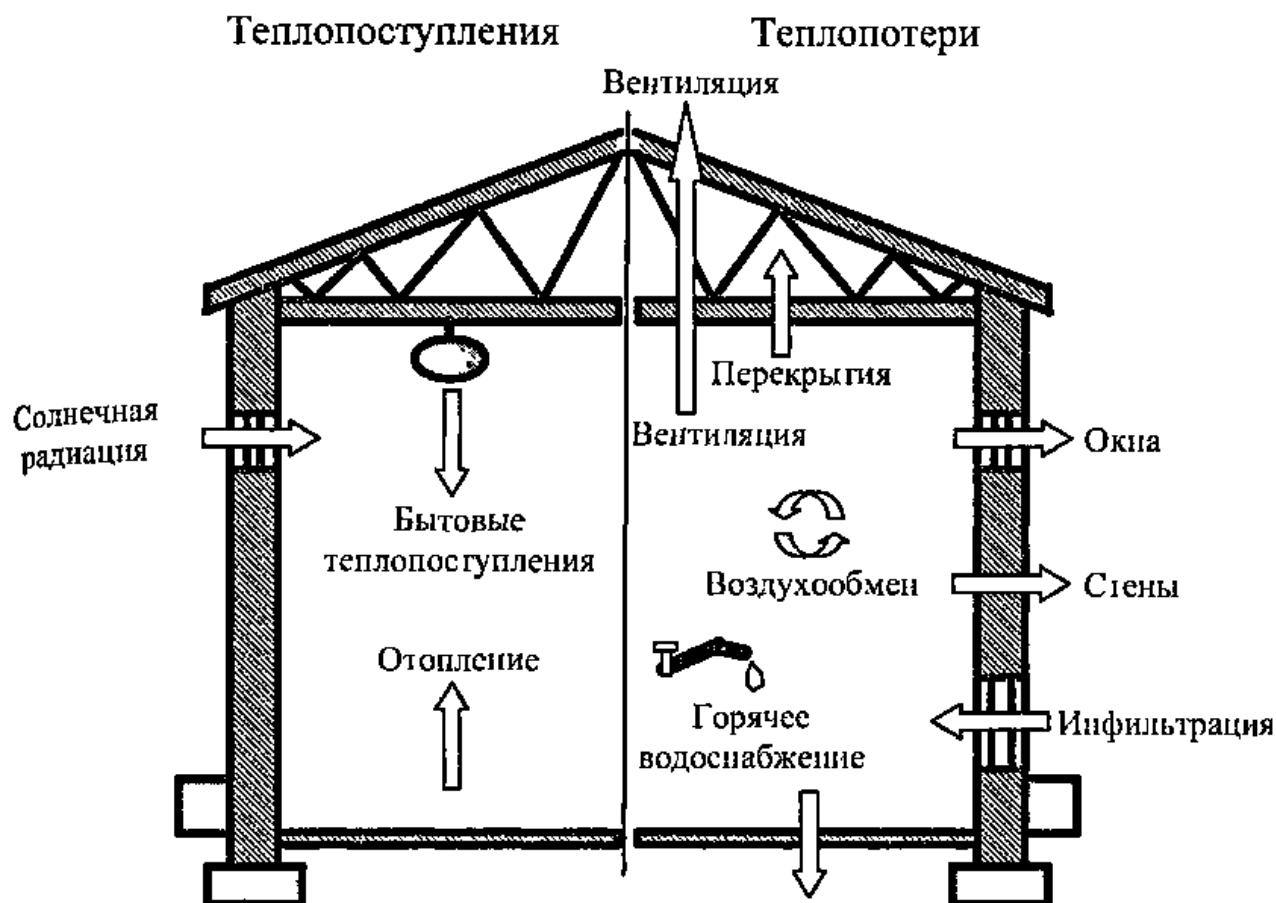


Рис. 9.1. Тепловой баланс здания (адаптировано из [112])

производственных зданий, результаты осмотра являются составной частью энергетических паспортов зданий, форма которых разработана в ряде регионов России.

Теплопотери ограждающих конструкций зданий определяют на момент тепловизионной съемки, а затем экстраполируют на годовой период с учетом нормируемой температуры внутри помещений, средних климатических условий в данной местности и длительности отопительного сезона

Экономический ущерб от сверхнормативных теплопотерь определяют исходя из их рассчитанных значений с учетом стоимости тепловой (электрической) энергии. Очевидно, что сама по себе тепловизионная диагностика в состоянии лишь констатировать распределение теплопотерь в зоне контроля, на основании чего

можно разработать мероприятия по их снижению (выравниванию) и в последующем оценить их эффективность. Например, в жилых и производственных зданиях тепловизионный метод позволяет оценить эффективность оптимизации системы теплоснабжения и вентиляции.

При анализе теплопотерь зданий особое внимание следует уделять термографированию окон, поскольку именно через них теряется большая часть тепловой энергии. Тепловизионное определение истинной температуры окон требует специальных приемов, поскольку на показания тепловизора существенное влияние оказывает угол съемки и отраженное излучение окружающей среды и Солнца. Применение окон специальной конструкции, например с покрытиями, может потребовать отдельного анализа радиационной компоненты теплопотерь.

9.1.3. Выявление скрытых дефектов. Основными видами строительных дефектов, обнаруживаемых с помощью ИК термографии, являются

- места протечек воздуха и воды (дефектная зачеканка швов с наружной стороны, отслоения пленки мастики от бетонной поверхности, недостаточное обжатие герметика и трещины в растворе и мастике, дефекты оконных блоков и проемов некачественное уплотнение стен замком, сквозные щели в соединениях нижних элементов коробок, прерывистость мастики в устье стыка защелки оконного блока),

- мостики тепла и холода, ухудшенные сопротивления теплопередаче (отсутствие теплоизоляции, аномальная увлажненность, некачественная кирпичная кладка, некорректные архитектурные и строительные решения и т.п.),

- дефектные панели ограждающих конструкций (нарушения толщины и расстановки утеплителя, адсорбция влаги в утеплителе, завышение объемного веса керамзитобетона, оседание утеплителя, скол края панели),

- отслоение штукатурки, облицовки и других покрытий

Современные тепловизионные системы позволяют быстро и точно выявить дефектные участки и определить их границы. Количественную оценку обнаруженных дефектов производят в лабораторных условиях с использованием стандартного математического аппарата и соответствующих программных средств.

Обнаружение скрытых дефектов основано на использовании принципа сравнения *текущей* зоны контроля с *эталонной* (*бездефектной*) зоной. Эталонную зону указывают из технологических соображений или определяют в ходе тепловизионного осмотра, например, путем оценки сопротивления теплопередаче (см

ГОСТ 26629–85 "Метод тепловизионного контроля качества Теплоизоляция ограждающих конструкций") Определение теплопотерь и сопротивления теплопередаче осуществляют согласно ГОСТ 26254–84 "Здания и сооружения Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций" и СНиП II-3–79* "Строительная теплотехника". Тепловизор используют в качестве средства измерения поверхностной температуры, а тепловой поток (коэффициент теплообмена) измеряют с помощью датчиков теплового потока.

Обнаруживать скрытые дефекты строительства тепловизионным методом можно внутри и снаружи помещений. Наружный осмотр более пригоден для оценки общих теплопотерь зданий и сопротивления теплопередаче, включая анализ эффективности архитектурных решений, а также для выявления существенных дефектов, которые значительно искажают поверхностное температурное поле. Внутренний осмотр является более детальным и предназначен для обнаружения, в том числе незначительных строительных дефектов и анализа теплового режима помещений.

Имеются методики проведения тепловизионной диагностики внутри отдельных помещений путем локального понижения давления, например, с помощью вентилятора, при этом резко возрастает температурный сигнал, обусловленный протечками воздуха через стены, и появляется возможность отличить протечки от локального ухудшения теплоизоляционных свойств. В летнее время при слабом температурном напоре возможно использование нагревателей для повышения температуры внутри помещений, в этом случае измерение температуры стен начинают через несколько дней после начала нагрева.

Качество строительства большинства производственных зданий, в частности, главных корпусов тепловых станций, энергообъектов, возведенных в 60-70-е годы, было невысоким, поэтому по мере их эксплуатации интенсивно ржавеют металлические соединения стеновых панелей, что может привести к выпадению отдельных фрагментов стен наружу или внутрь помещений. Интенсивность коррозии связана с промоканием панелей, что хорошо идентифицируется с помощью тепловидения.

9.1.4. Оценка сопротивления теплопередаче. Теоретические аспекты оценки сопротивления теплопередаче были рассмотрены в п. 2.7.9. Стационарный тепловой поток через многослойную плоскую стенку, разделяющую две среды с температурой T_m^a и T_{out}^a , определяется следующими соотношениями (рис. 9.2)

$$Q = \frac{T_m^a - T_{out}^a}{R}, \quad (9.1)$$

$$R = \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{out}},$$

$$Q = \alpha_{in} (T_m^a - T_m^w), \quad (9.2)$$

$$Q = \alpha_{out} (T_{out}^w - T_{out}^a), \quad (9.3)$$

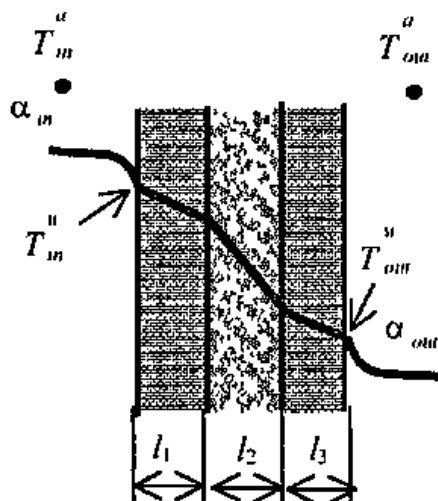


Рис. 9.2. Теплопередача через многослойную и плоскую стенку

где обозначения соответствуют приведенными на рис. 9.2

Для характеристики отдельных компонент сопротивления теплопередаче вводят следующие понятия

тепловое сопротивление граничного слоя на внутренней и внешней поверхности

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad R_{out} = \frac{1}{\alpha_{out}}, \quad (9.4)$$

термическое сопротивление самой многослойной стенки (число слоев N)

$$R_t = \sum_1^N \frac{l_i}{\lambda_i}, \quad (9.5)$$

где l_i – толщина i -го слоя, λ_i – коэффициенты теплопроводности слоев

Тогда

$$R = R_{in} + R_t + R_{out} \quad (9.6)$$

Температуру наружной поверхности ограждающей конструкции определяют по следующей формуле (см. также формулу (2.78))

$$T_{out}^w = T_m^a + \frac{R_{out}}{R} (T_m^a - T_{out}^a) \quad (9.7)$$

Дефекты ограждающих конструкций различного типа изменяют термическое сопротивление стенки на величину ΔR . При этом на внешней поверхности конструкции возникает температурный сигнал амплитудой

$$\Delta T = \frac{R_{out}}{R} \frac{\Delta R}{R - \Delta R} (T_m^a - T_{out}^a) \quad (9.8)$$

Формула (9.8) означает, что уменьшение R на величину ΔR приводит к появлению положительного сигнала ΔT , т.е. температура наружной стены возрастает. Измеряя ΔT с помощью тепловизора, можно оценить изменение термического сопротивления.

ческого сопротивления ограждающей конструкции ΔR

Ограждающие конструкции зданий могут считаться стационарными только с той или иной степенью приближения. Чем больше амплитуда изменения температуры наружного воздуха в течение суток, тем выше степень нестационарности температурного поля стенки и тем большие погрешности вносят формулы (9.1 – 9.3) и (9.8).

В ГОСТ 26254-84 "Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций" формула для определения R предложена в следующем виде, аналогичном формуле (9.1).

$$R = R_{в} + R_{к} + R_{н} = \frac{t_{в} - \tau_{в}}{q_{ф}} + \frac{\tau_{в} - \tau_{н}}{q_{ф}} + \frac{\tau_{н} - t_{н}}{q_{ф}}, \quad (9.9)$$

где $R_{в}$, $R_{н}$ – сопротивления теплопередаче соответственно внутренней и наружной поверхностей;

$R_{к}$ – термическое сопротивление однородной зоны ограждающей конструкции;

$t_{в}$, $t_{н}$ – средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутреннего и наружного воздуха;

$\tau_{в}$, $\tau_{н}$ – средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции,

$q_{ф}$ – средняя за расчетный период измерения фактическая плотность теплового потока.

Значения коэффициентов теплоотдачи на внутренних и наружных поверхностях измеряют экспериментально с помощью датчиков теплового потока (приборы

по ГОСТ 7076–78). Использование значений α , рекомендуемых СНиП II-3-79*, в этом случае нецелесообразно, поскольку реальные значения, в особенности, $\alpha_{от}$ могут значительно отличаться от справочных.

Помимо величины α , другими факторами, влияющими на точность определения R , являются:

1) несоответствие температуры воздуха в момент измерения ее значениям предшествующим 8.. 12 ч;

2) нелинейное распределение температуры внутри ограждающей конструкции;

3) неточное задание коэффициента излучения.

Необходимость выбора периода измерений, когда справедлива формула стационарного режима (9.9), превращает определение R в длительную процедуру (до 15 дней согласно ГОСТ 26254–84).

В настоящее время используют многоканальные цифровые датчики температуры и теплового потока с автономным питанием, которые прикрепляют к ограждающей конструкции. Записанные показатели анализируют на компьютере с целью выбора необходимых "стационарных" значений.

Фирмой "ВЕМО" (г Москва) предложен алгоритм итеративной оценки R по нестационарным измерениям температуры стены и воздуха за несколько предшествующих дней, однако данный способ не прошел метрологической аттестации. Той же фирмой предложена методика создания необходимого температурного напора в летнее время путем подогрева отдельных помещений здания.

В 2001 – 2002 гг. Госэнергонадзором и Госстроем РФ утверждена комплексная методика контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений, разработанная ЗАО "ТТМ"

(г. Санкт-Петербург). В данном документе, равно как и в вышеуказанной методике, утвержденной Госстандартом РФ, реализованы нормативные положения тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций, стен и окон, определенные ГОСТ 26629-85, ГОСТ 26254-84 и ГОСТ 26602.1-99.

9.1.5. Контроль за влажностью кровли крыш. Невидимые глазу скопления воды в кровле плоских крыш производственных зданий являются серьезным дефектом, приводящим к преждевременному разрушению кровли и протечкам внутрь помещений. Например, протечки воды в турбинный зал тепловой станции, которые могут произойти в весенний период, в состоянии нарушить юстировку турбин, а при больших массах воды возможно обрушение кровли.

Аномальная поверхностная влажность может быть обнаружена в стационарном режиме за счет испарения воды и соответствующего понижения температуры, однако вода, скрытая внутри многослойной крыши, может быть обнаружена, как правило, только в динамическом режиме: за счет высокой теплоемкости воды дефектные участки видны холодными в дневное время и теплыми ночью.

Обследования кровли можно проводить путем обхода крыши с тепловизором, однако в этом случае производительность осмотра низка и затруднено получение общей картины. В США широко используют тепловизионную съемку плоских крыш с воздуха (с борта мотодельтаплана, вертолета или самолета, в том числе, непилотируемого). При этом обеспечивают высокую производительность обследования при сравнительно простой идентификации и координатной привязке дефектных зон.

9.1.6. Методические особенности термографирования строительных объектов. Диагностику выполняют снаружи и/или внутри помещений согласно стан-

дартным методикам работы с тепловизором и вспомогательными устройствами. Температурный напор в контролируемом строительном сооружении, измеряемый как разность внутренней и внешней температур воздуха, должен быть не менее 10 °С в течение последних 24 ч (требование международного стандарта ISO 6781-83 "Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод"), что выполняется в течение отопительного сезона.

Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать $\pm 30\%$ от действительной начальной величины; температура воздуха внутри помещения не должна изменяться более чем на $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, а ограждающие конструкции не должны подвергаться воздействию солнечной радиации в течение предшествующих 12 ч.

При определении (оценке) сопротивления теплопередаче следует руководствоваться требованиями ГОСТ 26254-84, который требует, чтобы продолжительность периодов с наиболее установившимся режимом с отклонением среднесуточной температуры за этот период в пределах $\pm 1,5\text{ }^\circ\text{C}$ составлял от 1 до 3 суток в зависимости от тепловой инерции ограждающей конструкции. Поскольку в российских условиях обследования проводят в основном зимой, особое значение имеет возможность работать с тепловизором при низкой температуре окружающей среды. Метрологические показатели даже лучших моделей портативных тепловизоров "плывут" при быстром перемещении приборов из помещения наружу, что требует их длительной адаптации. В ряде случаев положительные результаты получают, проводя измерения из окна автомобиля.

Идентификацию объектов на термограмме рекомендуется производить сравнением термограмм с видимым изображением, которое получают с помощью фотоаппарата, цифрового фотоаппарата и/или цифровой (аналоговой) видеокамеры.

Проблема коэффициента излучения. При обнаружении скрытых строительных дефектов знание коэффициента излучения объекта является желательным, но не обязательным, особенно в тех случаях, когда дефекты обнаруживают на однородном излучательном фоне (кирпичная стена, панель, оштукатуренные стены и т.п.) Более того, различия в излучательных свойствах объектов диагностики могут служить дополнительными признаками их идентификации на термограмме

При определении теплопотерь и сопротивления теплопередаче поправку на коэффициент излучения объекта следует вводить, используя соответствующую опцию тепловизора. Связь погрешности задания коэффициента излучения и погрешности определения истинной температуры была описана в п. 6.2.4

Метеоусловия при тепловизионной съемке. Тепловизионную съемку не производят в дождь, туман, сильный снегопад, а также при наличии снега, измороси и влаги на контролируемых поверхностях. Погрешность измерений, вносимая вышеуказанными факторами, возрастает с увеличением расстояния до объекта

Прямое и рассеянное солнечное излучение, особенно в весенне-летний период, может нагревать части ограждающих конструкций и создавать области аномальной температуры, которые следует отличать от температурных распределений, обусловленных теплопередачей через ограждающие конструкции

Эффект солнечного нагрева особенно существен при диагностике крыш. На гладких (глянцевых) поверхностях, например окнах, могут возникать солнечные блики, которые на термограмме выглядят как зоны повышенной температуры. В большинстве случаев наличие бликов легко подтверждают путем перемещения тепловизора: изображение блика будет перемещаться, в то время как изображение аномально нагретой зоны останется на месте. Кроме того, на окнах можно наблюдать эффект холодного неба, который

особенно заметен при безоблачном небе, при визировании которого тепловизор может показывать температуру до -25°C .

Тепловизионную съемку рекомендуется проводить в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально. В дневное время наилучшие результаты получают при пасмурном небе

Сильный ветер существенно увеличивает теплоотдачу с поверхностей и снижает их температуру. Рекомендуется проводить тепловизионную съемку при скорости ветра не более $5-7$ м/с. При необходимости учитывать изменение коэффициента теплоотдачи, например, при определении сопротивления теплопередаче, следует использовать соответствующие формулы, рекомендованные теорией теплопередачи

При определении теплопотерь и сопротивления теплопередаче следует принимать во внимание суточный ход температуры окружающего воздуха. В силу различной теплоинерционности отдельных элементов ограждающих конструкций, соотношение измеренных температурных значений в любой момент времени может не соответствовать истинному соотношению теплозащитных свойств данных элементов. Оценку отклонения режима теплопередачи от стационарного производят согласно ГОСТ 26629-85. Следует отметить, что при определении сопротивления теплопередаче согласно ГОСТ 26254-84 метод ИК-термографии не обладает преимуществами по сравнению со стандартными средствами измерения температуры вследствие необходимости выбирать период слабого изменения температуры ограждающей поверхности в течение длительного времени

Расстояние до объекта контроля. С увеличением расстояния до объекта контроля возрастает поле обзора, ухудшается детальность осмотра и искажаются значения истинной температуры за счет поглощения в атмосфере. Последний эффект незначителен при расстояниях менее 30 м,

на которых обычно проводят съемку. При больших расстояниях следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение излучения в атмосфере. Во многих современных тепловизорах такую коррекцию можно осуществить непосредственно в приборе для стандартного состояния атмосферы и заданного расстояния до объекта контроля.

Условия внутри помещений. При прочих равных условиях один и тот же дефект строительства (протечка воздуха, мостик холода), как правило, лучше обнаруживается при осмотре внутри помещения, за исключением случаев, когда анализируемый феномен, например металлический вкладыш, располагается вблизи наружной поверхности. Основными мешающими факторами при таком осмотре являются

- 1) наличие вентиляторов и нагревателей,
- 2) экранировка зон контроля мебелью, коврами и другими предметами,
- 3) отслоение обоев, штукатурки и т.п.,
- 4) неравномерная окраска зоны контроля.

Радиационное влияние нагревателей можно устранить их экранированием теплонепроницаемыми предметами (например, используя полиэтилентерефталатную металлизированную пленку типа ПЭТФ-С или ПЭТФ-Н согласно ГОСТ 26629-85) или правильным выбором зоны и ракурса съемки.

При термографировании оконных стекол может возникать эффект отражения близстоящих источников теплового излучения, включая людей, в стекле, при этом оператор видит слабое отраженное изображение указанных источников на термограмме. Еще более сильное влияние оказывает отраженное солнечное излучение.

Термографирование полупрозрачных объектов, таких как диэлектрические пленки, оконные стекла и т.п., требует

использования специальных методических приемов, которые должны разделять эффекты теплопередачи от чисто оптических эффектов. Например, на оконных стеклах целесообразно размещать самоклеящуюся пленку любого цвета и измерять ее температуру. Предметы, экранирующие стены и стыки, целесообразно удалить. Расслоения между декоративными покрытиями и штукатуркой, а также между основной стеной и штукатуркой могут сами по себе расцениваться как дефекты.

Влияние неоднородного распределения коэффициента излучения по зоне контроля можно учесть путем визуального осмотра, а также введением соответствующих поправок в установки тепловизора. Не рекомендуется проводить измерение температуры поверхностей с коэффициентом излучения ниже 0,7 (ГОСТ 26629-85). Влияние величины коэффициента излучения велико при визировании металлических, в особенности блестящих, поверхностей. Большинство строительных материалов, а также металлы, покрытые слоем ржавчины, грязи и пыли, обладают достаточно высоким значением коэффициента излучения для выполнения измерений с требуемой точностью ($\pm 1^\circ\text{C}$).

Качественная и количественная оценка результатов. Классификацию обнаруженных тепловых аномалий должен производить обученный оператор — термографист, имеющий соответствующую лицензию и уровень квалификации не ниже II-го по системе Госгортехнадзора. Наилучшие результаты достигают при использовании результатов в виде цветных и черно-белых термограмм, анализ которых оператор производит на основе своего опыта и критериев, изложенных ниже.

Предпочтительность использования цветного изображения перед черно-белым зависит от объекта контроля, примененной палитры и опыта оператора. Черно-белые изображения имеют более естест-

венный вид и наиболее пригодны, когда тепловую аномалию обнаруживают на фоне множества "тепловых отпечатков", носящих шумовой характер. Черно-белые изображения легче интерпретировать, чем цветные, при наличии отраженной солнечной засветки. Цветное представление термограмм эффективно, если анализируемая тепловая аномалия отличается незначительно по температуре от окружающего температурного фона. Цветные термограммы также являются более наглядными при документировании результатов. Широко распространенная в настоящее время цветная палитра цветов каления (Igon) является компромиссной между черно-белым и цветным представлением термограмм.

- При *качественной* оценке тепловых аномалий (анализе термограмм дефектов) решающими факторами являются сведения о тепловом режиме здания, опыт оператора и вид изображения соседних зон, на фоне которых обнаруживается данная аномалия.

Количественную оценку тепловых аномалий проводят с целью оценить степень их опасности для нормального функционирования здания. При этом значения средних температур пола, стен и потолка внутри помещений должны соответствовать нормам СНиП II-3-79*. Степень опасности обнаруженных аномалий оценивают

- по дополнительным потерям тепла через дефект,

- по несоответствию измеренных значений сопротивления теплопередаче требованиям СНиП II-3-79*,

- по возможным последствиям разрушения ограждающей конструкции вследствие дефекта (сдвиг точки росы внутрь стены, коррозия материала стены, повышение влагонепроницаемости и снижение за счет этого качества теплозащиты и т.п.),

- по дискомфорту внутри помещения

Соотношения между степенью опасности аномалий и экспериментально наблюдаемыми температурными перепадами в местах тепловых аномалий не регламентированы ввиду отсутствия необходимых статистических сведений. Сами амплитуды температурных перепадов должны нормироваться на температурные напоры, поскольку, например, понижение температуры в зоне межпанельного шва на 1 °C при температуре наружного воздуха 0 °C свидетельствует о значительно более серьезном дефекте, чем такой же перепад, обнаруженный при температуре наружного воздуха -20 °C.

9.1.7. Примеры термограмм. Особенности тепловизионной диагностики строительных сооружений проиллюстрированы термограммами на рис. 9.3 ... 9.13 (См. цветную вкладку).

Идентификацию и привязку дефектных участков целесообразно делать совмещением ИК и видимого изображения, как это показано на рис. 9.3, для чего можно применять такие простые графические редакторы как Microsoft Paint.

Тепловизионная съемка индивидуальных жилых домов позволяет оценить качество теплозащиты и идентифицировать зоны основных утечек тепла для последующего ремонта (рис. 9.4).

На термограмме рис. 9.5, а виден дефект вертикального шва в жилом кирпичном доме с температурным градиентом на наружной поверхности до 3 °C. Тепловизионная оценка состояния швов по результатам наружной съемки является непростой задачей из-за малой амплитуды температурных аномалий. В ряде случаев рекомендуется дополнить наружное обследование съемкой внутри помещений, как это показано на рис. 9.5, б, при этом температурный градиент в зоне того же самого дефекта (рис. 9.5, а) составляет 8 °C (следует обратить внимание на то, что кухонная мебель частично затеняет шов при внутренней съемке).

На термограмме рис. 9.6 показан шов, обследованный перед оштукатурива-

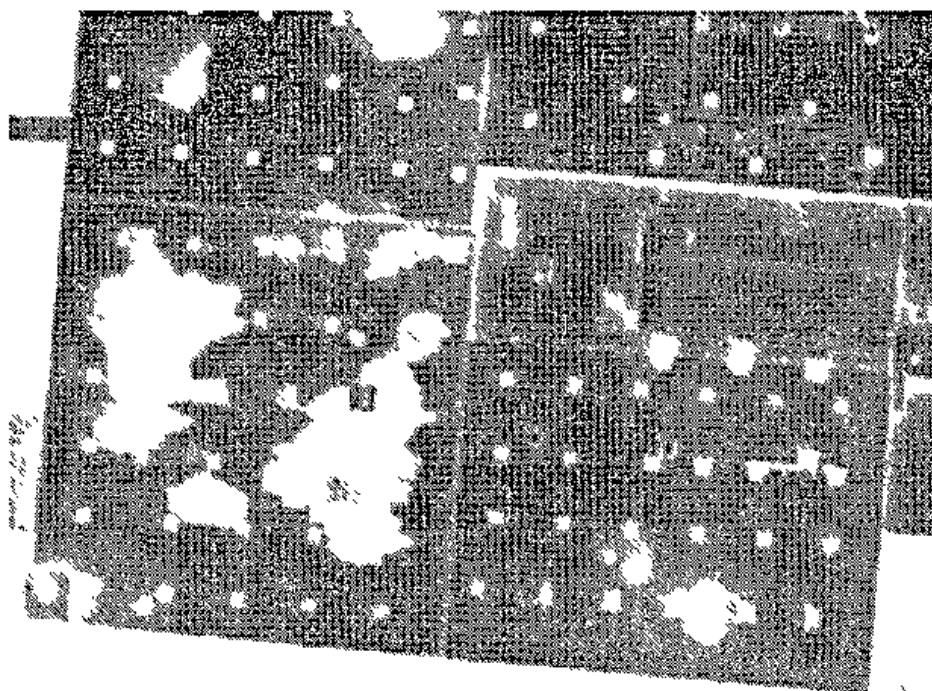


Рис. 9.12. Съемка плоской кровли производственного корпуса с борта самолета: светлые области на термограмме соответствуют влажным участкам (с разрешения фирмы Stockton Infrared Services, Inc.)

ванием стены, температурная аномалия в этом случае составила $11\text{ }^{\circ}\text{C}$

Пример реализации принципа активного ТК приведен на рис 9 7, где вследствие нагекания холодного атмосферного воздуха расслоение между декоративной штукатуркой и основной стеной видно в виде обширной холодной зоны темного цвета с амплитудой температурного сигнала около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ В других подобных случаях закрытое расслоение может характеризоваться локальным перегревом из-за солнечного нагрева Преимущество тепловизионного контроля состоит в возможности оценить величину дефектных зон и принять решение либо об их "лечении", либо об обрушении отслоившейся штукатурки и нанесении нового слоя Аналогичные принципы диагностики использованы при контроле настенных фресок (см п. 9.2)

На рис 9 8 представлена термограмма фасада административного здания со сплошным остеклением, на которой отчетливо виден перегрев четвертого этажа

(средняя температура $+4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению со вторым этажом (средняя температура $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), температура окружающего воздуха на момент съемки была $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Оптимизация разводки системы отопления в таком здании может обеспечить экономию до 20 % тепловой энергии

Термограмма на рис 9 9 выявляет существенные сквозные дефекты двух вертикальных швов между стеновыми панелями главного корпуса котельной Как отмечалось выше, панельные здания являются удачным объектом для тепловизионной съемки, которая может служить, в том числе, и инструментом судебной экспертизы Пример термограммы торца жилого здания с многочисленными дефектами межпанельных швов показан на рис 9 10, а, соответствующая бинарная карта дефектов, полученная путем анализа термограммы, представлена на рис 9 10, б

Диагностика кровли крыши проиллюстрирована рис 9 11, 9 12 При визуальном осмотре контраст зон повышенной влажности по сравнению с бездефектными участками невелик даже в случае поверх-

ностной влаги, а обнаружение скрытых "водяных карманов", как правило, невозможно в принципе (рис 9 11, а) При правильно выбранном времени тепловизионной съемки, за счет высокой теплоемкости воды, зоны скопления внутренней влаги видны теплыми в вечернее время и холодными в первую половину дня (рис 9 11, б) При внутренней съемке такие зоны видны холодными (см термограмму на рис 9 11, в, полученную с нулевой отметки турбинного зала одной из ГРЭС, температурный градиент в этом случае составил 8 °С)

Панорамная термограмма плоской крыши, полученная с борта самолета, представлена на рис 9 12 Многочисленные влажные участки кровли надежно идентифицируются в виде теплых пятен

На рис 9 13 представлены результаты двух тепловизионных съемок разрушившегося 17 июля 1997 г здания казармы Томского Высшего Военного Командного Училища Связи (ТВВКУС) Первая съемка выполнена 25 июля, т.е. спустя 8 дней после катастрофы при благоприятных погодных условиях (отсутствие ветра, дождя и прямой солнечной засветки развалин в течение нескольких дней) [111] Неожиданным результатом обследования явились слабые локальные повышения температуры, обнаруженные в 5 из 24-х стыков сохранившихся ригелей перекрытия и вертикальных колонн Амплитуда этих сигналов изменялась от 0,8 до 1,5 °С, в то время как шумовые флуктуации температуры, в том числе и в зонах переходов от штукатурки к оголившейся кирпичной кладке, составили только 0,3 °С (рис 9 13, а)

Поскольку изменения излучательных свойств материалов, равно как и возможный эффект "черного тела", характерный для ниш и углублений, пришлось отбросить в качестве вероятной причины обнаруженных тепловых аномалий, другими объяснениями были возможные процессы

гидратации строительных материалов или аномальные механические нагрузки. В пользу последних говорил также тот факт, что спустя 1 месяц (26 августа 1997 г.) указанные аномалии исчезли (снизились до шумового уровня) (рис 9 13, б). Важно отметить, что повторная съемка имела место при практически идентичных погодных условиях

Специфическим строительным объектом являются взлетно-посадочные полосы и другие дорожные покрытия аэродромов В работе [113] показано, что, при использовании солнечного нагрева возможен оперативный контроль больших поверхностей с целью выявления трещин и пустот, возникших в результате старения. При этом инспекцию следует проводить в солнечный день на сухих поверхностях. Основным недостатком метода авторы считают невозможность оценить глубину и толщину трещин и пустот, поэтому в качестве дополнительной техники предложено использовать георадар с излучением частотой 1–2,5 ГГц, проникающим в землю (ground penetrating radar)

Аналогичный вариант ИК термографической съемки используют при выявлении расслоений в дорожных покрытиях мостов (величина температурного градиента достигает 2–5 °С) Данная техника описана в американском стандарте ASTM D4788 Тепловизор устанавливают на автомобиль, движущийся со скоростью 16 км/час ИК-термограммы записывают на видеопленку и параллельно ведут видеозапись для того, чтобы при последующем сравнении данных по двум каналам исключить поверхностные помехи (заплаты и т.п.) Службы контроля мостов на Западе рассматривают ИК-термографию как привлекательный метод, хотя его эффективность зависит от погодных условий и состояния покрытия В качестве недостатка упоминается невозможность определить глубину залегания дефектов,

которые могут быть как между асфальтом и бетоном, так и глубоко в армированном бетоне. Дополнительная георадарная съемка хорошо дополняет ИК-термографию и в этом случае

Фирма Astec Industries (США) сообщила о применении портативного тепловизора для контроля качества укладки асфальта. Известно, что температура асфальта должна находиться в определенных границах, выход за пределы которых приводит к преждевременному разрушению дорожного покрытия. На выполнение "заплаточного" ремонта на автострадах США федеральные власти расходуют от 300 до 400 миллионов долларов в год, в то время как на местном уровне расходы удваиваются, и ИК-термография может стать средством снижения этих расходов.

На российских железных дорогах одной из важных проблем является своевременное обнаружение начальной стадии разрушения опор линий тяговой сети, в особенности, если речь идет о подземной части опор. Обычно эту проблему решают, используя метод акустической эмиссии. Тем не менее, в работе [114] сообщается о тепловизионных исследованиях, выполненных электрической компанией Румынии RENEL. Установлено, что солнечный нагрев железобетонных опор позволяет выявить дефектные зоны, образующиеся как вследствие низкого качества строительства, так и в результате старения.

9.2. АКТИВНЫЙ ТК ПРОИЗВЕДЕНИЙ ИСКУССТВА

9.2.1. Общие сведения. Во многих странах все большее внимание уделяют сохранению художественных ценностей старины, включая памятники архитектуры, скульптуры и живописи. В течение многих лет существует соответствующая программа ЮНЕСКО, а в ряде стран, таких как Италия, Франция, Германия, вы-

полняются национальные программы и проводятся конференции по разработке методов диагностики и реставрации объектов, представляющих мировую ценность. При этом широко используют методы НК, прежде всего оптические ИК-термография находит свою нишу в исследованиях памятников архитектуры и произведений искусства. Диапазон возможных применений теплового метода велик от аэросъемки археологических раскопок с целью обнаружить скрытые структуры до анализа отдельных частей скульптур с целью подтвердить аутентичность материала или установить факт поздней реставрации. В исследованиях применяют принципы как активного ТК, так и обычную ИК-съемку [115-121].

В работах [115-119] описаны исследования по ИК-термографической диагностике настенных фресок и других предметов искусства, выполненные в Италии Томским НИИ интроскопии в кооперации с Институтом Холодильной Техники ITEF-CNR. Были использованы процедуры обработки экспериментальных данных, заимствованные из активного ТК-материалов и изделий, а также строительства и поиска заглубленных мин.

Данная область применения ТК характеризуется следующими особенностями

1) многие старинные произведения искусства, такие как фрески Микеланджело, Джотто, Фоголини и других мастеров, являются бесценными, и применяемые методы контроля должны быть действительно неразрушающими (например, при использовании активного ТК недопустим перегрев фресок),

2) характерные глубины залегания дефектов типа расслоений, воздушных полостей и инородных включений находятся в пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, поэтому характерные времена теплопереда-

чи велики, и последовательности термограмм можно накапливать с относительно большим интервалом времени;

3) произведения искусства (картины, иконы, фрески) весьма неоднородны в оптическом и, зачастую, в теплофизическом смысле, поэтому уровень шумов, особенно при оптическом нагреве, весьма высок, что требует повышенного внимания к процедурам обработки данных.

9.2.2. Настенные фрески. Типичная настенная фреска представляет собой многослойную композицию, включающую слой наружной краски, внедренной в основу (штукатурку), слой специальной штукатурки (называемой в Италии *aggricio*), связующий слой (*mortar*) и поддерживающую стену. Наиболее опасными дефектами являются отслоения штукатурки, типичная толщина которой составляет 0.5 ... 1 см, от стены, поскольку развитие таких дефектов может привести к разрушению фрески.

Существует способ локального "лечения" фресок, заключающийся во введении связующего вещества в дефектные полости с помощью шприца, что требует точного указания дефектных зон. Для тепловой стимуляции фресок используют главным образом слабый нагрев с помощью оптических источников или потока воздуха в течение нескольких минут, в результате чего температура поверхности фресок повышается не более чем на 5 ... 10 °С относительно окружающей среды [115, 118].

Алгоритмы контроля отработывали на стандартных образцах фресок, которые содержали дефекты, типичные для старинных настенных фресок [119]. Пример такого образца, названного "Голова Аполлона", изображен на рис. 9.14, а. Дефекты № 1 и 4 представляли собой пластины губчатого материала, размещенные между слоями штукатурки в процессе ее отвер-

ждения; дефектами № 2 и 3 являлись воздушные полости. Параметры дефектов, приведенные в табл. 9.2, были оценены методом голографической интерферометрии и тепловой томографии.

Образец нагревали в течение 30 с оптическим излучением с плотностью мощности около 1 кВт/м², полное время анализа процесса было равно 900 с, в течение которых записывали до 300 термограмм. Предшествующие эксперименты показали, что воздушные расслоения могут быть обнаружены за штукатуркой толщиной до 3 см в случае благоприятных условий контроля: однородной поверхности и равномерного нагрева.

Наличие неоднородно окрашенных зон фрески делает оптический нагрев малоэффективным, поскольку зоны темного цвета, поглощая больше световой энергии, выглядят на термограммах теплыми и могут быть ошибочно идентифицированы в качестве дефектов.

В то же время зоны белого цвета нагреваются слабо, и количества поглощенной энергии может быть недостаточно для обнаружения дефектов на требуемой глубине.

Кроме того, наличие резких границ перехода между темными и светлыми зонами приводит к существенным тепловым потокам, распространяющимся в поперечном направлении, что может создавать артефакты, например, при использовании метода тепловой томографии.

Вышесказанное иллюстрирует термограмма на рис. 9.14, б, соответствующая оптимальному времени контроля $\tau = 270$ с. Зона "глаза", равно как и зона между дефектами № 3 и 4, может быть расценена как содержащая дефект, хотя она просто поглощает больше оптической энергии в силу темного цвета.

Дефект № 2 надежно выявляется, поскольку он расположен под темной зоной. Совместное проявление скрытых дефектов и поверхностных помех хорошо видно на максиграмме рис. 9.14, в.

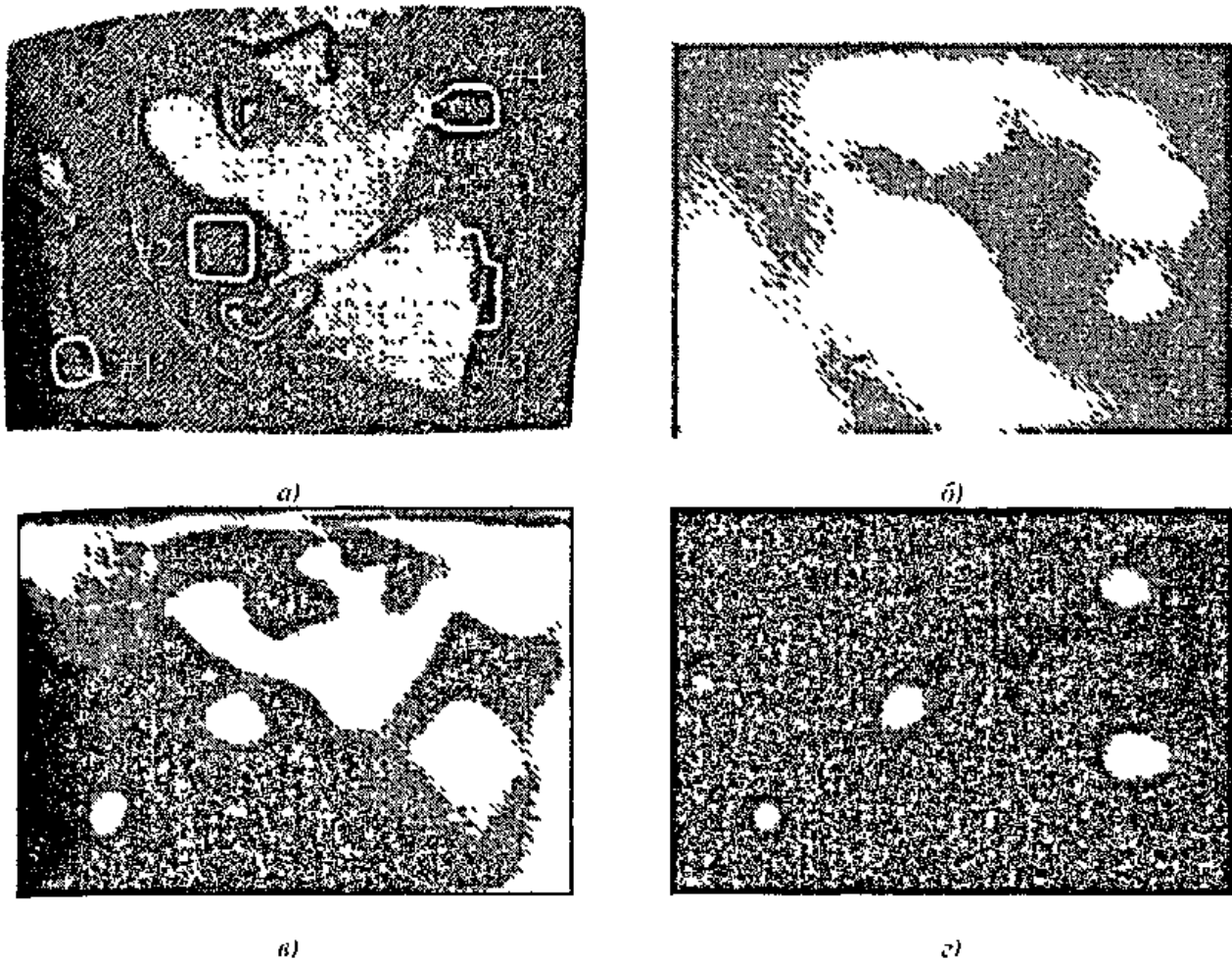


Рис. 9.14. ТК стандартного образца настенной фрески "Голова Аноллона" [119]:
а – фотография образца и схема расположения дефектов, *б* – термограмма, время контроля 270 с (оптимальный момент наблюдения, $S = 0,8$), *в* – максиграмма (получено из исходной последовательности, $S = 1,5$), *г* – максиграмма (трехмерная нормализация, $S = 3,4$)

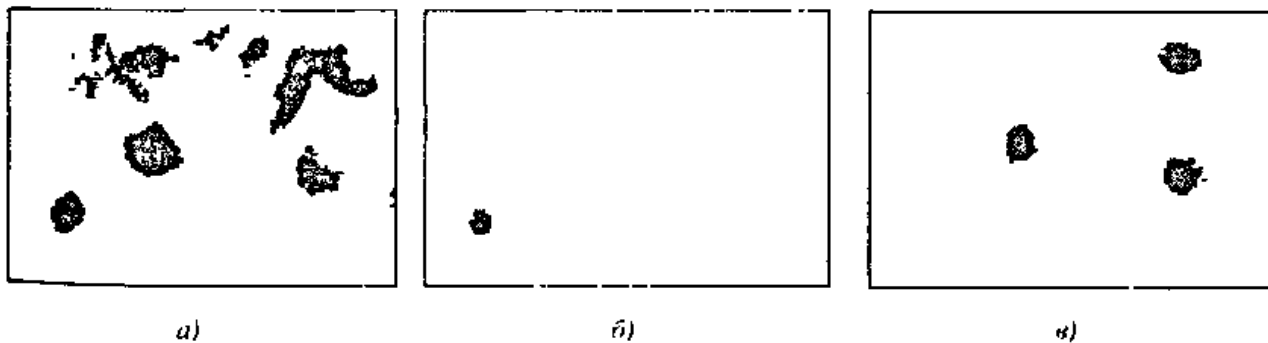


Рис. 9.15. Тепловая томография стандартного образца фрески "Голова Аноллона" [119]:
а – стандартная томограмма слоя с четырьмя дефектами, *б* – томограмма слоя с дефектом № 1 (после трехмерной нормализации), *в* – томограмма слоя с дефектами № 2, 3, 4 (после трехмерной нормализации)

9.2. Параметры дефектов в образце фрески (рис. 9.14, а)

№ дефекта	Поперечные размеры, мм	Глубина залегания, мм	Толщина, мм
1	35 × 35	3	3
2	45 × 30	10	10
3	45 × 30	7	5
4	45 × 45	10	15

Наилучшим алгоритмом обработки результатов ТК фресок такого типа была признана *трехмерная нормализация*, описанная в п. 5.9. При анализе образца фрески в качестве маски была выбрана исходная термограмма при 10 с. Полученная после фильтрации максиграмма показана на рис. 9.14, г, где артефакты, обусловленные поверхностными шумами, существенно подавлены.

Другой пример развитой компьютерной обработки данных приведен на рис. 9.15. Представлены бинарные карты дефектов, позволяющие также оценить поперечные размеры дефектов. Изображение, полученное на основе таймограммы без трехмерной нормализации, содержит артефакты, соответствующие темным (перегретым) областям (рис. 9.15, а), в то время как после фильтрации обнаруживаются даже "слабые" дефекты, отчетливо видимые на двух последовательных тепловых томограммах (рис. 9.15, б, в).

Преимущества трехмерной нормализации могут быть выражены количественно с использованием отношения сигнал/шум S (рис. 9.15). В качестве совокупной дефектной области были рассмотрены зоны, соответствующие четырем дефектам, тогда как вся остальная поверхность образца была принята бездефектной. Применение трехмерной нормализации повысило S более чем в 2 раза.

Результаты ТК фрески Фоголино в г. Бергамо (Италия) представлены на рис. 9.16 (См. цветную вкладку). В результате контроля по фрагментам была

выделена зона (рис. 9.16, а). Термограмма данной зоны, соответствующая концу нагрева (рис. 9.16, б), существенно неоднородна, что обусловлено структурой фрески. В момент оптимального наблюдения термограмма является более однородной и содержит слабый отпечаток внутреннего дефекта (рис. 9.16, в), который отчетливо виден на томограмме слоя (8,1–9,3 мм), соответствующего толщине основного слоя штукатурки (рис. 9.16, г), при этом термограмма (рис. 9.16, б) использована в качестве маски трехмерной нормализации.

9.2.3. Иконы на дереве. (Рис. 9.17–9.20 см. на цветной вкладке). Иконы, как и фрески, представляют собой многослойные композиции, неоднородные в оптическом смысле.

Например, стандартный образец иконы на дереве (рис. 9.17), был изготовлен согласно древним итальянским рецептам и включал 4 дефекта в виде фторопластовой пленки, расположенной между различными слоями [121]. В процессе ТК дефекты получили следующие наименования: № 1 – "Пузырьки", № 2 – "Стержень", № 3 – "Точка" и № 4 – "Слеза". Некоторые результаты развитой обработки данных были рассмотрены в п. 5.8.1 при описании способа полиномиальной аппроксимации.

Вышеописанный образец иконы испытан другими специалистами с использованием методов ширографии (shearography), спекл-интерферометрии (speckle pattern interferometry), спекл-декорреляции (speckle de-correlation) и ИК-термографии.

[120] В отношении ИК-термографии был сделан вывод

- 1) изображения дефектов обладают средним качеством,
- 2) стоимость аппаратуры относительно высока,
- 3) метод легко применим в условиях *in situ*

Несмотря на имевшуюся информацию о скрытых дефектах, оставались сомнения в отношении того, насколько реальные размеры дефектов соответствовали запланированным (например, опыт контроля углепластиковых композитов показал, что куски фторопластовой пленки сопровождаются воздушными промежутками между дефектом и основным материалом, в результате чего возмущающее действие дефекта усиливается) Например, тепловизионная оценка дефекта "Стержень" составила 37×7 мм, тогда как данные изготовителя были 28×4 мм

Образец нагревали в течение 3–5 с с помощью трубчатых кварцевых ламп, что обеспечило около 300 Вт/м^2 поглощенной мощности Термограммы записывали с частотой от 10 до 50 Гц в течение 60 с с помощью тепловизионной системы ThetaCam SC3000 Наибольшее число термограмм в последовательности достигало 3000, что позволило эффективно применять преобразование Фурье

Для обработки результатов применяли все основные алгоритмы, разработанные для импульсного ТК: тепловую томографию, фазовую термографию, полиномиальную аппроксимацию, статистический анализ и др.

Дефект "Слеза" не был вообще обнаружен, по-видимому, в силу того, что глубина его залегания превышала предельную глубину обнаружения воздушных дефектов в данном образце

Оптимальное исходное изображение (рис. 9 18, а) характеризовалось отношением сигнал/шум $S = 1,29$, причем наибольший вклад вносил дефект "Стержень", а "видимость" двух других дефектов была низкой Следовало ожидать, что все три

дефекта будут обнаружены оптимальным образом в максиграмме, что доказывается изображением на рис 9 18, б ($S = 3,51$) Карта дефектов, полученная по максиграмме, показывает дефекты с вероятностью $P_{c,d} = 80 \%$ и $P_{f,a} = 3 \%$ (рис 9 18, в)

При оптимизации по дефекту "Точка" максимальное значение отношения сигнал/шум было получено в изображении полиномиального коэффициента A_3 (рис 9 19, а, $S = 5,79$) Результирующая карта дефекта характеризовалась $P_{c,d} = 100 \%$ и $P_{f,a} = 3 \%$ (рис 9 19, б) Следует отметить, что в оптимальном по данному дефекту исходном изображении величина $S = 1,2$

На рис 9 20 приведены тепловые томограммы, показывающие три вышеупомянутых дефекта в различных слоях изделия Видно, что дефект "Пузырьки" расположен в слое 0,3–0,8 мм, поэтому его температурный отпечаток начинает появляться уже на стадии нагрева

9.3. ДЫМОВЫЕ ТРУБЫ

9.3.1. Общие положения. Тепловизионную диагностику дымовых труб (ДТ) осуществляют с целью определения их технического состояния в процессе эксплуатации, прогнозирования периода безотказной работы до следующей проверки, определения объема и места приложения ремонта, а также для оценки качества выполненных ремонтных работ

Методические аспекты тепловизионной диагностики ДТ и строительных сооружений весьма сходны Обследования ДТ проводят в любое время года, поскольку температурный напор, как правило, превышает $100 \text{ }^\circ\text{C}$, тем не менее, расшифровка результатов контроля оказывается даже более сложной, чем в строительстве, из-за многообразия конструкций ДТ, отсутствия доступа внутрь трубы на момент съемки и частом отсутствии сведений о ряде параметров, необходимых для моделирования теплопередачи в стволе ДТ,

например, температуре газа и ее изменении по высоте ДТ

Основания для проведения тепловизионной диагностики ДТ и газоходов изложены в РД 34 21-562-93, СП 13-101-99, методике Госстандарта РФ (МВИ № 11/442 от 6 03 2002) и ряде публикаций. Дополнительные сведения по устройству ДТ, теплотехническим расчетам и методическим аспектам тепловизионной диагностики можно найти в [122–126].

Высокая информативность тепловидения при обнаружении скрытых дефектов ДТ была отмечена В.А. Дроздовым и В.И. Сухаревым еще в 80-е годы [104], однако тогда тепловой метод не нашел широкого распространения. Объем практических работ по инспекции ДТ непрерывно возрастает, чему способствует ряд причин:

Во-первых, многие ДТ, построенные в 60–70-е годы прошлого века, близки к исчерпанию своего рабочего ресурса и требуют тщательного обследования.

Во-вторых, большинство ДТ в последние годы работают с недогрузом, к ним подключено меньшее число котлов, чем это предусмотрено проектом.

В-третьих, многие предприятия перешли на газовое топливо.

Действие двух последних факторов приводит к тому, что эксплуатационные параметры изменяются по сравнению с проектными, в частности, изменение температуры газа часто приводит к смещению точки росы внутрь ствола ДТ и усилению коррозионных процессов.

Дымовые трубы и газоходы электростанций должны подвергаться наружному осмотру 1 раз в год – весной. Внутреннее обследование дымовых труб должно производиться через 5 лет после их ввода в эксплуатацию, а в дальнейшем по мере необходимости, но не реже 1 раза в 15 лет. Внутреннее обследование труб с кирпичной и монолитной футеровкой может быть заменено тепловизионным, с частотой обследования не реже 1 раза в 5 лет.

Согласно СП 13-101-99, на всех монолитных железобетонных трубах высотой более 100 м, а также кирпичных и металлических трубах высотой более 70 м, работающих в условиях высоких температур (более 300 °С) или сильной газовой агрессии, рекомендуется раз в 5 лет проводить тепловизионный контроль в целях получения данных о состоянии их футеровок. Основное внимание при обследовании уделяется как визуальному осмотру состояния трубы с земли с помощью бинокля, так и тепловизионной съемке, осуществляемой как минимум с 4 точек по всей высоте трубы и по периметру с последующей записью на РСМС/А карту, флэш-карту или видеомagneфонную ленту.

Важно отметить, что тепловизионная съемка должна дополняться натурной, поскольку многие виды дефектов, влияющие на несущую способность ствола, не выявляются при тепловизионной диагностике.

9.3.2. Дефекты дымовых труб. Основные дефекты ДТ являются результатом низкого качества строительства и эксплуатации в непроектном режиме со снижением объема и температуры дымовых газов из-за наличия неплотностей по тракту котел – дымовая труба, нарушений теплоизоляции и образования конденсата, разрушающего строительные материалы.

Характерными дефектами ДТ со стволом из кирпича являются:

- сквозные и несквозные вертикальные и горизонтальные трещины,
- разрушение кладки в результате попеременного замораживания и оттаивания,
- нарушение сцепления кирпича и раствора кладки от серноокислотной коррозии,
- расширение кирпичной кладки (бочкообразность) между бандажными поясами,
- деформация верхней части трубы (крен) вследствие сульфатации кирпичной кладки.

В железобетонных трубах разнообразные дефекты возникают в стволе, футеровке и теплоизоляции. Тепловизионная диагностика позволяет классифицировать эти дефекты, в основном либо в виде снижения сопротивления теплопередаче ствола (оседание утеплителя, разрушение футеровки, намокание железобетона), либо в виде присосов атмосферного воздуха (трещины ствола и повышенная пористость швов бетонирования)

Преимуществами тепловизионного метода обследования ДТ и газоходов по сравнению с визуальным осмотром являются следующие возможности

- обследовать объекты без останова котлов,
- обнаруживать дефекты, скрытые для глаз, в частности дефекты в слое теплоизоляции и внутренние трещины,
- классифицировать дефекты по степени их опасности для теплотехнического состояния ДТ и газоходов

Ограничения тепловизионного метода связаны

- с трудностями расшифровки ИК-изображений и их привязки к специфическим видам дефектов,
- с трудностями осмотра верхней части трубы из-за ограниченного угла зрения и крутого угла осмотра (устраняют путем удаления тепловизора от ДТ и применением узкоугольной оптики),
- с нагревом ДТ по образующей и наличием отраженного излучения вследствие солнечной радиации (устраняют, производя осмотр ДТ рано утром, поздно вечером или в пасмурный день)

9.3.3. Иллюстрации. (Рис 9 21 – 9 25 см. цветную вкладку) При составлении отчета по результатам тепловизионной инспекции ДТ используют как одиночные, так и панорамные термограммы, причем в последнем случае их получают с помощью средств компьютерной графики. Примеры панорамных термограмм показаны на рис 9 21

Применение термографии для диагностики металлических труб, как правило, неэффективно, за исключением футерованных труб. В частности, на рис 9 21, а хорошо видно разрушение верхней части футеровки металлической трубы нефтехимического предприятия. В кирпичных трубах преобладающим видом дефектов являются присосы атмосферного воздуха через трещины ствола (см. пример термограммы трубы с многочисленными дефектами на рис 9 21, б). Наиболее разнообразны дефекты в железобетонных трубах.

Следует отличать локальное ухудшение теплозащиты ствола, например, вследствие оседания или разрушения минераловатных плит, от круговых теплых зон, обусловленных конструкцией трубы в районе слезниковых рядов (см. термограммы на рис 9 21, в и рис 9 22). Швы бетонирования, как правило, выглядят в виде холодных колец вследствие повышенной пористости бетона. Иногда такие зоны распространяются на значительные площади, что свидетельствует о низком качестве бетона.

С помощью термографической диагностики можно оценить качество ремонта, которое может казаться удовлетворительным при визуальном осмотре. Такой случай изображен на рис 9 23, где ИК-термограмма наложена на фотографию кирпичной трубы, в которой был выполнен ремонт вертикальной трещины. Термограмма наглядно иллюстрирует наличие присосов воздуха через отремонтированную трещину.

Термограмма зоны примыкания газохода к стволу железобетонной ДТ (рис 9 24) иллюстрирует два типа характерных дефектов: ухудшение теплозащиты и присос атмосферного воздуха. Износ внутренней футеровки металлического газохода, наиболее сильный в зоне выхода газа из котла в газоход, показан термограммой на рис 9 25.

9.4. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Электроэнергетика является одной из областей наиболее успешного применения тепловидения, поскольку обнаруживаемые температурные градиенты могут достигать десятки градусов, что существенно облегчает их идентификацию на фоне помех

Ведущие энергетические компании (РЭУ) России используют тепловидение в течение нескольких десятилетий для штатной проверки открытых и закрытых распределительных устройств (ОРУ и ЗРУ). Основные требования к тепловизионной диагностике электроэнергетических установок изложены в соответствующих нормативах Минэнерго РФ (РД 34 45-51 300-97). Методические особенности таких обследований описаны в брошюре С.А. Бажанова [12]. Области применения ТК электротехнических устройств кратко описаны в табл. 9.1 и более подробно – в табл. 9.3

Ниже приведено описание основных особенностей ТК отдельных типов электротехнических устройств, заимствованное из [12]

По закону Джоуля-Ленца мощность тепловой энергии, выделяющейся в проводнике с током, пропорциональна сопротивлению проводника и квадрату тока. Ухудшение электрического контакта вследствие окисления и уменьшения пло-

щади контакта приводит к росту его сопротивления и повышению температуры. Дефекты в электрических соединениях образуются непрерывно, и опыт передовых стран показывает, что с помощью периодической ИК диагностики число возникающих и деградирующих дефектов можно поддерживать на некотором минимальном уровне

Основные преимущества метода:

- безопасное обслуживание,
- снижение эксплуатационных расходов,
- улучшенное и более дешевое техобслуживание,
- рост прибыли

9.4.1. Методические особенности ТК электрооборудования. Как и в других областях применения ТК, критерием отбраковки электротехнических узлов, находящихся под токовой нагрузкой, служит температурный сигнал (перепад) ΔT , который определяют как разность температуры контролируемого узла и либо температуры того же токоведущего проводника вдали от контролируемого участка, либо температуры окружающего воздуха. Особенности ТК электрооборудования связаны с тем, что испытания зачастую проводят на открытом воздухе, размеры участков контроля малы, а металлические по-

9.3. Применения ТК в электроэнергетике [12]

Электротехническое оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности
Генераторы	Межлистовые замыкания статоров Ухудшение паяк обмоток Оценка теплового состояния щеточных аппаратов Нарушения работы систем охлаждения статоров Проверка элементов систем возбуждения

Продолжение табл. 9.3

Электротехническое оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности
Трансформаторы	<p>Очаги возникновения магнитных полей рассеивания</p> <p>Образование засойных зон в баках трансформаторов за счет шламообразования, разбухания или смещения изоляции обмоток, неисправности маслосистемы</p> <p>Дефекты вводов</p> <p>Оценка эффективности работы систем охлаждения</p>
Коммутационная аппаратура	<p>Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер</p> <p>Состояние внутрибаковой изоляции</p> <p>Дефекты вводов, делительных конденсаторов</p> <p>Трещины опорно-стержневых изоляторов</p>
Маслонаполненные трансформаторы тока	<p>Перегревы наружных и внутренних контактных соединений</p> <p>Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток</p>
Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений	<p>Нарушения герметизации элементов</p> <p>Обрыв шунгирующих сопротивлений</p> <p>Неправильная комплектация элементов</p>
Конденсаторы	Пробой секций элементов
Линейные ВЧ заградители	Перегревы контактных соединений
КРУ, КРУН, токопроводы	Перегревы контактных соединений выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, кабелей, токоведущих шин и т.п.
Кабельное хозяйство электростанций	Перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей
Воздушные линии электропередач	Перегревы контактных соединений проводов

верхности контроля обладают хорошими отражающими свойствами

Блики отраженного солнечного излучения особенно заметны при использовании диапазона длин волн 3—5 мкм, одна-

ко нагрев объектов Солнцем заметен в любом спектральном диапазоне. Для исключения этого эффекта рекомендуют проводить съемку в ночное время или в облачную погоду. Аналогичное Солнцу

влияние оказывают посторонние теплые предметы, в особенности при ИК-съемке токоведущих частей, расположенных в закрытых объемах

Влияние ветра существенно при обследовании контактов ОРУ, расположенных на значительной высоте и не защищенных другими сооружениями. Учесть влияние ветра можно, используя формулу (2.7) или следующую формулу [12]

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{0.418} \quad (9.10)$$

где ΔT – температурные сигналы, служащие в качестве критерия отбраковки. Формула (9.10) справедлива для скоростей ветра $V < 7$ м/с, при $V > 8$ м/с измерения температуры становятся ненадежными.

Дождь, туман и мокрый снег существенно снижают сигналы ΔT и ухудшают резкость термоизображений, поэтому допускается проводить ИК-съемку лишь при небольшом снегопаде с сухим снегом или легком морозящем дожде. При обследовании подвесных изоляторов наилучшие результаты получают при повышенной влажности воздуха, способствующей увеличению токов утечки.

Поскольку температурные сигналы зависят от тока нагрузки I , результаты измерений следует приводить к определенной силе тока, составляющей, как правило, 50 % от номинального значения. Формула пересчета значений ΔT вытекает из закона Джоуля-Ленца

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 \quad (9.11)$$

При обследовании силовых установок (шин генераторов, реакторов) следует учитывать наличие мощных магнитных полей, которые способны исказить изображение на мониторе тепловизора, в особенности, если в мониторе применена электронно-лучевая трубка. В современных тепловизорах используют жидкокристаллические дисплеи, которые

менее подвержены влиянию магнитных полей.

Следует иметь в виду, что индукционные токи могут нагревать крепежные болты, пластины шиндержателей и другие элементы, создавая ложные отметки дефектов.

Коронный разряд может также создавать эффект перегрева объекта контроля, если использован тепловизор коротковолновой границей чувствительности около 2 мкм (спектр короны близок к 1 мкм).

Угол визирования объектов контроля должен быть в пределах $0 - 40^\circ$ для металлов и $0 - 60^\circ$ для диэлектриков, однако при более точных измерениях желательно визировать по нормали, поскольку изменение коэффициента излучения с ростом угла визирования плохо контролируется. При контроле ребристых поверхностей, например фарфоровых покрышек вводов, измерительных трансформаторов и т.п., действует сразу несколько факторов, связанных с углом визирования и коэффициентом излучения.

При компьютерной обработке результатов за искомое значение температуры можно принимать ее среднее значение по площади или выбранному участку объекта. Следует иметь в виду, что температура на поверхности фарфоровых покрышек определяется как нагревом обмотки вследствие прохождения электрического тока, так и диэлектрическими потерями в изоляции, которые характеризуются тангенсом угла потерь $\text{tg} \delta$. Для того, чтобы оценить вклад $\text{tg} \delta$, следует выполнить тепловизионные измерения без нагрузки, то есть при нахождении объекта только под рабочим напряжением.

9.4.2. Силовые трансформаторы, автотрансформаторы, масляные реакторы. Особенности тепловизионной диагностики трансформаторов изучены слабо, и тепловой метод рассматривается только в качестве дополнительного к штатным методам контроля хроматографии, анализу состава газа в масле и др. Проблема

состоит в том, что температурные сигналы на поверхности бака трансформатора косвенным образом связаны с внутренними дефектами, будучи обусловленными характером теплопередачи в магнитопроводе и обмотках, а также наличием нескольких источников тепловыделения вихревых токов и джоулевых потерь тепла в различных токоведущих частях. Опыт фирмы "ОРГРЭС" показал, что тепловидение способно выявить следующие неисправности [12]

- возникновение магнитных полей рассеивания за счет нарушения изоляции элементов магнитопровода (консоли, шпильки и т.п.),

- нарушения в работе систем охлаждения (маслонасосов, фильтров, вентиляторов и т.п.).

- изменения внутренней циркуляции масла в баке (образование застойных зон), в частности, у трансформаторов с большим сроком службы,

- нагреты внутренних контактов обмоток с выводами трансформатора,

- витковые замыкания в обмотках

Критериями дефектности служат нормативы работы электроустановок, содержащиеся в [127]. Например, температура верхних слоев масла при номинальной нагрузке должна находиться в пределах от 70 до 95 °С, а максимальная разность температур по высоте не должна превышать 20–35 °С

9.4.3. Маслонаполненные трансформаторы тока. Для данного типа трансформаторов ТК также является вспомогательным методом, и расшифровку результатов проводят с учетом результатов других испытаний (величины $\tan\delta$ изоляции, данных хроматографии, анализа масла и т.п.) Рекомендуется проводить осмотры один раз в год до наступления летней максимальной температуры. Каждую фазу трансформатора контролируют с трех точек сдвинутых на 120° друг относительно друга, используя эталонный ме-

тод сравнения однотипных зон по каждой фазе

При обнаружении разницы в температурах фаз более, чем на 0,3 °С. производят более тщательный анализ при других погодных условиях и гоковой нагрузке, а также проверяют симметричность токов в фазах. Несмотря на то, что основной целью испытания является оценка качества внутренней изоляции обмоток, также контролируют температуру в местах подсоединения зажимов трансформатора тока и оценивают состояние внутреннего переключающего устройства. В последнем случае сравнивают температуры на поверхности расширителя трех фаз. Считается, что превышение температуры на поверхности расширителя более чем на 10–15 °С может быть обусловлено аварийным дефектом внутреннего переключателя.

Особенности тепловизионных испытаний трансформаторов тока различного типа описаны в [12].

9.4.4. Маслонаполненные трансформаторы напряжения. Фарфоровые крышки трансформаторов напряжения, работающих в режиме насыщения, нагреваются по всей высоте, поэтому перегрев крышки на 0,3 °С не является основанием для отбраковки трансформатора. Аномально высокие температуры таких трансформаторов могут быть вызваны следующими причинами

- 1) дополнительными потерями в магнитопроводе,

- 2) увлажнением и загрязнением масла, сопровождающимся повышением значения $\tan\delta$,

- 3) конструктивными или технологическими факторами,

- 4) витковыми замыканиями в обмотке

Установление корреляции между наблюдаемыми температурными аномалиями и вышеуказанными причинами требует проведения дополнительных измерений, как и в случае трансформаторов тока

9.4.5. Выключатели масляные, воздушные, вакуумные, элегазовые. Внешние контакты и контактные соединения выключателей разнообразны по конструкции и в большинстве случаев могут быть проконтролированы тепловым методом. Результаты контроля оценивают по превышению температуры, регламентированному ГОСТ 9024-90. Общие сведения по тепловизионным испытаниям выключателей приведены в табл. 9.4.

При диагностике масляных выключателей следует осматривать поверхности

баков для каждой фазы с двух-трех сторон и при обнаружении локальных тепловых аномалий повторить измерения через 12-24 ч при изменившейся нагрузке.

При нормальной работе контактных дугогасительных камер температурные аномалии практически отсутствуют. Можно считать, что температуры масла в баке и на поверхности бака близки.

При ухудшении состояния контактной температуры масла возрастает за счет повышенного тепловыделения, и соответствующий участок поверхности становится теп-

9.4. Информация, получаемая при ТК выключателей (адаптировано из [12])

Контролируемый узел	Объем получаемой информации
Масломасляные выключатели 6 ... 10 кВ серий ВМГ-133, ВМП-10 и им подобные: шина-токоведущий вывод вывод-гибкая связь гибкая связь-свеча дугогасительная камера шина-нижний контакт бака	Измерение температуры узла контактной системы
Масломасляные выключатели 110 кВ и выше серий ВМТ, МГ-110 и им подобные: шина-токоведущий вывод токопровод неподвижного контакта к фланцу роликовый токосъем подвижный и неподвижный контакты опорная крышка	Измерение температуры узла контактной системы. Снятие термограммы для визуализации места и вида дефекта
Бачковые масляные выключатели: шина-токоведущий вывод дугогасительная камера	То же
Воздушные выключатели: шина-токоведущий вывод токоведущее соединение модулей дугогасительная камера емкостной делитель напряжения изоляционные воздуховоды	То же
Вакуумные и элегазовые выключатели: шина-токоведущий вывод контактная система выключателя	То же

лее по сравнению с другими фазами. Аварийные перегревы контактов в дугогасительных камерах приводят к появлению локальных перегревов за счет турбулентного перемешивания масла.

В воздушных выключателях, расположенных в фарфоровых покрышках, температуру контактов можно оценить по температуре металлических фланцев, соединяющих покрышки.

По элегазовым и вакуумным выключателям накопленная статистика отказов (перегревов) невелика, однако считается, что и в этом случае асимметрия температур покрышек фаз может служить индикатором дефекта контакта.

9.4.6. Разъединители и отделители.

В разъединителях и отделителях различных типов ИК контролю подлежат контактные соединения и изоляторы. Перегрев контактов вызывается:

- 1) низкой надежностью плакированных медью контактных выводов;
- 2) окислением поверхности;
- 3) ослаблением контактного нажатия и др.

Наиболее трудной задачей является оценка качества опорно-стержневых фарфоровых изоляторов. Измерения следует проводить при неотрицательных температурах и повышенной влажности воздуха, что усиливает токи утечки. Температура чистого исправного изолятора превышает температуру окружающей среды на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как перегрев загрязненного изолятора может достигать $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9.4.7. Маслонаполненные вводы.

Высоковольтные маслонаполненные вводы размещаются на силовых трансформаторах и масляных выключателях. В первом случае нижняя часть ввода находится в масле с температурой $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, а верхняя — в окружающем воздухе. Наибольшая температура внутри ввода соответствует зоне соединительной втулки. В случае масляных выключателей температура ввода по высоте практически постоянна

Тепловидение выявляет следующие дефекты маслонаполненных вводов:

- 1) перегревы в местах подсоединений внешних проводников к зажимам вводов;
- 2) образование короткозамкнутых контуров в расширителях герметичных вводов;
- 3) перегревы внутренних контактных соединений;
- 4) понижение уровня масла (температура резко изменяется в промежутке от бака трансформатора к расширителю ввода),
- 5) ухудшение качества масла (температура возрастает вследствие увеличения $\text{tg}\delta$);
- 6) нарушение циркуляции масла во вводе (возникают локальные перегревы фарфоровой покрышки).

9.4.8. Конденсаторы связи и делительные. Конденсаторы связи и делительные конденсаторы воздушных выключателей состоят из фарфоровой покрышки, внутри которой размещены три пакета по 90 секций рулонного типа. Редко наблюдаемые отказы этих устройств обычно вызваны окислением масла и, как следствие, повышением $\text{tg}\delta$. При этом возникает общий перегрев покрышки, усиливающийся в зоне расположения дефектного пакета. В случае обнаружения температурной аномалии такого вида следует:

- 1) произвести пофазное сравнение температур конденсатора;
- 2) уточнить пофазные токи нагрузки;
- 3) повторить испытания при низкой влажности воздуха;
- 4) измерить $\text{tg}\delta$.

9.4.9. Силовые конденсаторы. Силовые конденсаторы состоят из плоскопрессованных секций, набираемых в пакет. Диэлектрик секций может быть пропитан синтетическим или минеральным маслом. В первом случае наибольшая допустимая рабочая температура диэлектрика не должна превышать $+95\text{ }^{\circ}\text{C}$, во втором — $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Степень отбраковки силовых конденсаторов велика из-за необратимых процессов в диэлектрике, внутренних пробоев и перегревов, потери герметичности и т.п. Увеличение $\operatorname{tg}\delta$ на 15—20 % повышает температуру на поверхности конденсатора на 3—5 °С. Другой причиной перегрева может быть использование конденсаторов различной емкости, что приводит к нежелательному перераспределению напряжения.

9.4.10. Вентильные разрядники.

Вентильные разрядники, устанавливаемые на ОРУ, рассчитаны на напряжение от 15 до 500 кВ. Например, разрядники серии РВС на напряжение 110, 150 и 220 кВ конструктивно состоят из фарфорового кожуха с металлическими фланцами, блоков искровых промежутков и колонок рабочих резисторов. В свою очередь блок искровых промежутков включает фарфоровый цилиндр с четырьмя единичными искровыми промежутками, каждый из которых состоит из двух электродов и миканитовой шайбы.

Снаружи фарфорового цилиндра размещены два керамических подковообразных резистора, которые предназначены для выравнивания напряжения между последовательно соединенными блоками.

Тепловой метод позволяет контролировать исправность шунтирующих резисторов и искровых промежутков, герметизацию элементов и степень равномерности распределения рабочего напряжения по элементам разрядников.

Температура на каждом элементе разрядника линейно связана с его напряжением.

Предложены следующие признаки бездефектных разрядников:

1) верхние элементы в месте расположения шунтирующих резисторов нагреваются одинаково во всех фазах,

2) распределение температуры по элементам фазы разрядника практически одинаково.

Замыкание искровых промежутков вызывает перегрев незакороченных резисторов.

Обрыв шунтирующего резистора влечет разогрев других элементов этой фазы разрядника.

Специалистами фирмы "ОРГРЭС" (г. Москва) выработаны следующие рекомендации по тепловизионному обследованию вентильных разрядников с шунтирующими резисторами:

1) осмотр следует проводить не ранее чем через 6—8 ч после постановки разрядника под напряжение при положительной температуре и повышенной влажности окружающего воздуха,

2) температуру следует сравнивать пофазно, а также измерять в пределах одной фазы,

3) температуру на поверхности фарфоровой крышки элемента разрядника следует измерять в местах размещения блоков с искровым промежутком и шунтирующими резисторами,

4) тепловизор должен иметь температурную чувствительность не хуже 0,1 °С, а данные ТК следует дополнять измерением тока проводимости разрядника под рабочим напряжением.

9.4.11. Ограничители перенапряжений. Типичная конструкция ограничителей перенапряжений включает блок варисторов, заключенных в полимерную оболочку и установленных в изоляционной трубе. Неисправностями этих приборов являются:

1) нарушение герметичности,

2) увлажнение кварцевого песка,

3) смещение отдельных варисторов,

4) пробой варисторов,

5) протекание токов утечки под силиконовой рубашкой при плохом качестве склейки и др.

Основной принцип ТК ограничителей перенапряжений состоит в том, что исправные приборы характеризуются слабым нагревом. Увлажнение кварцевого песка и нарушение герметичности вызывает локальные перегревы на поверхности крышки. Соответственно, в месте расположения пробитого варистора температура снижается.

Следует заметить, что нагрев ограничителей перенапряжения может быть обусловлен тепловыми потоками от системы вентиляции силовых трансформаторов, солнечной радиацией и т.п.

9.4.12. Контактные соединения распределительных устройств и воздушных линий. Массовыми объектами контроля в электроэнергетике являются контакты ОРУ и ЗРУ. Установлено следующее распределение дефектов по контактам: болтовые соединения – 50 %, опрессованные и скрученные – 5,1 %, сварные – 1,3 %, контакты разъединителей – 43 %, провода – 0,6 %. Величины перегревов классифицируют по 3-м или 4-м уровням. Для ряда объектов в качестве критерия отбраковки используют рекомендации Международной Электротехнической Комиссии. При диагностике контактов можно рекомендовать следующие критерии отбраковки (в пересчете на 50 %-ную нагрузку):

- перегрев до 5 °С означает нормальный контакт,
- 5 °С – 35 °С – контакт подлежит обслуживанию при плановом ремонте,
- 35 °С – 85 °С – контакт подлежит обслуживанию при текущем ремонте,
- более 85 °С – необходим внеплановый ремонт контакта в срок не более 3-х месяцев.

Стопроцентный осмотр электрической подстанции средних размеров проводится в течение 1,5 – 2 ч одним-двумя операторами. Результаты фиксируют на цифровой носитель информации или на видеопленку (возможно звуковое сопровождение для идентификации объекта съемки). Результаты контроля используют для составления отчета, где содержится описание обнаруженных дефектов и рекомендации по ремонту.

ИК-термограммы могут сопровождаться обычной фотографией, что позволяет лучше идентифицировать объект контроля. Технологичным является фотографирование с помощью цифрового фо-

тоаппарата, что позволяет записывать видимое изображение на дискету и обрабатывать совместно с ИК изображением. Некоторые портативные тепловизоры, например модели ThermoCAM 695 и P60, позволяют проводить цифровую фотосъемку в том же ракурсе, что и ИК-съемку.

Причинами дефектных сварных соединений являются подрезы, воздушные пузырьки, каверны, непровары, наплывы, трещины, шлаковые и газовые включения (раковины), незаделанные кратеры, перегоревшие проволоки жилы, несоосность соединенных проводников, неправильный выбор наконечников, отсутствие защитных покрытий и т.п.

Дефекты сварки в петлях анкерных опор воздушных линий (ВЛ) могут вызвать аварийное отключение линии, причем период развития дефекта до аварийно-опасного зависит от тока нагрузки, ветра, вибраций и т.п. факторов.

Для осмотра ВЛ тепловизор устанавливают на вертолете. На одних вертолетах съемку производят через люк, на других необходимо снять боковое плексигласовое стекло и вести съемку под углом к линии электропередачи (ЛЭП). Анализ контактов ЛЭП возможен при скорости до 100 км/час.

В западной практике вертолет часто зависает сбоку от опоры для получения оптимального изображения. Бортовую съемку рекомендуется производить в предрассветные или вечерние часы (в крайнем случае, при пасмурной погоде) из-за возможных солнечных бликов от блестящих поверхностей и почвы. С помощью ИК-съемки можно зафиксировать уменьшение активного сечения провода более чем на 20 – 25 %, опасными признаются дефекты, создающие перепады температуры более 5 °С.

В опрессованных соединениях дефекты возникают из-за неправильного подбора наконечников или гильз, неполного ввода жил в наконечник, недостаточной степени опрессовки, смещения сталь-

ного сердечника в соединителе провода и т.п. Опрессованный соединитель считается исправным, если его сопротивление не более чем в 1,2 раза превышает эквивалентный участок целого провода.

Для болтовых соединений характерны дефекты из-за отсутствия шайб при соединении медной жилы с плоским выводом из меди или сплава алюминия, отсутствия тарельчатых пружин, недостаточной затяжки болтов и г.п. Чем выше ток, тем чаще следует проводить переборку болтовых контактов с зачисткой поверхностей. Рекомендуется ежегодный тепловизионный осмотр болтовых соединений, поскольку дефекты в них образуются непрерывно в зависимости от нагрузки, воздействия химических реагентов, степени затяжки и т.п.

В контактах, выполненных скруткой, имеют место дефекты монтажа: неполная скрутка приводит к вытягиванию провода из соединителя, а неочищенные провода создают высокое контактное электрическое сопротивление.

Две термограммы дефектных контактных соединений показаны на рис. 9.26. (См. цветную вкладку.)

9.4.13. Высокочастотные заградители. Высокочастотные заградители устанавливают на гирляндах изоляторов на подстанциях 110 кВ. Основным объектом ТК являются болтовые контакты, которые следует проверять 1 ... 2 раза в год, используя приведенные выше критерии отбраковки.

9.4.14. Подвесные фарфоровые и полимерные изоляторы. Гирлянды подвесных тарельчатых изоляторов характеризуются определенным (U-образным) распределением напряжения, которое изменяется при пробое отдельных изоляторов. Наибольшая температура приходится на изоляторы, примыкающие к фазному проводу; пробитые изоляторы имеют температуру окружающей среды. Вид температурных распределений различен для стеклянных и фарфоровых изоляторов.

Температурные перепады при наличии дефектов, как правило, не превышают 0,5 °С, поэтому при испытаниях изоляторов применяют тепловизоры с высоким температурным разрешением. Возможна ИК съемка с борта вертолета при небольшой скорости полета или при зависании вертолета над средней фазой; тепловизионную съемку проводят одновременно для верхних (расположенных у фазного провода) изоляторов всех трех фаз. Различие температур на поверхности верхних изоляторов не должно превышать 25 ... 30 %.

9.4.15. Силовые кабели. Тепловой контроль силовых кабелей проводят на стадии разработки, испытаний и эксплуатации. Обнаруживают участки с повышенным $\text{tg}\delta$, оценивают характер циркуляции масла в маслонаполненных кабелях и качество уплотнения пожарозащищенных кабелей, выявляют очаги разрушения изоляции, утонения оболочки, порывы алюминиевой оболочки и гофра. Температуру жилы кабеля определяют по эмпирическому значению температуры оболочки и расчетному перепаду температуры между оболочкой и жилой.

9.4.16. Аккумуляторные батареи. Тепловизионные испытания аккумуляторных батарей облегчены возможностью сравнения однотипных аккумуляторов и значительными температурными перепадами, которые возникают в случае следующих дефектов:

- 1) коротких замыканий внутри аккумулятора;
- 2) неисправных паяных и сварных соединений;
- 3) неравномерной токовой отдачи элементов;
- 4) аномальной температуры электролита;
- 5) зашламления.

9.4.17. Комплектные экранированные токопроводы. Токопроводы с секционированными экранами нагреваются, в основном, за счет вихревых токов, кото-

рые концентрируются на краях секций. Нарушение изоляции балок металлоконструкций или экранов токопровода приводит к образованию короткозамкнутых контуров, в которых циркулируют токи до 3000 А, что вызывает существенные локальные перегревы и может вызвать останов энергоблока.

В токопроводах с непрерывными экранами могут возникать дефекты типа нарушения изоляционных разрывов, что приводит к перегревам в зонах присоединения экранов токопровода к корпусам генератора и силового трансформатора. Температуру поверхности экранов контролируют в вышеуказанных зонах с помощью тепловизора.

Температура нагрева экранов не должна превышать 110 °С, а температура участков, где возможны прикосновения человека, не должна быть более 60 °С.

9.5. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

9.5.1. Паропроводы, паровые и водогрейные котлы. Основные показатели качества тепловой изоляции (ТИ) теплотехнических установок, максимально допустимые тепловые потери через ТИ и температуры наружных поверхностей регламентируются соответствующими нормами [128].

Качество теплоизоляции связано не только с предельными нормами теплопотерь, но и с расходом и стоимостью примененных материалов. Фактические тепловые потери могут отличаться от проектных вследствие низкого качества исполнения теплоизоляционных работ и сложности учета фактических условий внешней теплоотдачи. Кроме того, в процессе эксплуатации ТИ изменяет свои свойства, как правило, в сторону снижения термического сопротивления, в результате чего возрастают как тепловые потери, так и температура на поверхности установок. Прежде всего, это относится к ТИ оборудования и паропроводов высокого давления и темпе-

ратуры, а также к котельным обмуровкам, где большинство теплоизоляционных материалов работает при предельных температурах.

С учетом того, что каждый процент превышения норм теплопотерь эквивалентен перерасходу приблизительно 300 кг условного топлива в год на 1 МВт установленной мощности, затраты на содержание ТИ в надлежащем виде, а значит и систематический контроль, экономически целесообразны [14]. Применение для контроля ТИ контактных термощупов и преобразователей теплового потока (тепломера Шмидта, тепломера ИТП-2 и т.п.) не всегда возможно вследствие трудностей доступа к объекту контроля (наличие арматуры, балок, труб и т.п.). Трудоемкость обследований можно существенно снизить, используя тепловизионную аппаратуру.

Целями испытаний ТИ являются:

- 1) локализация и определение объемов ее разрушения перед ремонтом;
- 2) оценка качества ТИ при приемке после монтажа, ремонта или реконструкции;
- 3) обследование состояния ТИ и ее паспортизация;
- 4) определение суммарных теплопотерь через ТИ и оценка к.п.д. основного оборудования.

Во всех случаях проводят проверку соответствия параметров ТИ установленным нормам потерь тепла и температуры на ее поверхности. Полученные результаты испытаний позволяют путем сравнения их с нормативными или проектными показателями оценить состояние или качество выполненного ремонта ТИ, выявить дефектные участки, наметить пути устранения дефектов.

Испытаниям подлежит теплоизоляция основного и вспомогательного оборудования и трубопроводов с температурой теплоносителя выше 100 °С. Согласно действующим нормативам, при температуре воздуха в помещении 25 °С, температура на поверхности ТИ не должна пре-

вышать 45 °С при температуре теплоносителя, равной или менее 500 °С, и 48 °С – при температуре теплоносителя 500 ... 600 °С. Для объектов, расположенных на открытом воздухе, температура на поверхности ТИ не должна превышать 55 °С при металлическом покровном слое и 60 °С – при других видах покровного слоя.

Вследствие сложности и разнообразия оборудования электростанций все подлежащее испытаниям оборудование рекомендуется разбить на отдельные группы.

В котельных цехах испытывают трубопроводы питательной воды, водоперепускные трубы в пределах котла, паропроводящие трубы, барабан, пароперепускные трубы, коллекторы пароперегревателя, трубопроводы перегретого пара (основного и вторично перегретого), холодные линии вторично перегретого пара, установки подачи собственного конденсата, обмуровку котла, воздушный и газовый тракт котла, системы пылеприготовления.

В турбинных цехах испытаниям подвергают ТИ турбин, паропроводов перегретого пара, пароперепускных паропроводов от стопорных и регулирующих клапанов до турбины, трубопроводов питательной воды и конденсата, подогревателей, деаэраторов и т.п.

Во время испытаний измеряют температуру окружающего воздуха вблизи объектов контроля, поскольку на нее нормированы удельные теплотери и температура на поверхности теплоизоляции.

При обследованиях ТИ используют те же тепловизоры, что и при строительной диагностике, однако диапазон измеряемых температур должен быть расширен до +1500 °С; также более жесткие требования предъявляют к портативности прибора.

Перед началом испытаний необходимо ознакомиться с проектом ТИ паропроводов и технологического оборудования. Следует определить и при необходимости уточнить:

- 1) схемы ТИ паропроводов и оборудования;
- 2) конструкцию ТИ для каждого объекта;
- 3) использованные материалы;
- 4) расчетные общие и удельные теплотери через ТИ и температуру ее поверхности. Точки тепловизионной съемки выбирают с учетом доступности, наличия лестниц и площадок и т.п. При внешнем осмотре на схеме отмечают места с нарушенным покровным слоем, разрушения ТИ (провисание, сползание) и другие видимые дефекты. На участках с недостаточной толщиной ТИ измеряют температуру ее поверхности и температуру окружающего воздуха. Для лучшей привязки результатов обследования рекомендуется выполнить фотографическую съемку обнаруженных дефектов, желательно в тех же ракурсах, что и тепловизионная съемка.

9.5.2. Поверхности нагрева котельных агрегатов. Поверхность нагрева стационарного котла передает теплоту рабочей среде или воздуху. Трубы поверхностей нагрева, трубопроводов и коллекторов работают в тяжелых условиях, поэтому материалы для их изготовления выбирают с учетом параметров внутренней и внешней среды. Основное внимание при обследовании уделяется как визуальному осмотру поверхностей нагрева на предмет выявления видимых нарушений, так и тепловизионной съемке, осуществляемой в зонах прямой видимости котла.

Визуальный осмотр поверхностей нагрева выведенных из работы котлоагрегатов совмещают с тепловизионной съемкой, создавая архив визуальных изображений и термограмм, которые могут быть использованы при последующих осмотрах.

Тепловизионный контроль забитости труб паровых и водогрейных котлов проводят как на стадии завершения ремонта, так и до него. Для проведения тепловизионного обследования обеспечивают подачу теплой воды (40 .. 60 °С) через поверхности нагрева котла. В процессе термографии маркируют (отмечают) забитые

участки труб и другие аномалии (дефекты), выявленные при визуальном осмотре. Рекомендуется производить запись на цифровую фото- или видеокамеру с привязкой термограмм к местам дефектов.

После проведения осмотра и сбора информации производят анализ результатов, выявляют возможные причины повреждений и оценивают степень их влияния на состояние труб поверхностей нагрева. При визуальном осмотре выявляют следующие группы дефектов:

- дефекты металлургического происхождения (плены, закаты, трещины и т.п.);
- дефекты термической обработки (коррозия, окалинообразование и т.д.);
- технологические дефекты, возникающие при изготовлении, монтаже и ремонте котла (гофры на гнутых участках труб, утонение стенок, вмятины, задиры и т.д.);
- наружные загрязнения поверхностей нагрева (сажа, шлакозольные отложения и т.п.).

Забитость или частичная проходимость труб поверхностей нагрева определяют по термограмме, на которой холодные зоны соответствуют локальной непроходимости трубок; соответственно горячие зоны указывают на нормальное состояние данного участка поверхности нагрева.

Забитость трубок определяется следующими факторами:

- 1) послемонтажной загрязненностью поверхности котла из-за отложения на ней оксидов железа;
- 2) загрязненностью сварочным графом, песком, землей и посторонними предметами;
- 3) эксплуатационной загрязненностью внутренней поверхности котла из-за отложений в виде кальциевых соединений и оксидов железа.

9.5.3. Пруды-охладители. ИК съемка прудов-охладителей, фиксирующая картину распределения температуры по по-

верхности акватории, дает возможность определить тепловые течения в водохранилищах, оценить эффективность охлаждения воды, выявить несанкционированные сбросы в водоемы, влияющие на тепловой режим энергетического оборудования тепловых электростанций (ТЭС). В частности, повышение температуры воды, поступающей на конденсаторы турбин, на 1°C по сравнению с расчетной для ТЭС мощностью 4 млн. кВт вызывает перерасход топлива примерно на 25000 тонн топлива в год.

Съемку выполняют с борта вертолета в два этапа. Вначале с высоты 200 ... 300 м снимают пруд по периметру с "привязкой" к береговым объектам, в результате чего устанавливают распределения температуры в местах сброса и забора циркуляционной воды, а также выявляют места несанкционированных сбросов в водоемы. Затем съемку повторяют тепловизором с широкоугольным объективом с высоты не менее 1000 м, в результате чего получают общую картину распределения температуры по поверхности пруда.

При невозможности получить изображение пруда в пределах одного кадра выполняют мозаичную съемку, после чего отдельные термограммы "сшивают" с помощью соответствующих компьютерных программ (в последние годы появились специализированные программы, предназначенные для составления панорамных термоизображений с учетом угловых искажений, параллакса и других факторов). Рекомендуется параллельно с тепловизионной съемкой производить обычную видеосъемку, в том числе, со звуковым комментарием для лучшей привязки термограмм к наземным объектам. Излучательная способность воды весьма высока (до 0,96 ... 0,98) при углах визирования, близких к нормали. При больших углах визирования имеют место явления зеркального отражения, в результате чего точность определения истинных температур может быть низкой.

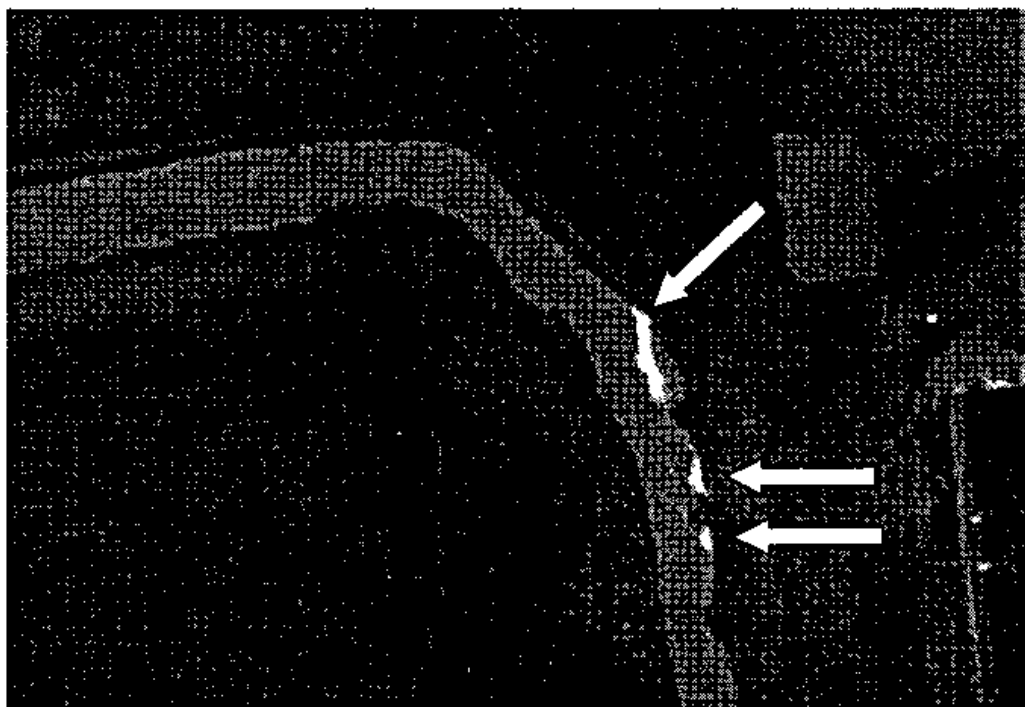


Рис. 9.27. Воздушный мониторинг мест несанкционированного сброса воды в пруд (с разрешения Г. Стоктона, Stockton Infrared Services, США)

Поскольку тепловизионную съемку прудов-охладителей проводят на значительных расстояниях, поглощение в атмосфере, отраженное солнечное излучение, осадки и туман могут оказывать существенное влияние на точность измерений. Рекомендуется выполнять съемку в пасмурный день при отсутствии ветра, тумана и дождя.

Требования к тепловизорам – стандартные. Термограммы можно регистрировать как на РСМС1А карту (или флэш-карту), так и на видеоманитофон. На итоговой панорамной термограмме пруда идентифицируют участки сброса и забора циркуляционной воды, а также места несанкционированных сбросов воды, если таковые имеются. В качестве примера на рис. 9.27 показана термограмма мест несанкционированного сброса воды в реку. Сбрасываемые воды имеют более высокую температуру и их "хвосты" хорошо видны при воздушной съемке (на рис. 9.27 показаны стрелками).

После анализа полученной информации можно сделать вывод об эффективности охлаждения воды и степени влияния

различных факторов, мешающих охлаждению. Результаты тепловизионной съемки могут быть использованы для изменения теплового режима пруда-охладителя, что позволяет путем снижения температуры циркуляционной воды повысить глубину вакуума в конденсаторе турбины и соответственно увеличить мощность и к.п.д. турбоустановки.

9.5.4. Тепловые сети. Контроль состояния подземных тепловых сетей основан на дистанционном измерении поля температуры на поверхности грунта над теплотрассой, причем места скрытых утечек идентифицируют либо по искажениям регулярных температурных профилей, либо путем сравнения измеренных значений температуры с расчетными, полученными методом математического моделирования возможных нарушений теплового режима сетей (дефектов).

За рубежом наибольший опыт накоплен в скандинавских странах, в особенности в Дании и Финляндии, где фирмы, осуществляющие ИК-термографическую съемку городских тепловых сетей, пользуются поддержкой местных властей.

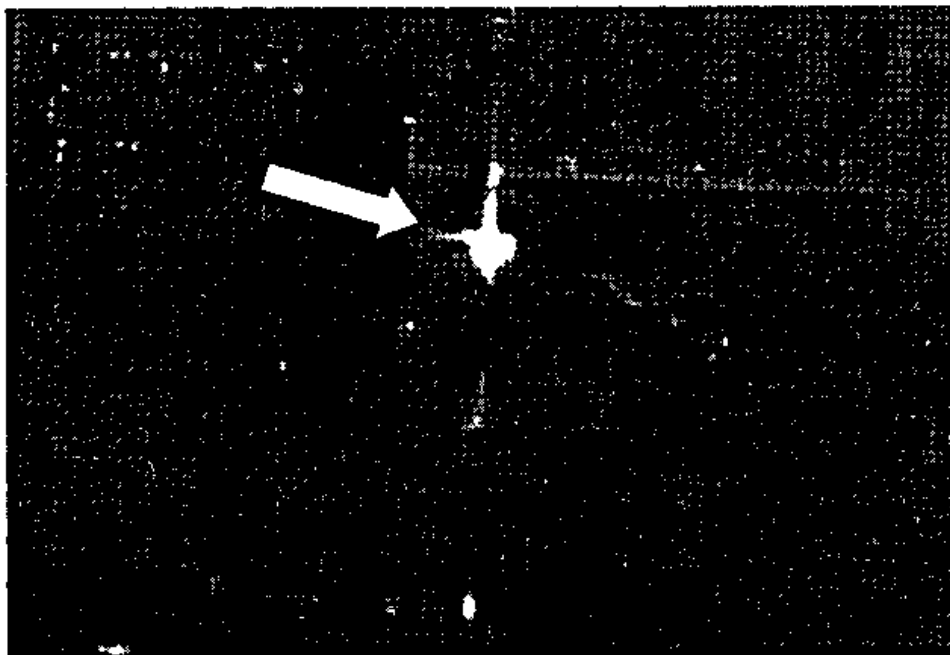


Рис. 9.28. Термограмма участка подземной теплотрассы, полученная аэросъемкой (с разрешения Г. Стоктона, Stockton Infrared Services, США)

Следует заметить, что проведение телевизионной съемки во многих зарубежных странах облегчено небольшой глубиной залегания теплотрасс и отсутствием железобетонных лотков.

В России карты тепловых сетей снимали в г. Москве, Санкт-Петербурге и некоторых других городах, используя отечественные бортовые тепловизоры. Помимо утечек теплой воды, телевизионная съемка позволяет уточнить схемы прохождения тепловых коммуникаций.

Подготовку к измерениям начинают с изучения участка тепловой сети: типа прокладки, конструкции изоляции, ее состояния и т.д. При этом используют паспортные данные, исполнительные чертежи, отчетность теплосети, результаты осмотра участка со вскрытием тепловых камер и т.п. Поверхностную температуру грунта измеряют при перепаде температур между наружным воздухом и водой в тепловой сети, превышающим минимально допустимый перепад ΔT_{\min} , определяемый по формуле

$$\Delta T_{\min} = \Delta T_{\text{рез}} R \frac{\alpha R_0}{1 - R_0}, \quad (9.12)$$

где $\Delta T_{\text{рез}}$ – температурное разрешение (чувствительность) тепловизора, °С; R – проектное сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности грунта, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; R_0 – относительное сопротивление теплопередаче подлежащего выявлению дефектного участка, принимаемое равным отношению значения, требуемого нормативно-технической документацией, к проектному значению сопротивления теплопередаче (но не более 0,85). Величину α на поверхности грунта определяют по формуле

$$\alpha = \beta \sqrt{V} \left(6 + \frac{6,2}{V^2} \right), \quad (9.13)$$

где β – численный коэффициент (1,2 – для грунта; 1,4 – для асфальта); V – скорость ветра, м/с.

Температуру грунта измеряют при условиях, близких к стационарным, при отсутствии атмосферных осадков, тумана и задымленности. Обследуемая поверхность не должна находиться в зоне прямого или отраженного солнечного излучения. Учитывая изменения радиационного

баланса Земли, измерение температур грунта лучше всего производить за 2 ... 3 часа до восхода Солнца. Обследуемая поверхность грунта должна быть по возможности ровной, свободной от травяного покрова, воды, камней и т.п.

Пример термограммы городской теплотрассы, полученной с борта самолета, приведен на рис. 9.28; хорошо прослеживается трасса подземной трубы и видна область существенной утечки теплой воды (отмечена стрелкой). В российских условиях теплотрассы расположены достаточно глубоко, и соответствующие поверхностные температурные сигналы размыты. Наилучшие результаты получают при съемке со значительной высоты (вплоть до борта вертолета или мотодельтаплана).

Типовая процедура обработки результатов состоит в сравнении измеренной максимальной температуры поверхности грунта над теплотрассой с расчетной максимальной температурой поверхности грунта для данного участка, которую определяют по данным натурных измерений или согласно нормативно-технической документации.

Тепловизионный метод пригоден для выявления участков теплотрасс с повышенными теплопотерями, обусловленными увеличением коэффициента теплоотдачи вследствие увлажнения или разрушения ТИ, затопления канала водой и т.д. С определенной точностью данный метод позволяет определять места утечек теплоносителя из трубы, уменьшая зону вскрытия грунта над теплотрассой, снижая трудозатраты и тем самым уменьшая объем землеройных работ. Эффективность тепловизионной съемки можно повысить, используя дополнительно УЗ-аппаратуру обнаружения утечек.

9.5.5. Вакуумное оборудование турбоустановок. Качество вакуумно-плотных соединений в турбинных установках ТЭС влияет на расход топлива. Штатный контроль вакуума по перепаду давления не позволяет идентифицировать дефектные места, а использование течейскаателей

неэффективно в силу чисто технических проблем, например трудного доступа к зонам контроля. Применение ИК-термографии основано на том, что при натекании атмосферного воздуха в места неплотных соединений установок, имеющих повышенную температуру, возникает эффект охлаждения, который тем заметнее, чем больше объем натекаемого воздуха (выше вакуум или больше дефект).

В России систематические исследования по обнаружению мест нарушения вакуума в турбоустановках ТЭС не проводились и соответствующие методические указания отсутствуют. В США на атомной станции Peach Bottom (Peco Energy Company) ИК-термография является штатным методом анализа состояния конденсаторов, основная функция которых состоит в конденсировании выходного пара из паровых турбин низкого давления.

Максимальная эффективность работы конденсатора достигается поддержанием вакуума в турбине на минимально возможном уровне. Тем не менее, на практике возможно натекание атмосферного воздуха величиной до нескольких кубометров в минуту.

Основными зонами нарушения вакуума являются:

- 1) уплотнения турбины;
- 2) устройства удаления воздуха;
- 3) смотровые окна и лазы;
- 4) клапана и фланцы;
- 5) сварные соединения и т.п.

На атомной станции Peach Bottom внедрена программа использования ИК-термографии для обнаружения мест натекания воздуха в вышеупомянутых компонентах. Подчеркивается, что роль данного метода – скорее качественная, нежели количественная [129].

Поскольку степень вакуума и структура соответствующих систем на атомных и тепловых станциях аналогичны, следует ожидать, что ИК-термографию можно применить и на ТЭС. Фрагментарный опыт автора в данной области показал, что в некоторых вакуумплотных соединениях

вид температурных распределений в случае нарушения вакуума изменяется столь значительно, что идентификация протечки возможна даже оператором с небольшим опытом термографии. Тем не менее, во многих случаях, в частности при инспекции фланцевых соединений, интерпретация результатов съемки является нетривиальной и требует систематических исследований.

По-видимому, необходимо накопить атласа "бездефектных" термограмм, с которыми следует сравнивать результаты текущих осмотров.

Две иллюстрации достаточно очевидных дефектов, обнаруженных на одной из российских ТЭС, приведены на рис. 9.29 цветной вкладки (дефекты отмечены стрелками).

9.6. АТОМНЫЕ СТАНЦИИ

Программы технического обслуживания типичной атомной станции предусматривают до 50 тысяч тестовых процедур, среди которых возрастает роль пассивной ИК-термографии. В США тепловой метод внедрен на всех атомных станциях. В Великобритании на станции Heysham первые применения ИК-термографии были связаны с диагностикой работы электродвигателей мощностью 1,6 кВт; затем тепловизионный контроль стали применять для диагностики коммутационной аппаратуры, клапанов и теплоизоляции.

Примером удачного применения ТК явилась оперативная локализация утечки пара с температурой +550 °С из турбины, что позволило избежать дорогостоящей остановки турбины.

ИК термографическая съемка использовалась для мониторинга температуры разрушенного энергоблока Чернобыльской АЭС; имеются сведения о применении теплового метода для проверки ОРУ и ЗРУ на ряде российских атомных станциях, тем не менее, как средство штатного контроля в отечественной атомной промышленности тепловидение до сих пор применяется слабо.

9.7. АВИАКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

В авиакосмической технике широко используют *новые материалы* (композиционные, сотовые, структуры металламметалл), включая силовые элементы и покрытия, характеризующиеся более высокими значениями отношения прочностных и других характеристик к массе по сравнению с металлами и сплавами. Из таких материалов изготавливают панели космических ракет и самолетов, лопасти вертолетных винтов, компоненты двигателей и т.п. Срок службы изделий, в том числе в агрессивной среде, может быть весьма велик, по крайней мере, если в них отсутствуют дефекты. Дефекты в новых материалах существенно отличаются от дефектов в металлах, будучи связанными с поверхностями раздела между слоями, наличием воды в пористых и сотовых слоях, нарушениями сцепления матрицы и наполнителя и т.п.

Большая площадь панелей ракет и самолетов, а также высокая стоимость простоя авиационной техники делают особенно актуальным компромисс между чувствительностью конкретного метода НК и производительностью испытаний. В этом аспекте применение ТК в авиации особенно эффективно.

Например, в США предприятия авиакосмического профиля образуют основной рынок потребителей систем активного ТК. В последние годы успешно работает фирма Thermal Wave Imaging (TWI), предлагающая на мировом рынке системы ThermoScope и EchoTherm (см. табл. 7.1). В данных системах использован принцип синтетической обработки термографических сигналов (Synthetic Thermographic Signal Processing-STSP), составляющий ноу-хау фирмы. Судя по публикациям и рекламным проспектам фирмы TWI, сущность технологии STSP состоит в импульсном нагреве объекта, записи последовательности ИК-термограмм с помощью тепловизора большого формата и высокой

чувствительности, полиномиальной аппроксимации и составлении карт характерных времен теплопередачи (см. п. 5.10.3). Последнее достижение фирмы: разработка программного продукта MO-SAIQ, который позволяет синтезировать крупномасштабные изображения больших поверхностей контроля (фюзеляжа самолета) из набора отдельных термограмм.

9.7.1. Концепция применения ТК в авиации при выполнении ремонта. Американской фирмой Nordam Repair Division разработана концепция выбора оптимального метода НК при дефектоскопии, а также проверке и документировании результатов ремонта самолетных панелей [130]. Фирма руководствовалась следующими требованиями.

- Метод должен выявлять дефекты различного типа (интрузию воды/масла, расслоения, коррозию, непрочности и т.п.).
- Метод должен сканировать поверхность и по возможности создавать изображение.
- Метод не должен требовать извлечения объекта контроля из самолета или его существенного демонтажа.
- Оценка результатов должна производиться непосредственно на месте контроля.
- Результаты испытаний должны хорошо документироваться и архивироваться для возможных последующих ссылок.
- Аппаратура должна быть переносимой и монтироваться в течение короткого времени.
- Аппаратура должна быть пригодной для пользования операторами I-го уровня.
- Внедрение аппаратуры не должно сопровождаться существенной реорганизацией сложившейся системы проверки результатов ремонта.

В дополнение к традиционным звуковому, УЗ и радиографическому НК, компания Nordam начала широкое внедрение теплового и широкографического

методов, которые в значительной степени отвечают вышеприведенным условиям. Компьютерная система ТК, поставленная фирмой Thermal Wave Imaging, используется для проверки следующих авиационных изделий:

- 1) углеродных, стеклопластиковых и кевларовых панелей;
- 2) композиционных и металлических сотовых панелей;
- 3) металлических и композиционных акустических панелей;
- 4) экранов из нержавеющей стали, соединенных с алюминиевыми или композиционными акустическими обшивками.

В качестве существенного преимущества ТК по сравнению с УЗ отмечается его более высокая производительность. В работе [130] приведен пример ТК руля направления самолета Боинг-737 площадью примерно 6,5 м², который длился 3 ч и обнаружил ослабление связующего материала композита в месте удара молнии. УЗ-контроль такой панели длился бы 7 ч.

9.7.2. Обнаружение воды в сотовых панелях самолетов. Среди специалистов утвердилась точка зрения, что ТК, будучи менее чувствительным, но гораздо более производительным, чем, например, УЗ-метод, служит дополнением к штатным методам НК. Поэтому тепловой метод часто рассматривают в качестве *скринингового* (screening). Хорошей иллюстрацией этому положению является комбинирование пассивного ТК и УЗ-контроля воды в сотовых структурах самолетов.

Сотовые конструкции представляют собой две обшивки, между которыми находятся ячеистые соты, причем комбинации материалов, используемых для обшивки и сот, могут быть весьма разнообразными.

В отечественных самолетах ИЛ-86, ИЛ-96 и других используют соты, в которых обшивка выполнена из дюралюминиевых листов толщиной 0,5 ... 1 мм, а соты изготовлены из дюралюминиевой фольги толщиной 0,1 мм. В самолетах

нового поколения, например ТУ-204 и ЯК-42, применены композиционные соты. В космической технике применяют сотовые конструкции, включающие обшивку из стекло- и углепластика, соты – из алюминия и бумаги типа Nomex.

Основными дефектами сотовых конструкций являются:

1) отслоение сот от обшивки вследствие непрочности и смятия стенок ячеек (данный вид дефекта возникает как в силу технологических причин, так и в ходе эксплуатации самолетов);

2) наличие воды в одной или нескольких ячейках (возникает в ходе эксплуатации самолета в результате попадания воды извне через технологические неплотности панелей крыльев, фюзеляжа, киля и других частей самолетов).

Штатными методами НК воды в сотах являются радиационный и УЗ.

Радиационный НК эффективен при двустороннем доступе к изделиям вследствие высокого контраста воды на фоне тонких алюминиевых листов. Однако данный метод практически неприменим в тех случаях, когда невозможно обеспечить двусторонний доступ к самолетной панели (односторонний радиационный контроль остается весьма дорогим методом НК).

Далее, сплошной радиационный НК сотен и тысяч квадратных метров поверхности фюзеляжа требует большого количества дорогостоящей рентгеновской пленки, в то время как рентгенотелевизионный метод до сих пор мало используют на практике.

Кроме того, специфические требования к технике безопасности делают радиационный контроль малоприменимым на гражданских авиалиниях, где в условиях ангара производят одновременно несколько разнородных операций диагностики и ремонта (еще более проблематичным является радиационный контроль на взлетно-посадочной полосе). Наконец, радиа-

ционный контроль не обеспечивает локализацию и количественную оценку влаго-содержания.

Ультразвуковой НК является чувствительным к наличию воды, прилегающей к обшивке (испытания проводят на нижней поверхности авиационных панелей), позволяя оценить толщину водяного столбика по времени запаздывания УЗ-сигнала (по отечественным данным, предел обнаружения около 2 мм).

Основным недостатком УЗ-метода, по крайней мере, на примере российских авиакомпаний, помимо его контактного характера, является низкая производительность испытаний; кроме того, УЗ-контроль неприменим на вертикально-ориентированных поверхностях, например на киле.

Тепловой метод обнаружения воды в авиационных сотовых панелях принят в качестве штатного европейским концерном Airbus Industry и американской фирмой Boeing Commercial Aircraft (в последнем случае разработаны нормативные документы и метод одобрен Федеральной Авиационной Администрацией – FAA).

В пассивном режиме воду в сотах можно обнаруживать в течение некоторого времени после посадки самолета, используя большую разность температур на земле (от +20 до -20 °С) и за бортом в условиях крейсерского полета (до -50 °С). Замерзшая вода сохраняет температуру ниже 0 °С в течение длительного времени, при этом тепловое изображение дефектов имеет специфический вид, облегчающий идентификацию воды.

Рис. 9.30 – 9.32 см. на цветной вкладке.

Пример термограмм, полученных при обследовании самолетов ТУ-204 и ИЛ-96, приведен на рис. 9.30 и рис. 9.31 (совместные исследования фирм "ПЕРГАМ" и

Томского НИИ интроскопии). Представляет интерес сравнить результаты ИК термографического и данные УЗ-контроля, которые были получены несколькими месяцами ранее.

Для многих зон совпадение данных было удовлетворительным (рис. 9.30, *а*); в ряде зон наблюдались расхождения по форме областей, занятых водой, что можно объяснить как миграцией ранее запасенной воды, так и инфильтрацией новых порций воды в период между двумя проверками. Полное время тепловизионного осмотра зон, подлежащих контролю на одном самолете, не превышает 1 ч, включая осмотр с земли таких труднодоступных участков, как киль и рули высоты (рис. 9.30, *б*).

Данные рис. 9.31 показывают, что пассивный ТК способен обнаруживать воду не только в композиционных, но и в алюминиевых панелях. Активный способ ТК воды в авиационных сотовых панелях, выполненных из композиционных материалов, используется европейским концерном Airbus Industry [131]. Нагрев производят с помощью "теплого одеяла", которое накладывают на часть фюзеляжа и нагревают электрическим током.

В России активный способ находится в стадии разработки [132]. На рис. 9.32, *а* показана система активного ТК воды в сотах, предложенная фирмами "ПЕРГАМ" и Томским НИИ интроскопии. Оптический нагреватель, состоящий из 8 галогенных ламп с полной мощностью 3 кВт, выполнен в виде рамки, соосно с которой расположен тепловизор типа Thermovision 570 или ThermoCAM 695. Процедура контроля состоит в последовательном нагреве участков размером 0,5 × 0,5 м и последующей сшивке отдельных термограмм в панорамное термоизображение.

Активный способ применим к окрашенным алюминиевым поверхностям, однако и в этом случае значительную трудность представляет излучение ламп, отраженное от контролируемой поверхно-

сти. Участки сот, заполненных водой массой более 3 ... 6 г, проявляются на поверхности в виде характерных холодных зон (рис. 9.32, *б-е*). Наилучшие результаты были получены на сотах с обшивкой из композиционных материалов, например стеклопластика или углепластика, а также на стальных сотах (рис. 9.32, *з-е*). Температурные сигналы в таких сотах сохраняются в течение длительного времени при хорошем воспроизведении формы областей, заполненных водой, в отличие, например, от сот с алюминиевой обшивкой, где форма сигнала размыта и сам сигнал сохраняется в течение 2 ... 6 с (рис. 9.32, *б, в*).

В полном соответствии с теорией ТК, оптимальным объектом контроля являются соты, изготовленные из алюминиевых сот со стеклопластиковой обшивкой (рис. 9.32, *з*); в этом случае удается отследить текстуру отдельных ячеек и, следовательно, выявить не только воду в ячейках сот, но и отслоения сот от обшивки.

Как отмечено выше, одним из основных недостатков оптического способа нагрева является отраженное излучение ламп (для его подавления в нагревателях типа рис. 9.32, *а* используют шторы, перекрывающие излучение нагрева в момент регистрации). Соты, выполненные из композиционных материалов, можно нагревать менее мощными нагревателями, например, феном. Большой интерес представляет СВЧ нагрев, обеспечивающий селективное выявление зон скопления воды в сотах с неметаллической обшивкой, однако отсутствие коммерческих рупорных СВЧ нагревателей и необходимость защиты персонала от СВЧ излучения препятствует внедрению этого способа.

Система, подобная описанной выше, используется фирмой Boeing Commercial Aircraft (США) в виде роботизированного комплекса, что позволяет автоматизировать процедуру нагрева и обработки данных.

9.7.3. Обнаружение воды в теплозащите космических челноков. Корпус

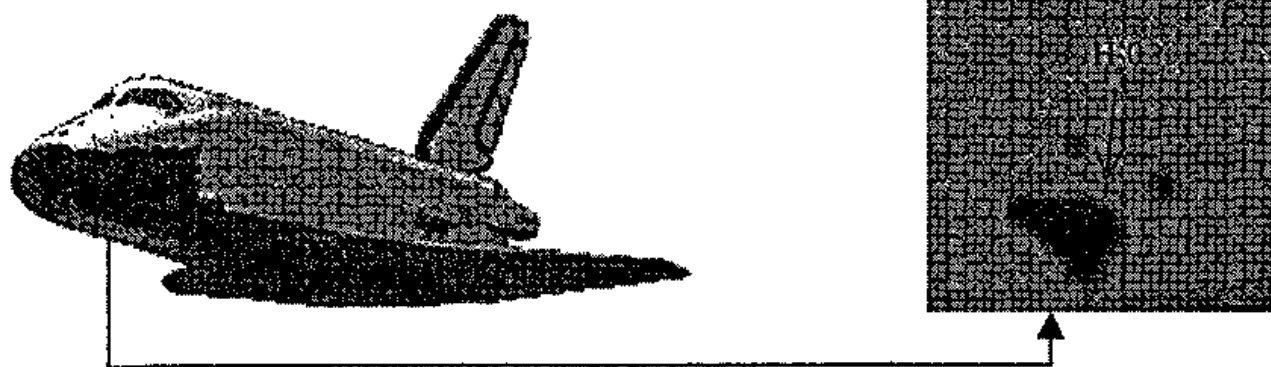


Рис. 9.33. Вода, проникшая в теплозащитную плитку космического челнока "Буран", видна на термограмме вследствие естественного испарения (снято прибором ТВ-03 – одним из первых отечественных серийных тепловизоров)

космических кораблей-челноков защищен специальным теплозащитным слоем, который предотвращает перегрев и разрушение корпуса при прохождении корабля через плотные слои атмосферы. Теплозащитный слой обладает весьма высоким термическим сопротивлением и способен эффективно противостоять высоким температурам. Защитное покрытие этого слоя должно препятствовать проникновению воды внутрь теплозащиты, однако возникающие в процессе эксплуатации кораблей трещины покрытия приводят к тому, что отдельные теплозащитные плитки могут набирать воду массой, значительно превышающей массу сухих плиток.

Механизм обнаружения воды в теплозащите кораблей-челноков связан как с переходными режимами при посадке, так и с естественным испарением воды через нарушения защитного покрытия. В США была реализована программа SILTS, которая предусматривала размещение тепловизоров на самолетах, встречающих космические челноки. В этом случае увлажненные теплозащитные плитки могут быть обнаружены непосредственно в процессе посадки. Аналогичные работы были выполнены в СССР по программе создания космического корабля "Буран" (рис. 9.33). Отечественные исследователи вплотную подошли к количественной оценке влагосодержания как в пассивном режиме (по площади дефектных зон), так и в активном

режиме (при дистанционном нагреве теплозащиты). Однако, в силу известных причин, исследования в данной области были свернуты и не возобновлены.

9.7.4. Турбинные лопатки. Газовые турбины широко используются в энергетике и двигателестроении. Вне зависимости от области применения, эффективность их работы во многом определяется качеством лопаток, которые должны противостоять высоким температурам, сопровождающим эксплуатацию турбин. Тепловой метод успешно применяют для контроля за состоянием внутренних каналов лопаток и теплозащитных покрытий, и в меньшей степени для обнаружения поверхностных и подповерхностных трещин.

Помимо лабораторных исследований, описанных ниже, в последние годы появились компании, которые предлагают коммерческие системы ТК лопаток. Например, фирма Thermosensorik (Германия) создала роботизированную установку импульсного ТК турбинных лопаток (см. табл. 7.1), которая предназначена для автоматизированных испытаний с элементами тепловой дефектометрии.

Контроль состояния внутренних каналов лопаток газотурбинных двигателей. Для минимизации потребления топлива и повышения общей эффективности авиационные газовые турбины должны работать при максимально высоких

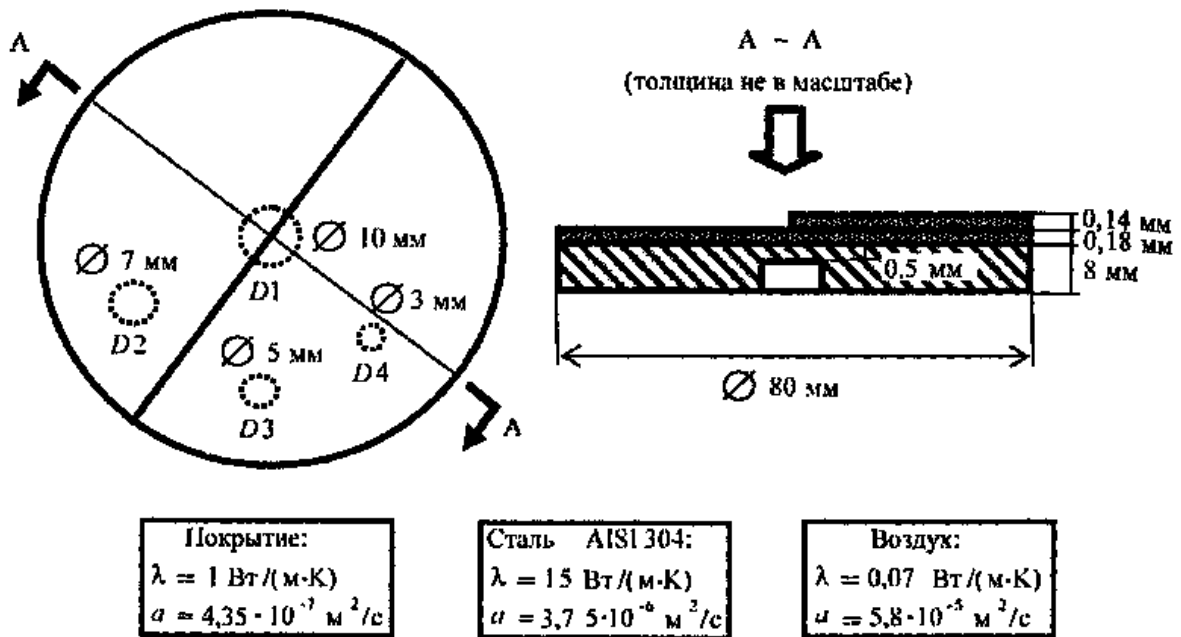


Рис. 9.34. Схема стандартного образца теплозащитного покрытия турбинных лопаток фирмы CESI (Италия)

температурах, давлении и скорости вращения. Эти экстремальные условия создают особые требования к качеству изготовления турбинных лопаток.

Технология изготовления лопаток достаточно сложна, поэтому возможно появление таких дефектов в системе охлаждения, как засорение каналов, "уход" размеров и смещение каналов, залив отверстий и т.п.

В промышленности используют УЗ, рентгеновский, а также нейтронный контроль качества турбинных лопаток. Ультразвуковой метод малопроизводителен, сопровождается шумовыми отражениями ультразвука от элементов внутренней структуры лопаток и, в принципе, малопригоден для испытаний сплавов на основе никеля, из которых изготавливают лопатки. Результаты радиационного контроля сложны в интерпретации из-за затеняющего действия элементов внутренней структуры, и только метод компьютерной томографии позволяет получать приемлемые изображения сечений лопаток, а также измерять толщину стенок с точностью до 0,1 мм.

К. Малдаг с соавторами показали, что засорение внутренних каналов эффектив-

но обнаруживается по аномалиям поверхностного теплового поля путем пропуска горячего (холодного) воздуха или жидкости через каналы лопатки [133].

В России аналогичная процедура продувки лопаток горячим воздухом разработана во ФГУП ВИАМ [134]. Испытательный стенд включает камеру из ИК-прозрачного материала (ИК-керамики), которая представляет собой профилированный корпус, воспроизводящий межлопаточный канал решетки в среднем сечении, устройство крепления контролируемых лопаток, блок нагревателей, блок расходомеров, интерфейс и компьютер. Аналогичная система коммерческого типа разработана также в НПО "Салют".

Испытано более 10 типов охлаждаемых турбинных лопаток (Д18, АЛ31Ф, оболочковые паяные лопатки, лопатки двигателей Pratt & Whitney). Установлено, что ТК позволяет с погрешностью не более 10 % определять изменение диаметра внутренних отверстий системы охлаждения паяных оболочковых лопаток, а также выявлять остатки керамики (перекрытие одного канала приводит к поверхностному температурному сигналу до 1,6 °С на уровне 50 °С).

Коммерческая система ТК внутренних каналов турбинных лопаток разработана ФГУП "Салют".

Контроль качества теплозащитных покрытий. Теплозащитные покрытия предохраняют основные металлические компоненты в газовых турбинах и дизельных двигателях, включая турбинные лопатки. В энергетической промышленности покрытия выполнены из керамики с нанесенным сверху металлическим слоем состава $MCrAlY$ (здесь "M" обозначает металл). В авиационных турбинах лопатки защищают от коррозии и окисления алюминидом платины, гамма-титан-алюминидом и $MCrAlY$ покрытиями.

В силу ряда факторов (высокая чувствительность к типичным дефектам вследствие малой толщины покрытий, бесконтактность, наглядность и высокая оперативность), ТК является одним из оптимальных методов НК теплозащитных покрытий. Научно-техническая литература содержит множество работ, посвященных ТК покрытий с использованием импульсного и периодического нагрева [26, 135–147].

В качестве иллюстрации на рис. 9.34, рис. 9.35 (См. цветную вкладку) приведены результаты ТК стандартного образца керамического теплозащитного покрытия на нержавеющей стали. Дискообразный образец содержал две зоны покрытия толщиной 0,18 и 0,32 мм и четыре расщепления различного диаметра (рис. 9.34).

Образец нагревали лампами с энергией около 1500 Дж/м^2 в импульсе длительностью 10 мс. Записывали до 300 термограмм с интервалом 20 мс (эксперименты выполнены в CESI, Италия). Дефекты проявлялись оптимальным образом через 0,9 с после нагрева (рис. 9.35, а), однако при этом отношение сигнал/шум было $S < 1$ и карта дефектов обнаруживала только два дефекта при большом уровне ложной тревоги. На фазограмме рис. 9.35, б видны все четыре дефекта, а также зоны с различной толщиной покрытия. Карта дефектов также показывает все дефекты с

5 %-м уровнем ложной тревоги.

Поверхностные и подповерхностные трещины в турбинных лопатках. Расследование летных происшествий и катастроф включает анализ состояния турбинных лопаток авиационных двигателей, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов. Поверхностные трещины обнаруживают с помощью жидких пенетрантов, однако этот метод непригоден в случае забитых поверхностных и всех подповерхностных трещин.

В России исследования в области ТК лопаток авиационных турбин были выполнены М.С. Касаткиным и В.П. Вавиловым [30]. Теоретические основы метода описаны в п. 3.8.9. При "боковом" нагреве лопатки распространяющаяся вдоль лопатки изотерма испытывает искажения в месте нахождения трещины. В случае поверхностных трещин эффект достаточно велик и хорошо регистрируется тепловизором, если турбинная лопатка помещена одним концом в турбулизированную кипящую воду. Выявляемость подповерхностных трещин зависит от глубины их залегания и требует использования развитых алгоритмов обработки изображений, например, анализа производных.

9.7.5. Обнаружение и оценка коррозии в авиационных конструкциях. Коррозия алюминиевых панелей. Старение парка самолетов ставит задачу обнаружения коррозии алюминиевых листов толщиной от 0,8 до 2 мм, а также зон коррозионного растрескивания вокруг заклепок. Основной акцент в соответствующих исследованиях по НК панелей самолетов ставится на замену существующих методов испытаний в отдельных точках более оперативными методами. Несколько лет назад Федеральная Авиационная Администрация США (Federal Aviation Administration) провела тендер фирм-изготовителей аппаратуры НК, среди которых были организации, разрабатывающие тепловой метод [148]. В результате сравнительных испытаний нескольких пилотных систем НК был сделан вывод о том, что потен-

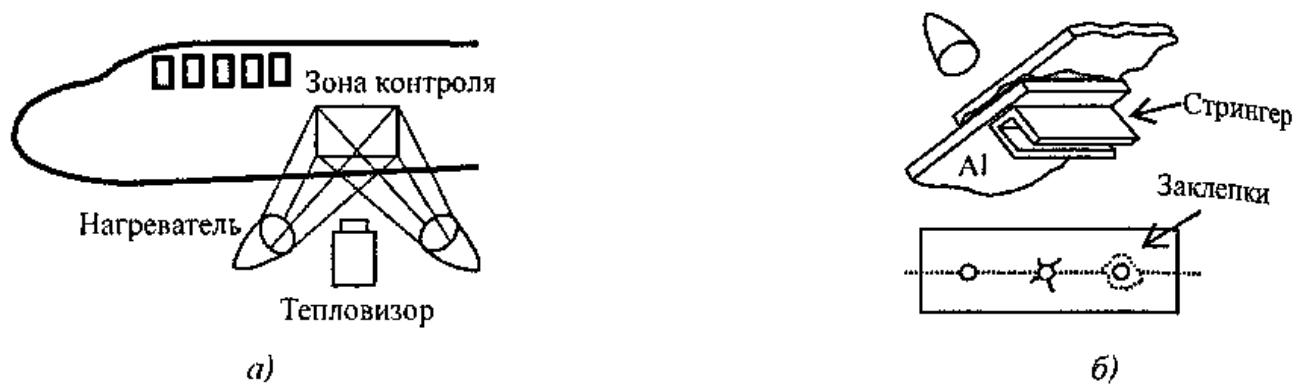


Рис. 9.36. Тепловой контроль коррозии в панелях самолетов
(адаптировано из [149])

циальные возможности теплового метода до сих пор полностью не реализованы и требуют дальнейших исследований.

Стандартная схема ТК самолета показана на рис. 9.36, а [149, 150]. Размер зоны контроля обычно составляет от 0,2 до 0,5 м в зависимости от типа и мощности нагревателя. Коммерческая аппаратура, производимая несколькими фирмами, включает тепловизоры с высокой частотой кадров, нагреватель на основе импульсных или галогенных ламп, а также компьютерную систему сбора и обработки данных.

Ряд систем поставляются вместе с роботом, который осуществляет осмотр зон контроля по определенной программе. Основные элементы ноу-хау сосредоточены в программном обеспечении систем; в частности, ряд фирм используют преимущественно преобразование Фурье (Thermosensorik), однако наибольший объем продаж приходится на установки фирмы Thermal Wave Imaging, в которых реализована синтетическая обработка сигнала (см. п. 5.10.3). Частью программного обеспечения являются также программы, позволяющие "сшивать" отдельные термоизображения с учетом направления осмотра и кривизны поверхности.

Окрашенные самолетные конструкции обычно не требуют дополнительной обработки, тогда как блестящие алюминиевые поверхности плохо нагреваются и создают мощную отраженную помеху; поэтому такие поверхности окрашивают

водосмываемыми красителями черного цвета.

Характерный элемент самолетной панели показан на рис. 9.36, б. Два алюминиевых листа соединены внахлест со стрингером посредством эпоксидного клея и заклепок (в отечественных самолетах вместо клея используют заполнители, препятствующие проникновению влаги). По мере эксплуатации самолетов, заклепочные соединения расслабляются, вокруг заклепок образуются поверхностные и подповерхностные трещины, атмосферная вода начинает проникать вглубь соединения, вызывая коррозию вокруг заклепок, как в первом, так и во втором алюминиевом листе.

Основной особенностью обнаружения коррозии в алюминии является необходимость импульсного нагрева и регистрации термограмм с высокой частотой, поскольку характерные времена наблюдения составляют от десятков до сотен миллисекунд. Нагрев должен быть достаточно мощным, однако не вызывать перегрева (испарения краски).

Коррозионное шелушение в зонах соединения алюминиевой обшивки и силовых элементов. Во многих самолетах (в США: Е-3, В-52, С/КС-135) используют стальные силовые элементы, которые соединяют с алюминиевой обшивкой крыльев согласно схеме рис. 9.37, а. Элементы защищают специальным покрытием с целью избежать электрохимического взаимодействия стали и алюминия. Ана-

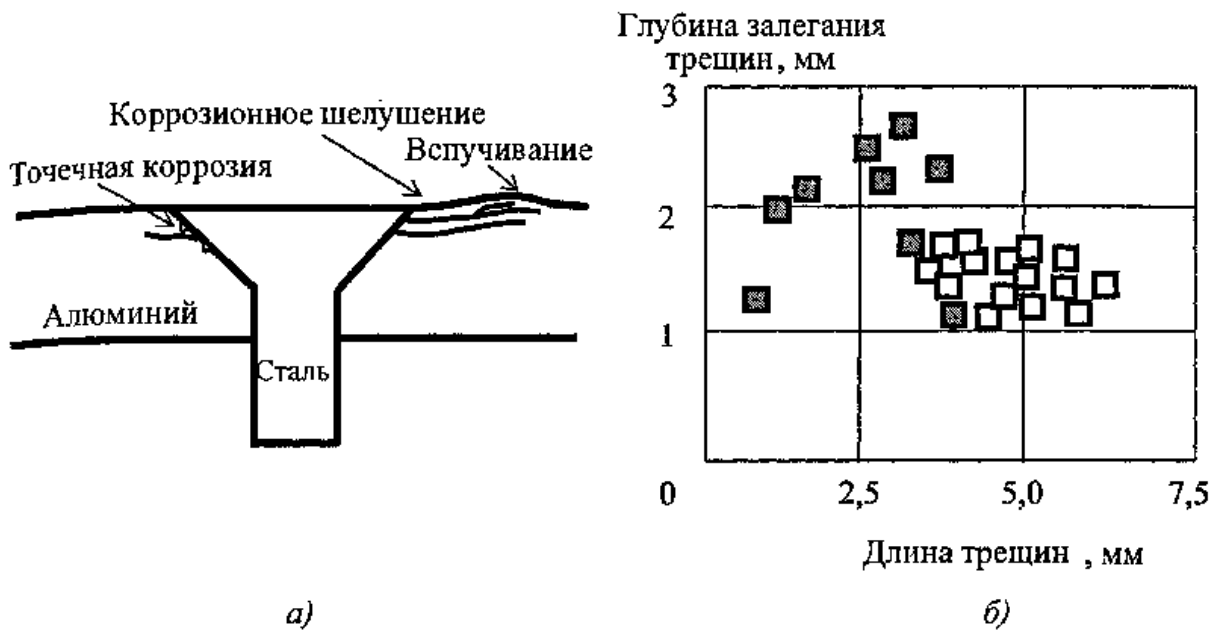


Рис. 9.37. ТК коррозии шелушением в крыльях самолетов
(адаптировано из [151]:

а – схема появления коррозии; *б* – параметры обнаруженных и пропущенных дефектов

логично ситуации, изображенной на рис. 9.36, в ходе эксплуатации защитное покрытие изнашивается, и в зонах прямого контакта двух металлов начинается точечная коррозия (pitting) и коррозионное шелушение (exfoliation) (рис. 9.37, *а*).

Основным методом контроля такой коррозии является визуальный; при этом обнаруживают зоны вспучивания обшивки вследствие накопления продуктов коррозии, что является недопустимым дефектом. Поскольку число подобных зон крепления в одном самолете достигает нескольких тысяч, спрос на оперативный метод НК, который бы обеспечил проведение ремонтных работ с меньшими затратами и продлил бы срок службы самолета, остается высоким.

Экспериментальные исследования выполнены фирмой ARINC, США [151]. Использована коммерческая система EchoTherm на базе коротковолновой ИК камеры Amber Radiance HS (формат 256 × 256, частота кадров 120 Гц). Для нагрева использованы две линейные импульсные лампы с энергией 6,4 кДж каждая. Зона контроля составляла 25 × 25 см, что обеспечивала одновременный осмотр от 18 до 24 креплений.

Поскольку в ходе ремонта самолета краска удаляется, для проведения ТК поверхность крыла окрашивали черной водосмываемой краской. Границы контролируемого участка обозначали мелом, что делало их видными также на термограммах. Установлено, что вследствие высокой теплопроводности алюминия, полезная информация сосредоточена в интервале времени длительностью всего 0,4 с, в течение которого записывали до 50 (с учетом нескольких изображений перед вспышкой) термограмм.

Обработку данных проводили двумя способами:

1) путем непосредственного просмотра термограмм в оптимальный момент регистрации после вычитания фонового изображения;

2) путем анализа первой производной по времени. Использованы образцы с многочисленными как качественными соединениями, так и с искусственными зонами коррозии, причем степень коррозии подтверждали путем последующего металлографического анализа.

Соединения с коррозией характеризовались повышенной температурой и

увеличенным размером "теплого пятна" круглой формы в течение 0,1 с после нагрева; оптимальное проявление дефектов отмечено через 0,058 с. Вероятность правильного обнаружения дефектов в результате простейшей обработки термограмм составила 73,5 % при уровне ложной тревоге 1,5 %. Анализ первой производной позволил улучшить эти показатели до 81,6 % и 1 % соответственно. Ограничения теплового метода оказались связанными с длиной коррозионных трещин и глубиной их залегания: уверенно обнаруживались дефектные зоны на глубине менее 2 мм с длиной трещин более 3 мм (см. данные рис. 9.37, б).

9.7.6. Композиционные материалы.

В авиакосмической промышленности широко используют композиционные материалы, такие как стекло- и углепластик, а также углерод-углеродные композиты, которые, в свою очередь, могут выступать в качестве обшивок сэндвичевых или сотовых структур, усиленных металлическими или неметаллическими сотами, пластическими пенообразными материалами, бальзой и т.п. Некоторые структуры могут иметь слои из резины, пробки и абляционных материалов. Получили распространение также полностью металлические соты, в которых обшивка соединена с ячейками с помощью клея или сварки с припоем. В самолетах применяют силовые элементы (стрингеры), соединенные с металлической обшивкой с помощью клея и заклепок.

Ввиду такого многообразия материалов, их сочетаний и геометрических форм отдельных изделий, не существует единственного метода НК, пригодного для решения всех задач, возникающих в процессе производства и эксплуатации изделий из композиционных материалов.

Наиболее распространен УЗ-метод, однако его применение, особенно в полевых условиях, ограничено низкой производительностью и необходимостью приводить объект контроля в контакт с водой.

Последний фактор весьма важен, поскольку после проведения испытаний необходимо высушивать изделия до тех пор, пока оно не приобретет первоначальную массу.

Тем не менее, по информации операторов-термографистов, с помощью тепловизионного метода иногда находят воду в сотах и после проведения процедур удаления воды. Общая характеристика методов НК крупногабаритных композиционных изделий приведена в табл. 9.5. Сравнение теплового и широкографического (голографического) метода содержится в табл. 5.4.

В космической промышленности США до сих пор широко распространен метод простукивания крупногабаритных панелей молотком. В то же время существует мнение, что этот метод создает ложное чувство надежности НК, поскольку простукивание субъективно и имеет низкое пространственное разрешение. Оператор часто пропускает критические дефекты и одновременно фиксирует ложные дефектные отметки.

Применение данного метода в США продолжается, поскольку он описан в целом ряде нормативных документов федерального и местного уровня. По мнению Д. Берли, одного из известных американских практических операторов-термографистов, имеются все предпосылки для замены указанного ненадежного метода комбинацией тепловидения и широкографии [152].

Углепластиковые композиты, отличающиеся высокой прочностью при температурах до 100 °С, применяются в авиакосмической технике, в частности, при изготовлении частей крыльев и фюзеляжа самолетов. Например, из углепластика изготовлено большое количество панелей истребителя Mirage фирмы Marcel Avion Dassault (Франция).

Углепластиковые композиты включают матрицу из углеродных волокон и наполнитель из синтетической смолы. Условно можно выделить микро- и макродефекты этого материала. Микродефекты

9.5. Сравнение методов НК крупногабаритных композиционных изделий* [152]

Метод	Стоимость оборудования	Портативность	Производительность	Пространственное разрешение	Особые требования
ТК	Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Неотражающие поверхности
Ширография (теплоглография)	Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Отражающие поверхности**
Простукивание	Очень низкая	Очень высокая	Низкая	Плохое	Ненадежный метод
УЗВ	Средняя	Средняя	Низкая	Высокое	Связующее вещество***
Радиационный	Средняя	Средняя	Низкая	Высокое	Проблемы безопасности

*Все методы, за исключением простукивания молотком, создают изображение.

Все методы требуют обучения операторов (в наименьшей степени метод простукивания)

**Поверхность не должна быть зеркальной, но должна отражать достаточное количество света.

*** Существуют УЗ-системы ввода сигнала через воздух или с помощью лазера, но они имеют другие ограничения.

связаны с целостностью матрицы, степенью отверждения наполнителя, качеством контакта между матрицей и наполнителем и т.п. Тепловой метод может использоваться для обнаружения конгломерата микродефектов, например, аномальной пористости композита.

Наибольшее число исследований было посвящено ТК макродефектов, из которых основными являются расслоения, которые образуются, например, в результате ударного повреждения материала (удара твердого предмета о поверхность композита). На рис. 9.38, а показано, как создают искусственные дефекты типа ударного повреждения, которые образуются в результате падения металлического шарика заданной массы с заданной высоты. Дефекты такого типа имеют специфическую форму "бабочки". (Рис. 9.38 – 9.42 см. на цветной вкладке.)

Как правило, на поверхности в точке удара имеется незначительная, слабо ви-

димая глазом отметка, а основное тело дефекта находится в толще композита. С ростом глубины увеличивается площадь растрескивания (расслоения) материала, а соответствующие зоны поворачиваются в такт с основным направлением углеродных волокон. Наилучшие результаты ТК получены при нагреве образцов оптическими импульсами длительностью 1 ... 10 мс и энергией от единиц до десятков килоджоулей на квадратный метр, а также при ультразвуковой стимуляции мощностью до нескольких сотен ватт.

В 1998 г. по инициативе автора были выполнены сравнительные исследования стандартного образца из углепластика, изготовленного Управлением по Аэронавтике Франции (ONERA). Такого рода исследования, называемые по-английски Round Robin Test (в переводе: круговой тест) предназначены для сравнения различных процедур НК и алгоритмов обработки данных. Образец содержал ударное

повреждение, изготовленное по схеме рис. 9.38, *а*. При импульсном возбуждении на нагреваемой поверхности отчетливо наблюдался дефект *A*, расположенный непосредственно под точкой удара и состоящий из двух частей (рис. 9.38, *б*).

Степень проявления более глубоких частей дефектов такого типа, например части дефекта *B* на рис. 9.38, *б*, зависит от их глубины, толщины и размеров. На задней поверхности образца также возможно уверенное обнаружение различных частей ударного повреждения, в особенности, если они расположены близко к задней поверхности. Термограмма рис. 9.38, *в* получена группой Д. Балажа методом раннего обнаружения, обеспечивая весьма высокое качество воспроизведения формы отдельных частей дефекта.

Применение метода тепловой томографии позволило разделить данный образец на четыре слоя и составить синтетическое изображение – глубинограмму, в которой пиксельные значения были выражены в координатах слоев (рис. 9.39 слева). Проверка выполнена методом УЗВ С-сканирования, в результате чего была построена правая глубинограмма рис. 9.39. Совпадение результатов теплового и УЗ-контроля было удовлетворительным, хотя УЗ-изображение обеспечивает лучшее пространственное разрешение. Тем не менее, следует иметь в виду, что время получения УЗВ изображения составило около 2 ч, а сам образец был помещен в воду, что не рекомендуется для углепластика. В то же время последовательность ИК-термограмм была снята в течение нескольких секунд, а неавтоматизированная обработка данных по методу тепловой томографии потребовала приблизительно полчаса.

Схема другого стандартного образца ONERA изображена на рис. 9.40, *а*. Расслоения в композите толщиной 5 мм моделировали фторопластовыми вставками, расположенными на глубинах 1,3; 2,6 и 4 мм (следует заметить, что искусственные дефекты такого типа значительно

"усиливаются" из-за наличия дополнительных воздушных расслоений между фторопластом и углепластиком).

Результаты тепловой томографии показаны на рис. 9.40, *б-в*. Преимущество метода хорошо видно на рис. 9.40, *б*, где исходное изображение (слева), зарегистрированное в оптимальный момент, отчетливо показывает только один дефект на глубине 1,3 мм, тогда как другие дефекты теряются на фоне неравномерного нагрева. Тепловая томограмма слоя 1,2 ... 1,9 мм показывает все три дефекта, расположенные на глубине 1,3 мм. Три последовательных тепловых томограмм приведены на рис. 9.40, *в*, обнаруживая все шесть дефектов (дефект на глубине 4 мм частично затенен дефектом на глубине 1,3 мм).

Углерод-углеродные композиты представляют собой следующий шаг в создании температуростойких композитов по сравнению с углепластиковыми. В частности, из них изготавливались наиболее нагреваемые части европейского космического корабля-челнока Hermes. С учетом более высокой теплопроводности углеродных нитей, при НК таких композитов применяют способ импульсного ТК, разработанного для углепластиков.

Исследования, выполненные группой Д. Балажа из ONERA, показали, что тепловой метод успешно обнаруживает расслоения в углерод-углеродных композитах и позволяет оценивать их глубину залегания и толщину [153]. Испытания стандартного образца толщиной 3 мм показали, что по сравнению с данными микрографии погрешность определения глубины расслоений составляет 10 ... 14 %. Погрешность оценки толщины (термического сопротивления) дефектов достигала 95 %, однако было высказано предположение, что сам процесс микрографии способен изменять параметры дефектов.

Полимерные композиты. Стремление сократить собственную взлетную массу ракет-носителей привело к замене металлов композиционными материалами

уже в 50-60-е годы. Существуют разнообразные варианты изготовления несущих элементов с использованием стеклопластиковых композитов. Например, часть корпуса американской ракеты "Атлас" в зоне трех двигателей изготовлена из 16 панелей, включая 4 дверных отсека [154]. Стеклопластиковые панели имеют достаточно сложную конфигурацию и изготовлены из алюминиевых сот, прикрепленных к стеклопластиковой обшивке с помощью липкой пленки, наполовину состоящей из алюминия. Толщина обшивки изменяется от 1,5 до 9 мм. Отдельные сотовые панели соединены между собой встык с помощью полимерного клея, который также содержит 50 % алюминия. Возможные расслоения между обшивкой и сотами "излечивают" путем инъекции эпоксидного клея. Некоторые панели покрывают дополнительной теплоизоляцией толщиной от 1,5 до 15 мм.

Использованию стандартного УЗ-метода препятствовала необходимость погружения панелей в воду, что приводило к их насыщению влагой. Штатным методом НК длительное время служил звуковой (простукивание панелей молотком с шагом пол-дюйма). Его преимуществами являются портативность и низкая стоимость.

Недостатки звукового метода:

- 1) трудности документирования данных;
- 2) субъективность;
- 3) влияние акустических шумов (эхо);
- 4) высокий уровень ложной тревоги;
- 5) качественный характер испытаний (отсутствие оценок размеров дефектов);
- 6) трудность формирования детальных изображений;
- 7) низкая производительность и возможность пропуска дефектов.

В силу особенностей использованных материалов температурные сигналы в зоне характерных дефектов композиционных панелей ракеты "Атлас" должны существовать в течение нескольких минут, по-

этому панели можно нагревать потоком теплого воздуха (использован промышленный фен мощностью 1750 Вт/с). Соответствующая технология ТК была предложена в 1990 г. Избыточная температура панелей не превышала 10 °С. При обработке процедуры ТК искусственные дефекты создавали, вводя и удаляя металлическое лезвие между обшивкой и сотами, а также нанося ударные повреждения. При покрытии панелей дополнительной теплоизоляцией создавали дефекты в виде непроклеев.

Тепловой метод позволил выявлять:

- 1) непроклеи между лицевым теплоизоляционным покрытием и обшивкой сот;
- 2) отслоения лицевой обшивки от стенок ячеек;
- 3) смятие ячеек сот;
- 4) изменения плотности алюминиевых сот;
- 5) инжестированный эпоксидный клей;
- 6) внутренние металлические детали;
- 7) стеклопластиковые блоки под обшивкой, которые служат для крепления металлических деталей.

Метод оказался эффективным в производственном цикле изготовления сотовых структур, поскольку обеспечивал выявление отслоений обшивки от сот при незакрытых сотах с противоположной стороны, что позволяло своевременно "лечить" дефекты. Было также установлено, что отслоения обшивки от сот чаще всего происходят в зонах с большим радиусом кривизны и, как правило, сопровождаются смятием сот.

В лабораторных условиях для нагрева были также использованы ксеноновые импульсные лампы с энергией 20 кДж, галогенные лампы и даже жидкий азот, что, однако, не привело к улучшению выявляемости дефектов по сравнению с нагревом воздухом. В работе [154] упоминается, что импульсные лампы обеспечивают высокую повторяемость и количественный характер измерений, однако они применимы к плоским поверхностям и

требуют специальной подготовки при расшифровке результатов

Основным источником помех при испытаниях явилось отраженное излучение посторонних высокотемпературных источников, которое приводит к появлению на термограммах "теплых" зон, напоминающих дефектные отметки. Тем не менее, обученный оператор легко идентифицировал эти ложные сигналы, поскольку они не изменяются во времени.

По сравнению со звуковым способом ИК термографический контроль обнаружил следующие преимущества:

- 1) бесконтактный характер контроля,
- 2) оперативность (испытания в реальном времени),
- 3) высокое пространственное разрешение,
- 4) регистрацию результатов в виде изображений и совместимость с видеотехникой,
- 5) меньшую зависимость результатов испытаний от опыта оператора,
- 6) относительную портативность аппаратуры,
- 7) количественный характер представления данных,
- 8) возможность классификации дефектов.

Очевидными недостатками ТК являются меньшая портативность и большая стоимость аппаратуры контроля по сравнению с молотком, используемым для звукового простукивания корпусов ракет.

Согласно работе [154], результаты испытаний теплового метода были столь обнадеживающими, что фирма General Dynamics (в настоящее время фирма вошла в корпорацию Martin Lockheed) заменила звуковые испытания тепловыми, для чего были разработаны методика испытания и стандартные образцы предприятия (СОП), внесены изменения в производственную документацию и обучен персонал.

Стандартные образцы включали следующие типы дефектов:

- 1) структурные (вариации плотности сот и толщины обшивки, смятия ячеек,

дополнительная теплоизоляция),

- 2) несплошности (расслоения и непроклеи, зоны ремонта, разрушение ячеек, ударные повреждения, аномальная толщина клея, увеличенное количество слоев композита).

Испытания проводили как в помещении, так и на открытом воздухе при размещении ракеты "Атлас" на трейлере или непосредственно на стартовой площадке на мысе Канаверал. В последнем случае возникали помехи. Солнечное излучение нагревало поверхности контроля и создавало ложные дефектные отметки, а также ухудшало качество изображений на мониторе. Сильный ветер, характерный для открытых участков местности (аэропорты, стартовые площадки ракет и т.п.), снижал эффективность нагрева, а конденсат изменял излучательные свойства поверхности и снижал температуру нагрева за счет высокой теплоемкости воды.

Наименее производительными были испытания на стартовой площадке ($5 \dots 10 \text{ м}^2/\text{ч}$) из-за погодных условий и в силу необходимости перемещать аппаратуру контроля. При контроле отдельных частей ракеты в помещении производительность испытаний достигала $50 \text{ м}^2/\text{ч}$. Маркировку дефектов производили вручную с помощью маркера непосредственно в ходе испытаний.

В СССР применяли силовые оболочки, состоящие из сетчатого несущего или защитного слоя, образованного намоткой из высокомодульного армирующего материала и одной или нескольких обшивок, армированных различным образом [15].

Чаще всего использовали три типа силовых оболочек:

- 1) двухслойные оболочки, состоящие из цилиндрической обшивки и сетчатой структуры,

- 2) трехслойные оболочки, в которых сетчатые структуры располагаются между двумя оболочками, а промежутки заполнены, например, пенополиуретаном,

3) многослойные оболочки, в которых сетчатые структуры находятся внутри пакета полимерного композиционного материала (ПКМ), а сверху располагаются защитные и силовые слои

В процессе изготовления силовых оболочек возникают следующие дефекты

1) повышенное содержание связующего в материале ребра,

2) неоднородное распределение наполнителя в сетчатой структуре,

3) регулярный характер искривления слоев армирующего материала в плоскости укладки "узлов" сетки,

4) поры, пустоты и расслоения, особенно в зонах соединения ребер с оболочкой, а также в самой оболочке и ребрах. Экспериментально установлено, что увеличение воздушных включений и расслоений с 0,6 до 6 % снижает межслойную прочность на 45 %, а предел прочности при сжатии – на 37 %

Отечественными исследователями был накоплен значительный теоретический и практический опыт по ТК изделий из ПКМ, выполненных методом намотки [15]

Причинами возникновения дефектов в таких изделиях являются

1) нарушение режимов эксплуатации и хранения,

2) попадание на поверхность армирующего материала в процессе изготовления ПКМ воды, масла и др жидкостей,

3) нарушения технологического режима намотки,

4) изменение ширины ленты армирующего материала,

5) отсутствие адгезии между кольцевым и осевыми слоями намотки,

6) несовершенство механических станков, осуществляющих намотку,

7) изменения внутреннего давления при испытаниях изделий

Важно, что в результате действия указанных факторов возникают преимущественно воздушные включения различных размеров, конфигурации и расположения. Статистический анализ показал,

что наиболее часто встречаются расслоения с раскрытием около 0,2 мм. Установлено, что для выявления 97 % всех расслоений необходимо обеспечить обнаружение дефектов с раскрытием $0,23 \pm 0,03$ мм и размерами $(25 \times 25) \pm 1$ мм и более [15]

Оптимизация процедуры ТК цилиндрических изделий из стеклопластика связана с теоретическим решением двумерной задачи активного ТК. В отечественной литературе имеется значительное число публикаций, в которых проанализированы основные зависимости поверхностного температурного сигнала от параметров дефекта и внешних условий. Тепловой контроль стеклопластиковых композитов явился полигоном испытаний алгоритмов решения обратных задач [15, 40, 70]

В частности, Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадиным, Е.В. Абрамовой разработан способ определения параметров расслоений в стеклопластике, основанный на минимизации функционала, образованного разностью экспериментальных и теоретических данных. Алгоритм был опробован в 80-е годы на компьютерах типа ЕС, время счета параметров одного дефекта составляло несколько десятков минут. Ускорение сходимости алгоритма было достигнуто за счет оптимального выбора начального приближения, т.е. при наличии априорных сведений о параметрах дефектов.

В современных математических пакетах, например MatLab, процедура нелинейной фильтрации, основанная на минимизации функционала и оценке нескольких неизвестных параметров по вводимой модели процесса, является стандартной. Тем не менее, даже на современных персональных компьютерах решение задачи идентификации может потребовать до 1 мин процессорного времени для расчета одного пиксельного значения в зависимости от количества неизвестных параметров и степени соответствия выбранной модели экспериментальным данным.

В настоящее время алгоритмы идентификации продолжают разрабатываться группой В.А. Стороженко (Харьковский Государственный Технический Университет, Украина).

9.7.7. Узлы космических челноков и ракет. Узлы и конструкции авиакосмической техники могут представлять собой сложные сочетания разнородных материалов, соединенных клеем, сваркой и заклепками, поэтому классификация областей применения ТК только по материалам зачастую теряет смысл. В данном параграфе описано применение теплового метода для решения некоторых конкретных задач контроля.

Выполнение в США программы создания космических челноков сопровождалось усиленной разработкой новых методов НК, включая тепловой (аналогичная ситуация имела место в СССР при выполнении программы "Буран"). Попытки решить задачи контроля, которые не решаются стандартными методами, особенно важны в свете последней катастрофы космического челнока Columbia в 2003 г., поскольку проблемы с качеством теплозащиты, независимо от того, возникли они в результате разрушения части конструкций или воздействия посторонних сил, явились, по многим данным, причиной катастрофы.

Ускорители твердотопливной ракеты космического челнока крепятся хомутами, элементы которых покрыты специальной смазкой, предотвращающей преждевременное истирание металла [155]. Толщина смазки составляет от 0,03 до 0,08 мм. Применение стандартной процедуры активного ТК показало, что тепловой метод способен фиксировать изменения толщины смазки до 0,003 мм и отлично выявлять несмазанные участки.

Параллельно была решена задача ТК царапин на поверхности стали, наличие которых также приводит к преждевременному истиранию хомутов [155]. Штатная процедура предусматривает удаление

смазки и осмотр труднодоступных мест с помощью зеркал. В ходе оценки толщины смазки было установлено, что царапины на поверхности стали легко обнаруживаются термографически, что существенно упростило процедуру испытаний.

Наконец, тепловой метод оказался полезным при оценке качества системы теплозащиты в местах крепления хомутов.

Целостность теплозащиты важна, поскольку оторвавшиеся при старте куски "пробки" могут повредить теплозащитные плитки челнока (именно это стало причиной разрушения корабля Columbia). При лабораторных испытаниях стандартных образцов тепловым методом были обнаружены воздушные дефекты в "пробке" размером до 3,3 мм. При полевых испытаниях теплозащиты одного из космических челноков были выявлены дефекты, пропущенные стандартным простукиванием молотком.

Компоненты твердотопливных ракет для вывода космических челноков изготовлены методом формования (molding) из отдельных сегментов, причем по краям сегментов топливо разделено материалом, который называется ингибитором. С точки зрения НК такая конструкция характеризуется следующими особенностями [156]:

- 1) целостность всех связующих плоскостей является необходимым условием функционирования двигателей;
- 2) готовые структуры не могут быть разобраны для проведения испытаний.

Испытания проводят на месте перед покрытием отдельных сегментов ингибитором и сборкой их в единый двигатель. Контролю подлежат возможные расслоения между ингибитором и прокладкой, а также между прокладкой и топливом.

В силу соотношения толщин и ТФХ слоев (ингибитор: $a = 1,31 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; прокладка: $a = 0,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; топливо: $a = 1,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) авторы работы [156] выдвинули концепцию так называемого "замещенного нагрева" (проху heating), согласно которой нагрев поверхности ингибитора с помощью фена приводит к

равномерному прогреву прилегающих участков топлива. Масса топлива, в свою очередь, начинает действовать как нагреватель; таким образом, по мнению авторов, процедура ТК из односторонней превращается в двустороннюю.

В свете существующих алгоритмов моделирования процесса теплопередачи в дефектных структурах, нет необходимости прибегать к столь приближенным моделям; однако, во всяком случае, на термограммах искомые расслоения проявлялись слабо, и была предложена процедура обработки данных с помощью второй производной.

Проблему выбора оптимального метода НК можно проиллюстрировать на примере испытаний криогенных резервуаров ракеты Atlas/Centaur, которая встала перед фирмой General Dynamics (США) после перехода к новому типу теплозащиты резервуаров с жидким водородом [157]. В настоящее время сверхпрочный стальной корпус резервуаров защищен пенообразным пластическим материалом, и неразрушающим испытаниям подлежит качество клеевого слоя между сталью и "пеной".

Гипотетический оптимальный способ НК должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) бесконтактность (не повредить теплозащиту);
- 2) портативность (для работы на стартовой площадке);
- 3) односторонний доступ к теплозащите;
- 4) минимальный размер выявляемого непрочья 100 мм;
- 5) производительность испытаний от 1 до 60 м²/ч.

Фирма провела сравнительные испытания звукового, УЗ, теплового, широкоугольного, радиографического и механического (вакуумного) метода НК. Тепловой метод, как и УЗ, обнаруживал дефекты только при нагреве со стороны металла. Оптимальным оказался метод

ширографии.

В США начато выполнение программы работ по созданию космического мини-корабля X-33. Руководителем программы является Управление по аэронавтике США NASA, а систему тепловой защиты разрабатывает фирма BF Goodrich Aerospace (бывшая Rohr). В теплозащите челнока будут использованы новейшие материалы, в частности, части, подверженные максимальной тепловой нагрузке (носовая часть, крылья) будут изготовлены из углерод-углеродного композита. Другие ответственные компоненты планера будут изготовлены из металлических сот (сплав Inconel) с толщиной обшивки 0,15 мм. Верхние части планера, подверженные меньшей тепловой нагрузке, будут изготовлены из алюминиевых сот с углепластиковой обшивкой, покрытых высокотемпературной керамикой. Тепловой метод используется для 100 %-го контроля металлических и углепластиковых сот.

Для контроля углепластиковых сот первоначально планировалось применить УЗ НК, однако затем этот метод был заменен тепловым в силу следующих причин [158]:

- 1) ТК обладает значительно более высокой производительностью испытаний (приблизительно 13 м²/ч);
- 2) расходы на испытания тепловым методом ниже, чем УЗ;
- 3) испытания могут производиться в цехе без необходимости транспортировать крупногабаритные панели в лабораторию УЗ контроля, поскольку при этом существует возможность повреждения композитов;
- 4) погружение обшивки сот в воду, необходимое при проведении УЗ испытаний, нежелательно, поскольку может привести к накоплению воды в ячейках сот (тепловой метод позволяет как обнаруживать воду в сотах, так и контролировать процесс ее удаления).

Использована та же процедура активного ТК, что и в случае испытаний

композиционных материалов ракеты Atlas (см. выше). Дополнительным преимуществом ТК явилось то, что в результате многочисленных инспекций была установлена определенная система в локализации малых дефектов, что позволило изменить к лучшему технологию изготовления панелей.

Что касается металлических сот из сплава Inconel, то в корабле X-33 должно быть использовано до 1600 панелей, контроль которых наиболее целесообразен, применяя тепловой метод. В этом случае в качестве нагревателя использовали импульсную лампу с энергией 12,8 кДж, температуру регистрировали с помощью тепловизора фирмы Santa Barbara Focal Plane (фотоприемник из InSb, 640 × 512). Полученные после соответствующей обработки термограммы позволяли выявлять дефекты сварки с припоем на уровне отдельных сот.

9.8. НЕФТЕХИМИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Энергоемкое нефтехимическое производство характеризуется непрерывностью технологического процесса и высокой стоимостью установок. Мировые нефтехимические компании являются важными потребителями тепловизоров, которые окупают себя в среднем за 0,5 ... 1 год. Согласно зарубежному опыту, выделяют пять основных областей применения тепловизионной диагностики на нефтеперегонных и нефтехимических предприятиях (табл. 9.6):

- 1) проверку состояния электрооборудования;
- 2) контроль технологических линий;
- 3) контроль состояния футеровки и изоляции;
- 4) измерение температуры печных труб;
- 5) оценку энергопотерь.

9.6. Тепловизионная диагностика в нефтехимической промышленности (данные Т.С. Нурды, FLIR Systems)

Применение	Оборудование	Признаки дефектности	Причины дефектности	Последствия
Энерго-снабжение	Электро-распределительные системы	Повышенная температура	Изменение сопротивления вследствие коррозии, дефектной изоляции или механического повреждения	Выход из строя
	Подшипники электрооборудования	Повышенная температура	Перегрузка, недостаточная или неправильная смазка	Повреждение подшипников
	Хлорные, фторовые, электролитические элементы	Повышенная температура	Недостаточная затяжка болта	Неэффективность производства, снижение мощности
	Трансформаторы, прерыватели цепей, разрядники	Повышенная температура	Различные	Выход из строя

Продолжение табл. 9.6

Применение	Оборудование	Признаки дефектности	Причины дефектности	Последствия
Процессная жидкость	Предохранительные клапаны	Повышенная температура трубопровода	Механическое повреждение, изношенные задвижки/седла	Потери продукта
	Ловушки пара	Повышенная температура	Механическая неисправность	Утечки пара (потери энергии)
	Подземные трубопроводы	Повышенная температура	Утечки вследствие коррозии или дефектной сварки	Потери продукта, загрязнение
	Цистерны, емкости	Разность температур паровой, жидкой и твердой фаз	Наличие уровня жидкой или твердой фазы	Загрязнение продукта, сбой в процессе опорожнения, неточная информация о содержимом
	Газопроводы, трубопроводы	Горячие/холодные пятна или участки	Образование жидкой/твердой фазы	Уменьшение потока процессной жидкости, закупорка
	Теплообменники	Температурные аномалии относительно эталонного распределения	Отложения, износ оболочки	Уменьшение потока процессной жидкости, образование отверстий в трубах
	Воздушные холодильники	Отдельные трубы имеют пониженную температуру	Образование отложений, закупорка	Снижение потока процессной жидкости и ухудшение теплопередачи, перегрев труб
Футеровка и изоляция	Емкости реакторов, трубопроводы	Повышенная температура	Износ футеровки, растрескивание	Образование отверстий, разрывы в результате ползучести/напряжений, воздействия водорода и высокой температуры

Продолжение табл. 9.6

Применение	Оборудование	Признаки дефектности	Причины дефектности	Последствия
Футеровка и изоляция	Дымовые трубы, каналы отвода топочных газов	Повышенная температура	Дефекты футеровки, растрескивание	Прогорание, разрывы в результате ползучести/напряжений, воздействия серной кислоты
	Трубопроводы, емкости, печи, теплообменники, реакторы, строительные сооружения	Горячие/холодные пятна или участки	Поврежденная или недостаточная изоляция, увлажненная изоляция, лед в изоляции криогенных трубопроводов	Потери энергии, понижение производительности и сбои в процессе
Печи	Трубы и прочие внутренние узлы труб	Повышенная температура отдельных труб или участков труб	Излишнее пламя, плохой факел пламени, закоксование, внешние отложения	Окисление, разрывы в результате ползучести/напряжений, простои, сокращение срока службы труб
	Пропарка труб печи	Холодные пятна на трубах	Неполное удаление кокса	Пониженная температура при пуске печи, сокращение рабочего цикла
		Горячие пятна на трубах	Неправильная химическая очистка для удаления накипи	Перегрев, окисление, неисправность в результате разрыва, сокращение рабочего цикла
Экономия энергии	Трубопроводы, емкости, печи	Температура выше оптимальной	Повышение расходов на энергию	Неэкономичность процесса

В последние годы многие российские нефтехимические заводы, нефте-, газодобывающие и транспортирующие компании также внедряют программы тепловизионных обследований. В связи с действием федерального закона о промышленной безопасности периодическому обследова-

нию подлежат установки основного производства и вспомогательные объекты, обслуживающие эти установки, например дымовые трубы.

С помощью тепловизоров анализируют температуру химических реакторов, которая нормирована в критических точ-

ках (рис. 9.41, а). Тепловидение позволяет отслеживать уровень продукта в резервуарах, особенно, если температура продукта существенно отличается от температуры окружающей среды (рис. 9.41, б). (См. цветную вкладку). Эффективно обследованне теплозащиты резервуаров с жидким аммиаком, являющееся штатной процедурой на ряде российских предприятий.

9.9. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Исследования температурных полей изделий радиоэлектроники, особенно микроминиатюрных, осложняется их малыми габаритами, высокой плотностью упаковки деталей, слабыми температурными сигналами и значительным разбросом коэффициента излучения. ИК устройства, в том числе со световодными каналами передачи излучения из труднодоступных мест, эффективнее контактных датчиков, поскольку контроль является неразрушающим и бесконтактным, диапазон измеряемых температур не ограничен и имеется возможность измерения в большом количестве точек с пространственным разрешением, ограниченным только волновым пределом.

Фирма IBM (США) применяет ТК для обнаружения неисправностей электронных плат и прогнозирования их ресурса. Компания Radio Systems Sweden (Швеция) оптимизировала системы мобильной телефонной связи путем термографирования электронных стоек, для которых прежний способ контроля наощупь оказался непригодным.

Особенностью ТК изделий радиоэлектроники является наличие прямой связи ресурса изделий с их температурой. Для ряда компонент (транзисторов, диодов, оксидных катодов, резисторов) имеются соответствующие статистические зависимости. Оперативность ТК наглядно проявляется при испытаниях большого количества однотипных плат, стоек, узлов и отдельных элементов. Тепловые поля таких изделий хорошо коррелированы, поэтому для получения заключения об их

качестве не требуется сплошного сканирования. Обычно достаточно измерить температуру в 10 ... 100 точках растра, затем сформировать набор информативных признаков и применить тот или иной алгоритм распознавания образов.

Дешифрирование термограмм производит оператор или автоматизированная система. Операторная оценка эффективна при обнаружении дефектов, которые существенно изменяют эталонное температурное поле изделий, например, в результате обрывов, коротких замыканий или изменений номинала.

Специалистами фирмы Ericsson (Швеция) установлено, что интегральные схемы, на корпусе которых отсутствуют локальные перегревы, имеют больший срок службы. Контроль внутренних дефектов микросхем, характеризующихся слабыми температурными сигналами, проводят при снятых корпусах и используют более сложные критерии разбраковки.

Аппаратурную основу ТК в радиоэлектронике составляют микропирометры и тепловизоры-микроскопы. В пирометрические комплекты для ТК микросхем и других полупроводниковых приборов входят программируемые столы и автоматизированные системы обработки данных. Например, тепловизионная микроскопическая система CompuTherm фирмы EDO обладает пространственным разрешением 15 мкм при чувствительности 0,1 °С в интервале температур от комнатной до +600 °С. Время формирования кадра относительно велико 2 с, однако нестационарные температурные процессы можно фиксировать с постоянной времени до 60 мкс. Система позволяет контролировать качество нанесения покрытий, определять тепловое сопротивление, обнаруживать короткие замыкания и разрывы проводников микросхем и т.п.

В СССР исследования в области ТК радиоэлектронных компонент было достаточно интенсивными (ВНИИ "Электронстандарт"), в частности, были созданы системы контроля 14ЭЭП300-021,

9.7. Тепловой контроль радиоэлектронных компонент

Объекты ТК	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
Полупроводниковые изделия	Дефекты р-п перехода (поверхностная деградация, электромиграция, межметаллические соединения, "шнурование" тока, мезоплазма); неравномерная плотность тока; трещины, газовые пузыри между кристаллом и основанием, неоднородность состава исходного материала; дефекты теплоотвода, диффузионной сварки; повреждения кристалла; обрыв проводов и короткие замыкания.	Во многих случаях показателем дефектности является тепловое сопротивление. Перспективно импульсное питание, при котором определяют время тепловой устойчивости и переходную тепловую характеристику. Скрытые дефекты хорошо локализуются на термограммах.
Интегральные микросхемы	Дефекты теплоотвода; обрыв выводов; короткие замыкания; некачественная металлизация; сколы резистивной пленки; плохая адгезия и термокомпрессия; пробой конденсаторов; объемные дефекты полупроводникового материала.	Пространственное разрешение достигает 20 ... 50 мкм. Испытания проводят со снятой крышкой в 50 ... 100 информативных точках.
Многослойные печатные платы	Утонение и коррозионный износ проводников; некачественная металлизация; отслоение проводников.	Используют импульсный нагрев электрическим током (в ряде случаев, оптический нагрев). Температурное поле имеет сложную топологию, требуются эталоны.
Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры	Неправильное подключение элемента в схеме; некачественный монтаж; неудачное размещение элементов на плате.	Тепловой контроль эффективен при проектировании, изготовлении и функционировании узлов. Рекомендуется в массовом производстве однотипных узлов при наличии эталона. Оптимизация ТК состоит в выборе информативных точек, тестового воздействия и подавлении излучательных помех.
Резисторы	Локальные утонения; непроводящие включения; плохие контакты; трещины.	В случае ТК цилиндрических резисторов снимают четыре профиля по образующей и сравнивают с эталоном. Размер обнаруживаемого дефекта: 15 × 15 мкм.

Продолжение табл. 9.7

Объекты ТК	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
Конденсаторы	Пробой электролитических конденсаторов; замыкания слоев конденсаторов в микросхемах.	Контроль осложнен низким уровнем сигнала и наличием излучательной помехи.
Проволока	Утонения; трещины.	Используют контактный нагрев электрическим током и бесконтактный СВЧ нагрев. Производительность ТК – до 4 м/мин. Фиксируют изменения толщины проволоки до 20 мкм.
Катодные узлы	Неравномерность покрытия.	Повышение температуры на 50 ... 60 °С снижает долговечность катода на порядок. ТК в режиме глубокого недокала снижает производственные допуски и исключает рентгенотелевизионный контроль.
Высокотемпературные пленочные покрытия	Отслоения от подложки; неравномерность толщины.	Наиболее эффективен нестационарный ТК. Время существования полезных сигналов – до десятков мс.
Контроль сварки выводов интегральной схемы (ИС) с контактными площадками печатных плат	Несплавление вывода с площадкой; расплавление золотого покрытия в межэлектродном зазоре; стекание золота на контактную площадку; расплавление выводов ИС и появление углублений; перегорание вывода и контактной площадки.	При стандартном точечном тепловом воздействии температурные отклики бездефектных сварных соединений характеризуются определенными значениями амплитуды и характерного времени теплопередачи. Проблема – разброс излучательных свойств.

09ЭИ-1, АСТД и др. [159, 160]. Теоретические основы моделирования процесса ИК-контроля и прогнозирования рабочего ресурса радиоэлектронных компонент были обобщены еще в 1974 г. Н.С. Данилиным с соавторами [161]. В настоящее время, судя по отсутствию публикаций, указанные работы оказались свернутыми, по-видимому, в связи с повсеместным переходом российской электронной промышленности на зарубежные комплекты.

Как отмечено выше, существенной методической проблемой при использовании ТК в радиоэлектронике является разброс излучательных свойств используемых материалов, который может превышать 15 %. В отличие от ТК дефектов в конструкционных материалах, в радиоэлектронике часто нужно знать абсолютную температуру отдельных элементов, поскольку она влияет на их ресурс. Для выравнивания излучательной способности фирма IBM в свое время применяла белое

порошкообразное покрытие из оксида алюминия, причем чувствительность ТК была такова, что позволяла обнаруживать повреждение отдельного штырькового вывода 28-контактной интегральной схемы

Программа EQUAL (FLIR Systems) предусматривает предварительный равномерный нагрев изделия, например печатной платы, в боксе с температурой 40–50 °С, после чего составляют карту распределения коэффициента излучения. Затем снимают тепловое поле изделия в рабочем режиме и преобразуют его в карту истинных температур с учетом измеренных пиксельных значений коэффициента излучения

В условиях серийного производства в электронной промышленности к ТК предъявляют следующие требования

1) высокая временная стабильность аппаратуры (достигается периодической калибровкой с помощью встроенных моделей АЧТ),

2) геометрическая привязка точек поверхности и результатов измерений (обеспечивается в автоматизированных системах),

3) исключение влияния коэффициента излучения,

4) высокое быстродействие, которое необходимо для испытаний изделий с малой тепловой инерцией (пленок и микросхем) и 100 %-го контроля большого количества однотипных изделий,

5) необходимость оптимизации режима питания, который может как совпадать с рабочим режимом, так и представлять определенную комбинацию тестовых воздействий, причем последний способ обеспечивает преимущественное выявление отдельных типов дефектов,

6) выбор контрольных точек, в которых температурный сигнал наиболее коррелирован с дефектами,

7) внедрение автоматизированных систем, которые имеют высокую стоимость и выпускаются ограниченными партиями

Основные объекты ТК в радиоэлектронике описаны в табл. 9.7 и книгах [10, 159–161]

В качестве иллюстрации на рис. 9.42 показано тепловое поле платы персонального компьютера, указывающее на наличие перегретых компонент (См. цветную вкладку)

9.10. ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОКАТ

Дефекты металлопроката (трещины, расслоения, пустоты, флокены и др.) снижают выход годного продукта. Аппаратура НК таких дефектов должна быть бесконтактной, оперативной и выдерживать высокие температуры. На металлургических предприятиях, в основном, применяют УЗ-метод, причем ввод и съем ультразвукового излучения производят через струю воды. Известны также разработки в области радиационного метода, однако необходимость защиты от радиации сужает область их применения.

Российская фирма "ВЕМО" разработала автоматизированную систему активного ТК дефектов металлопроката [15], в которой нагрев движущегося по рольгангу металлического листа производят с помощью площадочного нагревателя (предложено применять газовые горелки или линейчатые лампы типа КГ-220-1000). Съем информации о распределении температуры на поверхности листа, противоположной нагреву, производят с помощью нескольких тепловизоров или линейных сканеров. В пилотной установке использована тепловизионная система Thermovision 550, которая на расстоянии 6 м от листа обеспечивает поле обзора 2 × 2 м при пространственном разрешении 4 мм.

В промышленной системе предусмотрено использование нескольких тепловизоров (оптических головок) для того, чтобы обеспечить полное перекрытие движущегося листа по ширине с сохранением требуемого пространственного разрешения. Плотность энергии нагрева должна быть от 100 до 400 кВт/м², а время нагрева каждой точки 0,5–1 с при скорости

**9.8. Сравнительные характеристики систем теплового и
УЗ НК металлопроката (адаптировано из [6])**

Технический параметр системы	Система ТК	Система УЗ НК	Требуемое (желательное) значение
Размер минимального выявляемого дефекта, мм	2	5	2
Толщина контролируемого материала, мм	0,5 30	3 30	0,5 30
Ширина контролируемого участка, мм	50 4000 (зависит от нагревателя)	50 2500 (ограничено линейкой УЗ-преобразователей)	50 5000
Максимальная температура материала, °С	500	100	800
Максимальная скорость перемещения материала, м/с	3	1	3
Возможность контроля неподвижного объекта	Имеется	Не имеется	Имеется
Диапазон изменения толщины объекта контроля, %	80	10	100
Возможность контроля изделий произвольной формы	Имеется	Не имеется (только листы)	Имеется
Допустимые случайные отклонения положения объекта относительно системы контроля, мм	100	10	100
Точность определения координат дефектов, мм	10	15	5
Точность определения глубины залегания дефектов, % от толщины материала	10	30	10
Наличие контакта с контролируемым объектом	Бесконтактный (3000 мм)	Контактный (10 мм через иммерсионную среду)	Бесконтактный
Уровень требований к качеству контролируемой поверхности	Средний	Высокий	Низкий
Уровень требований к состоянию окружающей среды	Средний	Высокий	Низкий
Цена, тыс долларов США	470	10 000	—

перемещения сортового металлопроката от 100 до 2200 мм/с. При указанных параметрах контроля время анализа одного кадра составляет 1 с, причем 0,04 с уходит на запись температуры, а 0,96 с отводится на обработку информации.

В момент начала движения металлопроката с датчика перемещения в компьютер поступает стартовый сигнал, который инициирует блок управления нагревателем и программу ввода и анализа температурных полей. Через оптимальное время контроля, величина которого задается оператором, нагретый участок поверхности проката визируется тепловизором.

В работе [15] подробно описаны этапы моделирования активного ТК путем теоретического решения соответствующей задачи ТК и оптимизации параметров аппаратуры. В соответствии с теорией, изложенной в главах 2 и 3, оптимизации подлежат мощность и длительность нагрева, а также оптимальное время наблюдения критериев дефектности, в качестве которых выбраны температурный сигнал ΔT и текущий контраст $C = \Delta T/T$. В программном обеспечении предусмотрено решение обратной задачи ТК, что позволяет оценить площадь, глубину и раскрытие (толщину) обнаруженных дефектов.

Основными факторами помех являются наличие окалины, ржавчины, полированных зон, трещин, изменения толщины листа и температуры окружающей среды. Окалина и ржавчина являются теплоизоляторами, что приводит к локальным повышениям температуры листа, однако, по мнению авторов, параллельный большой отток тепла в этих местах не приводит к существенным изменениям средней температуры листа.

Участки с полированной поверхностью ведут себя аналогичным образом, однако в момент их прохождения в поле зрения тепловизора они создают блики, которые могут фиксироваться автоматизированной системой в качестве дефектов. Биения листа металлопроката в пределах 50 мм изменяют поглощенную мощность

на 10%, но не сказываются на достоверности выявления дефектов, поскольку основным информативным критерием является текущий контраст C . Аналогичным образом слабо сказываются на результатах ТК изменения толщины листа. Влиянием трещин также можно пренебречь в силу малых размеров зон возмущения. Температура окружающей среды вносит постоянную составляющую в основной сигнал и не сказывается на принятии решения о качестве.

Для метрологической аттестации системы ТК металлопроката использованы стандартные образцы, в которых расщепления имитированы воздушными полостями, закрытыми пробками из металла. Автоматизированная система ТК обеспечивала обнаружение дефектов диаметром 5 мм и раскрытием 0,05 мм с погрешностью оценки площади и контура дефектов не более 12%. Очевидно, что столь высокие параметры обнаружения требуют использования специальных алгоритмов обработки информации, которые способны существенно увеличить отношение сигнал/шум.

В табл. 9.8 приведено сравнение систем теплового и УЗ НК. Видно, что параметрам, предъявляемым потребителями к гипотетической оптимальной системе НК, в наибольшей степени соответствует система ТК.

9.11. СВАРНЫЕ И ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

9.11.1. Контроль температуры в процессе сварки. Замена ручной сварки роботизированной является одной из тенденций современного промышленного производства. Качество сварных соединений при автоматизированном процессе зависит от того, как роботы адаптируются к изменениям параметров свариваемых материалов, сварочной аппаратуры и геометрической конфигурации процесса сварки. Флуктуации многих параметров считаются случайными, поэтому их контроль в реальном времени и активное воз-

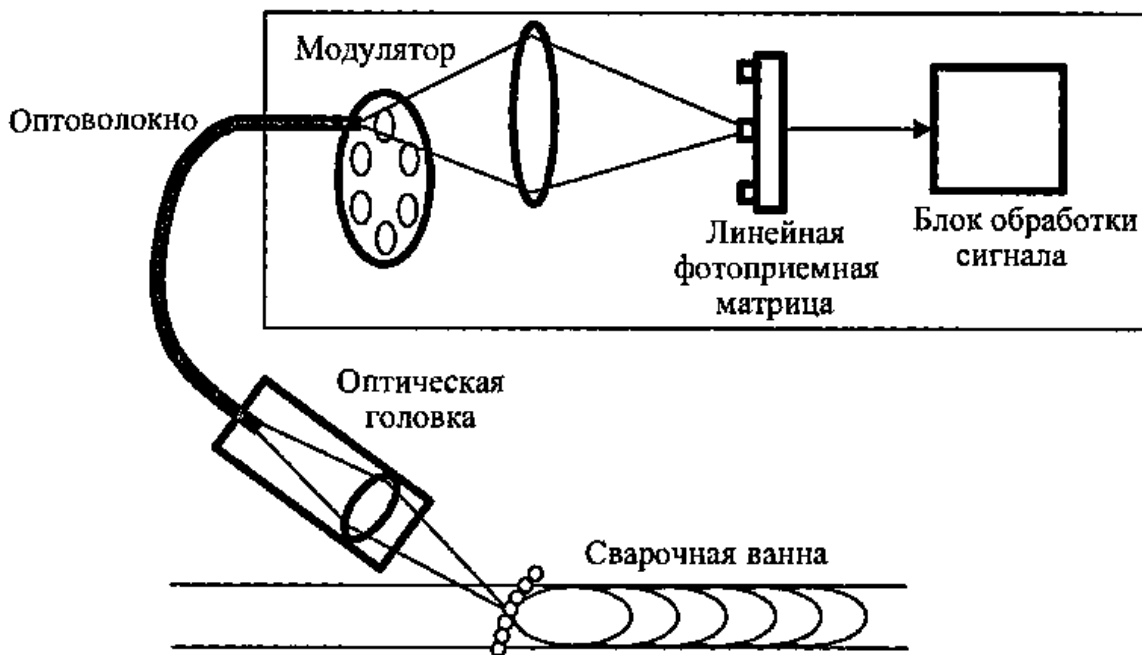


Рис. 9.43. Линейно-сканирующий ИК пирометрический датчик для контроля за температурой при сварке (адаптировано из [162])

действие на процесс сварки может повысить качество сварных швов. Термин "активный" применительно к таким системам часто означает либо управление параметрами сварки, либо подсветку с помощью искусственного источника, например лазера. Пассивные устройства могут работать либо по отражению, либо по собственному излучению материалов в зоне сварки.

Многие из активных оптических устройств чувствительны к профилю поверхности свариваемых материалов впереди сварочной ванны, их эффективность ограничена определенной временной задержкой между моментом контроля и моментом сварки. Этому недостатка лишены пассивные пирометрические системы, которые измеряют температуру в зоне сварочной ванны. Геометрическая форма сварочной ванны, абсолютные значения температуры и степень симметрии температуры непосредственно связаны с параметрами, влияющими на качество сварки, а именно, с позиционированием сварочного узла, раскрытием корня, ТФХ и толщиной материалов.

Возможности устройств видимого и ближнего ИК диапазона ограничены измерением температуры самой ванны и близлежащих участков, а также наличием сильной помехи со стороны сварочной дуги, имеющей температуру от 10000 до 15000 К, поэтому разработаны устройства контроля более низких температур свариваемых материалов, работающие в средневолновом ИК-диапазоне. Численный анализ процесса сварки, результаты которого описаны в [162], показали, что сигналы управления процессом сварки могут быть получены на основе измерения температуры вдоль определенной линии, расположенной впереди зоны сварки перпендикулярно движению сварочной головки.

Этот вывод позволяет избежать использования дорогостоящих тепловизоров, ограничившись точечными или линейно-сканирующими пирометрами. Техническое исполнение таких пирометров чаще всего связано с использованием ИК-световодов, которые способны выдерживать воздействие агрессивной среды в зоне сварки и передавать ИК-излучение к фотоприемнику, расположенному на не-

котором расстоянии В простых пирометрах измеряют температуру основного металла на фиксированном расстоянии впереди края сварочной ванны, что предоставляет информацию о ширине ванны и, косвенно, о глубине проплавления

Наиболее эффективны сканирующие системы с дискретным измерением температуры вдоль некоторой линии (см схему на рис 9 43) Длина световода достигает 5 м, причем сканирование осуществляют путем разделения оптоволоконного пучка на отдельные волокна, каждое из которых визирует определенную точку на линии сканирования В устройстве, описанном в [162], использовали 8 фотоприемников PbS (спектральный диапазон 2 – 2,5 мкм, уровень измеряемых температур около +500 °С), что обеспечивало скорость сканирования до 50 строк в секунду при пространственном разрешении 1 мм Наилучшая отстройка от помех имеет место, когда пирометрический датчик, будучи размещенным в одном корпусе со сварочной головкой, визирует поверхность по нормали, а не под углом, как это изображено на рис 9 43

Данное устройство позволило проанализировать влияние скорости газовой сварки, тока дуги и расхода газа на вид температурных распределений и качество сварного шва

9.11.2. Точечная сварка. Точечную сварку тонких металлических листов, выполняемую пропусканием импульсов электрического тока между двумя электродами, применяют в автомобилестроении Автомобиль может содержать от 3 до 5 тысяч сварных точек, НК которых является серьезной проблемой для производителей Применение УЗ и вихретокового метода остается маргинальным вследствие низкой производительности испытаний Оценку качества точечных сварных швов осуществляют путем разрушающих испытаний, что обходится, например, компании Ford Motors в более чем 100 млн долларов в год, причем время испытаний одного автомобиля составляет 7 – 10 дней

Качество точечных швов определяется диаметром и структурой литой зоны. Естественно ожидать, что эти параметры могут оказывать заметное влияние на характер теплопередачи через шов Первые работы в области ТК выполнены в СССР Н А Бекешко и Ю А Поповым еще в 70-е годы прошлого века [163, 164] Для нагрева швов в одно- и двусторонней процедуре ТК использовали плазмотрон, а критерием дефектности служил характер динамического измерения температуры в зоне шва, которую измеряли ИК-радиометром [163].

В более поздней работе тех же авторов для нагрева было предложено оценивать качество швов в двусторонней процедуре ТК по наблюдаемому диаметру кольцевой изотермы, который увеличивался во времени, будучи линейно связанным с диаметром литой зоны [164] Эксперименты выполнены на стали 10Г2С толщиной 5 + 5 мм, нагрев производили лампой К-220-500 Теоретический анализ процесса охлаждения точечного шва с внутренним дефектом выполнен В П Вавиловым с сотрудниками [165]

Несмотря на чрезмерное упрощение геометрии контроля, что не позволило применить принятую модель на практике, значение работы [165] состояло в том, что в ней впервые получено аналитическое выражение для динамического температурного перепада в зоне дефектов $\Delta T(\tau, r_d)$ в зависимости от радиуса дефекта r_d

В последующем тепловой метод определения диаметра литой зоны сварных точек не получил развития вследствие низкого метрологического уровня тогдашних тепловизионных систем, не позволявших надежно измерять положение изотерм при повторяющихся испытаниях. Исследования в данном направлении возобновлены в последние годы с использованием импульсного ТК, схема которого показана на рис 9 44, а [166] Для нагрева применили стандартные импульсные лампы и высокоскоростные тепловизионные системы При фокусировании излучения

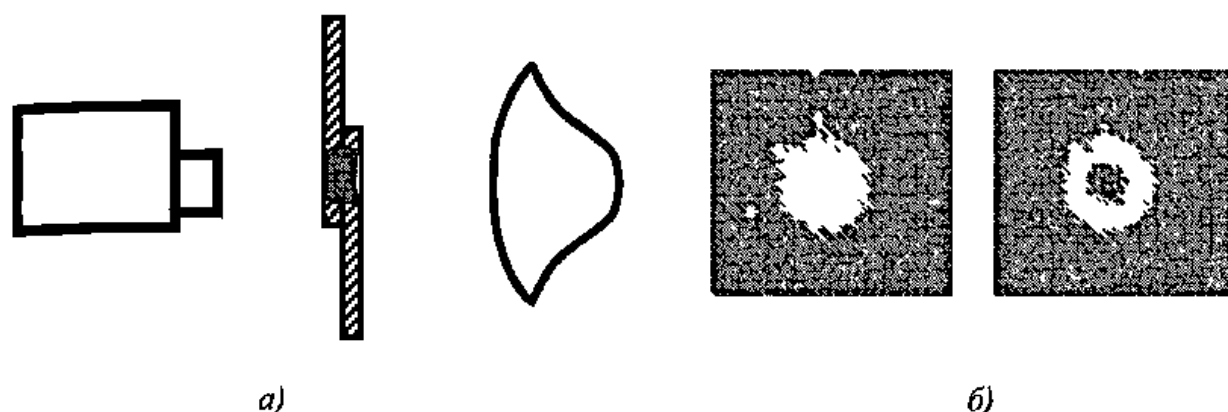


Рис. 9.44. Схема импульсного ТК точечных сварных швов (а) и термограммы бездефектного (слева) и дефектного (справа) швов (б)

лампы с энергией 6 кДж в импульсе длительностью 5 мс в зоне диаметром 2,5 см удалось получить существенное различие между качественными и дефектными сварными точками (дефектные швы были изготовлены в результате изменения параметров сварки двух листов низкоуглеродистой стали общей толщиной 0,8 мм)

Различие в сигнатурах сварных швов наблюдалось только в интервале времен от 15 до 65 мс после нагрева, причем дефектные швы обнаруживали ярко выраженную зону пониженной температуры (см рис 9.44, б)

9.11.3. Диффузионная сварка заготовок силовых выпрямительных элементов. В работе [167] описан ТК (рис 9.45, а) заготовок мощных выпрямительных элементов (ВЭ) Схема ВЭ показана на рис 9.45, б ВЭ включали полированный кремний (диаметр 40 мм, толщина 390 мкм), приваренный методом диффузионной сварки к вольфрамовому термокомпенсатору В-ПМ (диаметр 40 мм, толщина 2,2 мм) через алюминиевую фольгу А99 толщиной 100 мкм Диффузионная сварка выполнена на установке УДС-3 в следующем режиме температура

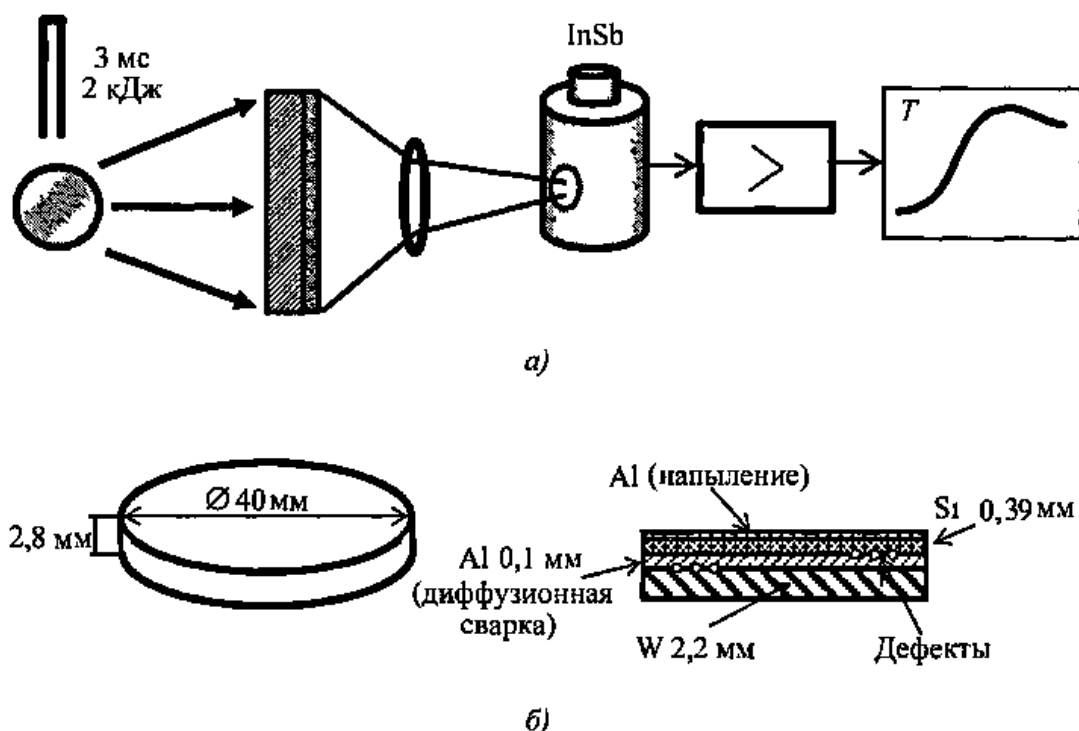


Рис. 9.45. Активный ТК качества диффузионной сварки силовых ВЭ: а – схема двустороннего импульсного ТК, б – схема ВЭ



Рис. 9.46. Результаты тепловизионного контроля качества диффузионной сварки заготовок силовых выпрямительных элементов без внешней металлизации:

а – искусственные дефекты (получено методом шлифа после разрушения изделия),
б – термограмма дефектов (тепловизор ТВ-03)

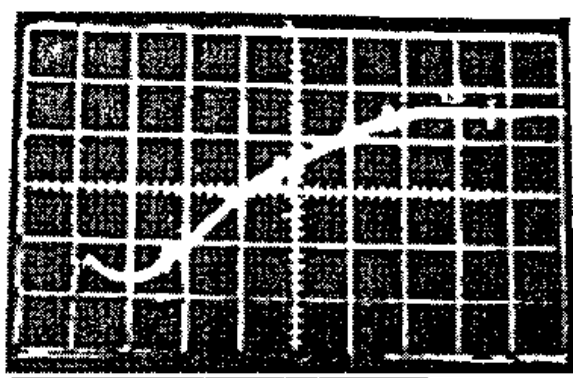
+540 °С, давление 15 МПа, время выдержки 300 с, вакуум 66,5 МПа

Искусственные дефекты вносили в алюминиевую фольгу методом вдавливания, а также травления в слабом растворе соляной кислоты на глубину 15–20 мкм (см рис 9.45, б)

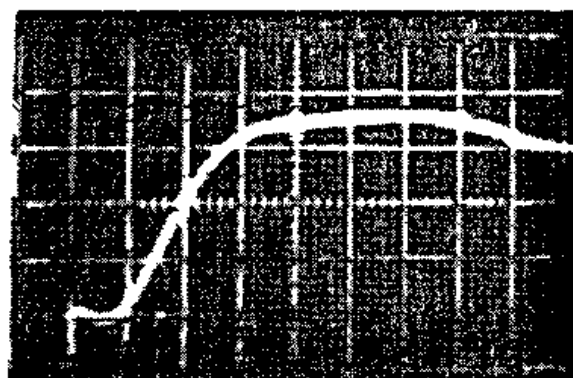
В реальных изделиях дефекты могут располагаться как между кремнием и алюминием, так и между алюминием и вольфрамом (рис 9.45, б). На заключительной стадии технологического процесса на поверхность кремния наносят электрод из напыленного алюминия. Установлено, что при отсутствии металлизации

кремниевого слоя внутренние дефекты предварительно нагретого изделия видны с помощью тепловизора при визировании непосредственно через кремний, прозрачный для ИК излучения (при этом имеют место не температурные, а чисто оптические эффекты). Схема искусственных дефектов и соответствующая термограмма изделия показаны на рис 9.46

После металлизации кремния (напыления алюминия) дефекты могут быть обнаружены при использовании импульсного двустороннего ТК. Критерием дефектности служил характер изменения температуры во времени (метод определе-



а)



б)

Рис. 9.47. Результаты импульсного ТК качества диффузионной сварки заготовок силовых ВЭ с внешней металлизацией:

а – бездефектное изделие, *б* – изделие с дефектом размером 20 × 20 мм

9.9. Результаты ТК качества ВЭ по критерию $\tau_{1/2}$ (метод Паркера)

Группа качества ВЭ	Температуропроводность, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Кондиционные ВЭ (температура сварки +540 °С)	59,5
Диффузионная сварка при пониженной температуре (+450 °С)	60,5
Дефект размером 5 × 5 мм	61,6
Дефект размером 10 × 10 мм	61,7
Дефект размером 15 × 15 мм	62,0
Дефект размером 20 × 20 мм	62,6

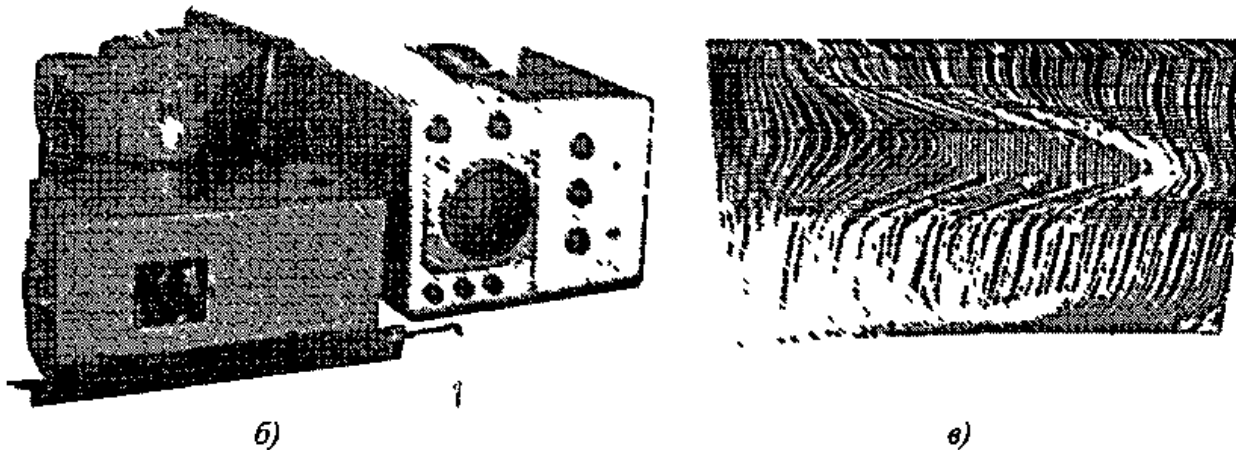
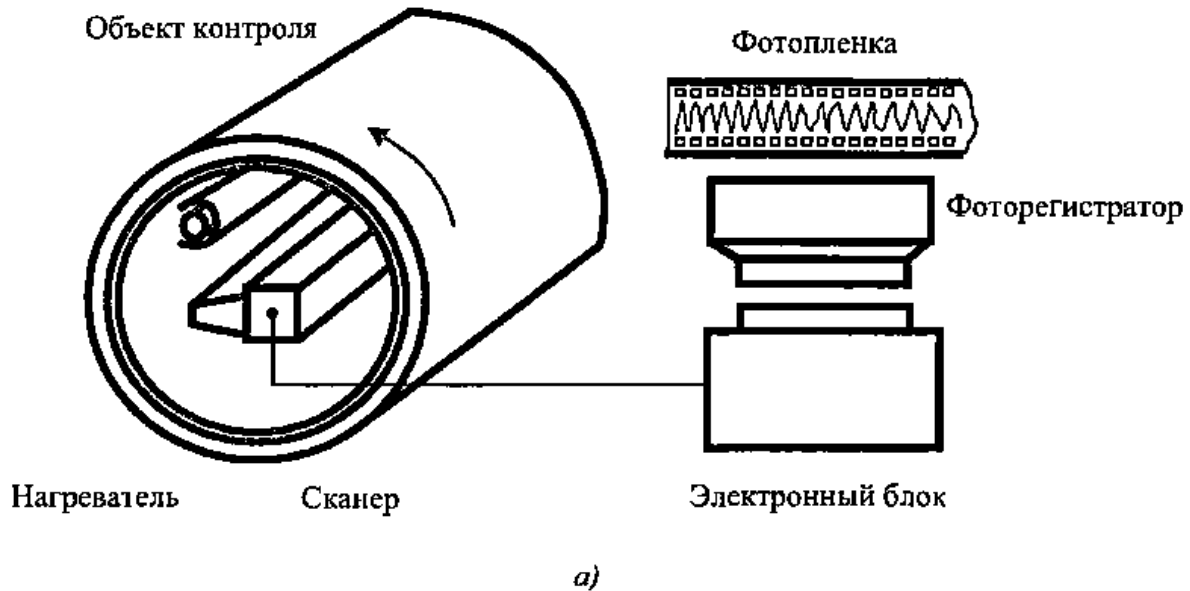


Рис. 9.48. Фоторегистрирующий ИК дефектоскоп для ТК паяных изделий (Томский НИИ интроскопии)
 а – схема контроля, б – внешний вид, в – пример записи температурных профилей на рулонную фотопленку

ния температуропроводности Паркера) Примеры температурных откликов бездефектного и дефектного ВЭ приведены на рис 9 47 (следует заметить, что наличие дефектов, внесенных описанным выше способом, приводило к увеличению интегральной температуропроводности) Усредненные значения интегральной температуропроводности для ВЭ различных классов качества приведены в табл 9 9

Статистическая оценка результатов ТК показала, что данным методом можно обнаруживать дефекты, занимающие более 5 % площади ВЭ

9.11.4. Активный ТК паяных соединений. В 1986 г в Томском НИИ интроскопии разработан фоторегистрирующий ИК дефектоскоп ФИД-1, являвшийся дальнейшим развитием серии строчносканирующих дефектоскопов типа ТД-21А, созданных В А Стороженко в Харьковском Институте Радиозлектроники [168, 169]

Прибор ФИД-1 предназначен для активного ТК двухслойных металлических (изделие сталь-бронза) цилиндрических изделий, изготовленных способом пайки (см схему контроля на рис 9 48, а) Изделие нагревали с помощью линейного источника, выполненного из нихрома сечением 8 × 2 мм, скорость сканирования составляла 10 строк в секунду Результаты контроля записывали в виде набора температурных профилей на рулонную фотопленку, которая перемещалась перед электронно-лучевой трубкой синхронно со сканированием (рис 9 48, б, в)

В силу аналогового характера записи результатов на фотопленку, прибор ФИД-1 представляет собой скорее исторический интерес, будучи свидетельством уровня отечественных разработок в области активного ТК в 80-х годах прошлого века

9.12. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ЕГО ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

В машиностроении внедрение гибких автоматизированных производств поставило задачу прогнозирования срока службы твердосплавного режущего инструмента, широко используемого роботизированными установками для обработки металла Качество инструмента может быть надежно оценено по износу режущей кромки при механических испытаниях, т е разрушающим способом

Стандартные методы НК (вихретоковые, УЗ и др) характеризуются коэффициентом корреляции между используемым информативным параметром и износостойкостью инструмента менее чем 0,2, что неприемлемо для практики В Томском НИИ интроскопии предложено использовать в качестве информативного параметра интегральный коэффициент температуропроводности, который определяют индивидуально для каждого инструмента по методу Паркера

Экспериментальная установка изображена на рис 9 49 Режущий инструмент устанавливают в кассету и нагревают импульсом оптического излучения длительностью 1 мс (лазер на длине волны 1,06 мкм, энергия в импульсе 7,5 Дж) По температурному отклику на противоположной поверхности образца (рис 9 50, а) определяют интегральный коэффициент температуропроводности данного типа режущего инструмента При калибровочных испытаниях износостойкость (срок службы) инструмента оценивали по износу режущей кромки при механических испытаниях Коэффициент корреляции между температуропроводностью и износом режущей кромки составлял от 0,65 до 0,8

Пример корреляционного поля и соответствующая регрессионная кривая показаны на рис 9 50, б

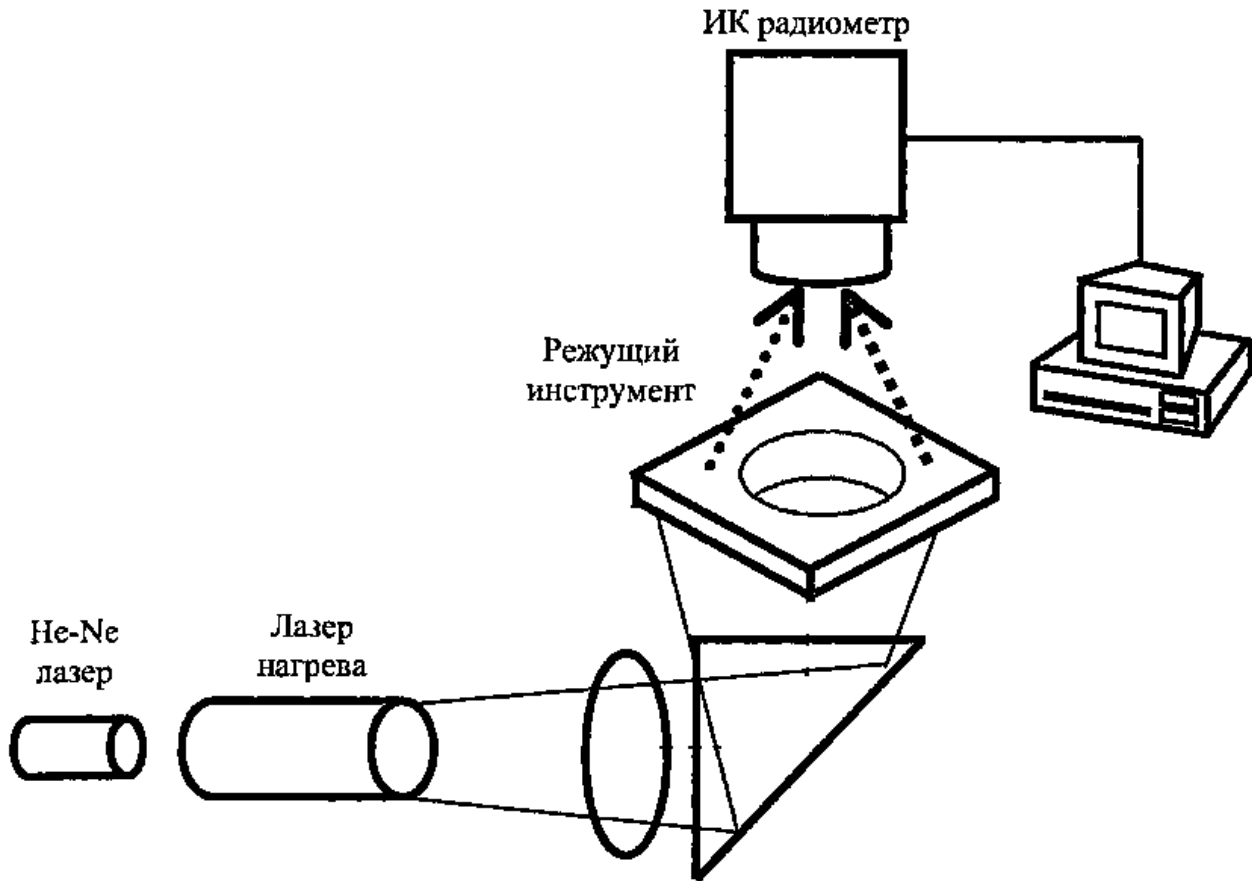


Рис. 9.49. Определение интегральной теплопроводности режущего инструмента по методу Паркера

Испытания партий режущего инструмента, изготовленного различными производителями, показали, что даже в пределах одной партии может наблюдаться существенный разброс значений теплопроводности α , соответственно,

срока службы. Оценку качества отдельного инструмента осуществляют в течение нескольких минут с учетом того, что для усреднения данных рекомендуется выполнить 3–5 измерений для различных положений образца в кассете



Рис. 9.50. Оценка срока службы режущего инструмента по теплопроводности: а – регистрируемый температурный сигнал, б – функция регрессии

9.13. ОБНАРУЖЕНИЕ КОРРОЗИИ В МАССИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Цивилизация создала и разместила на Земле огромное количество толстостенных металлических объектов: нефтяных цистерн и баков, трубопроводов, котлов и т.п. 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, и регламент эксплуатации соответствующих сооружений включает методы НК, прежде всего УЗ и радиационные. Относительно недавно начаты исследования в области ТК. 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 особенностей.

- В стальных изделиях температурные сигналы в зонах уноса материала существуют в течение значительно более длительных времен, 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 значительной мощности нагрева.

- В качестве компромисса между всеми факторами, участвующими в образовании температурных сигналов, можно считать, что ТК оптимален для обнаружения коррозии в стали толщиной 1 ... 3 мм.

- 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 галогенные лампы.

В NASA (США) разработана система ТК коррозии в котлах тепловых электро-

станций (ТЭС), реализующая принцип линейного сканирования [170]. Площадь поверхности котлов, подлежащая 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 5 см/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 формируют с помощью компьютера отбором тех строк сканирования, которые соответствуют определенному времени задержки (~0,5 ... 1 с).

В качестве прототипа авторы ссылаются на метод, описанный К. Малдагом в 1993 г., однако справедливости ради следует заметить, что в СССР устройства ТК с полосовым нагревом разработаны В.А. Стороженко и Д.А. Рапопортом с сотрудниками еще в 70-х годах прошлого века [70, 169]. При НК стеклопластиковых композитов эффективность этих устройств была весьма высокой.

В системе NASA идентификацию уноса материала на задней поверхности металлической стенки производят, используя упрощенное решение задачи нагрева адиабатической пластины толщиной L движущимся со скоростью V линейным источником с удельной мощностью q , Вт/м:

$$T(x, z) = \frac{q}{LVC_p} \left[e^{-\frac{V(x+|z|)}{2a}} + 2V \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-\frac{Vx+|z|\sqrt{(2n\pi a/L)^2 + V^2}}{2a}} \right] \quad (9.14)$$

Формула (9.14) справедлива для так называемой "дальней зоны", причем начало координат совпадает с движущейся линией нагрева [170]. При отрицательных значениях поверхностной координаты x (исследуемая точка находится за линией нагрева) вклад бесконечного ряда, при некоторых условиях, может быть незначительным. Для малых скоростей движения источника ($V < 2a/L$) это условие выполняется, если

$$x < \frac{2a}{V - \sqrt{(2\pi a/L)^2 + V^2}} \approx \frac{L}{\pi}. \quad (9.15)$$

При больших скоростях ($V > 2a/L$) вклад бесконечного ряда становится малым для расстояний за линией нагрева, больших, чем толщина пластины. В этом случае температура поверхности приблизительно равна

$$T \approx \frac{q}{LVC\rho}, \quad (9.16)$$

т.е. обратно пропорциональна толщине пластины. Последнее соотношение позволяет оценить величину уноса материала.

Лабораторные испытания на вырезанных секциях котла ТЭС показали, что при зачистке поверхности песком или водой и последующем покрытии ее водосмываемой эмульсией черного цвета описанная выше установка способна обнаружить коррозию задней стенки на уровне 18 % уноса металла. Совпадение результатов теплового и УЗ-метода было удовлетворительным; расхождения объяснялись наличием выгнутых труб, нагрев которых отличался от нагрева основной массы труб. Равномерность нагрева улучшена путем создания специальной системы сканирования длиной 7,3 м, шириной 1,4 м и массой 230 кг. Система монтируется непосредственно внутри котла, имеющего входной люк размером 0,5 × 0,5 м.

На рис. 9.51, а на цветной вкладке приведена термограмма секции котла ТЭС, полученная путем нагрева с помощью двух импульсных ламп (совместная

работа Томского НИИ интроскопии и Института Холодильной Техники, Италия). На термограмме отчетливо видна зона уноса 36 % материала на внутренней поверхности трубки; следует заметить, что поверхность секции не подвергалась какой-либо механической обработке, но изображение рис. 9.51, а получено после компьютерной обработки последовательности.

Пример результатов ТК толстостенного стального изделия приведен на рис. 9.51, б. При слабом длительном нагреве зона 30 %-го уноса материала не выявляется даже в оптимальный момент регистрации (термограмма слева), в то время как томографическая обработка данных отчетливо обнаруживает зону дефекта круглой формы (томограмма справа).

К. Малдаг описал успешные лабораторные эксперименты по обнаружению коррозии в коленах стальных труб [171]. Через трубу пропускали попеременно то горячую, то холодную воду; термограммы снимали в переходной период с наилучшей видимостью дефекта в интервале времени от 1 до 3,5 с. Судя по косвенным данным, унос материала в трубе толщиной 5 мм достигал 80 %. Преимуществом такого способа ТК является отсутствие радиационных помех тепловизору со стороны нагревателя.

Аналогичные дефекты удалось обнаружить при одностороннем ТК, нагревая трубу феном, однако сигналы в дефектных зонах были существенно ниже, чем в двухсторонней процедуре.

9.14. АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ

ИК термографию успешно применяли при диагностике гоночных автомобилей, хотя данный метод может найти применение и при испытаниях автомобилей других типов. Например, пониженная температура тормозов может быть вызвана их неэффективной работой. ИК термография двигателя и системы выхлопа по-

зволяет быстро измерить температуру критических деталей (во всех вышеуказанных случаях используют метод сравнения с эталоном).

Аналогичным образом выявляют перегретые, т.е. плохо смазанные, подшипники. Термограммы шин после испытательной поездки выявляют зоны плохого контакта отдельных участков шин с дорожным покрытием. ИК-термографию применяли для оценки эффективности систем обогрева стекол, контроля за герметичностью салона автомобиля, а также при разработке оптимального дизайна радиаторов.

Лабораторные исследования, проведенные на дизельном двигателе, показали применимость теплового метода для оценки степени сжатия смеси и протечек из цилиндра [172].

Тепловые методы эффективны при разработке систем охлаждения радиаторов автомобилей, анализе трещинообразования в колесах, ветровых стеклах и фарах.

Тепловой контроль точечной сварки в автомобилестроении был описан в п. 9.11.

9.15. ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Производство бумаги исторически явилось одним из первых удачных применений пассивного ТК в поточном производстве. Например, в 1995 г., при опросе специалистов США об использовании ИК термографии в промышленности, наибольшее число респондентов, давших положительный ответ, работала в сфере производства бумаги. При движении нагретого бумажного листа участки с различной степенью увлажненности хорошо видны вследствие испарения воды.

Влажность бумажного листа и ее распределение по его ширине является критическим фактором качества. Тепловой метод широко применяют в целлюлозно-бумажном производстве Скандинавии, Канады, Англии и США.

9.16. СУДОСТРОЕНИЕ (КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ)

Корпуса крупных речных и морских судов изготавливают из стали способом сварки, поэтому их НК проводят визуально-измерительным, радиационным, УЗ, вихретоковым и т.п. методами. В то же время в производстве корпусов современных прогулочных и гоночных яхт широко применяют композиционные материалы, в частности стеклопластик. В этом случае, подобно испытаниям корпусов ракет, тепловой метод является эффективным средством НК.

Т. Джонсом и Э. Линдгреном описаны результаты ТК элементов минного тральщика МНС-51, изготовленных из стеклопластикового композита [173]. Положительные результаты были получены при испытаниях корпусного каркаса, деталей кормовой палубы, киля и переборок.

9.17. ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

С ростом номенклатуры пищевых продуктов предприятия пищевой промышленности и магазины увеличивают потребление электрической энергии. Одновременно возрастает сложность технических систем, которые следует поддерживать в 24-часовом рабочем состоянии. Замороженные продукты хранят при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ или ниже, и даже кратковременное повышение температуры способно ухудшить их качество.

Применение тепловидения позволяет своевременно идентифицировать дефектные компоненты электроагрегатов, работающих в круглосуточном режиме.

Наиболее эффективно применение тепловидения при оценке теплопотерь и дефектных зон производственных корпусов, диагностике электромоторов, подшипников, насосов, холодильников, компрессоров и т.п. Например, своевременная замена дефектных выпускных клапанов воздушных кондиционеров экономит тысячи долларов.

Еще бóльший эффект приносит замена тотального ремонта холодильных корпусов точечным. На рис. 9.52 приведена термограмма стены холодильного корпуса одного из российских мясокомбинатов, снятая с целью определить объем необходимого ремонта. (См. цветную вкладку.)

Очевидно, что в условиях экономии средств на капитальный ремонт целесообразно выполнить первоочередной ремонт в тех участках, где нарушена теплоизоляция стены (на рис. 9.52 дефектные участки обозначены овалами).

9.18. УТЕЧКИ ГАЗО- И НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

Обнаружение утечек нефти и газа из промышленных установок и подземных трубопроводов, а также естественных источников, является серьезной проблемой технической диагностики, которую решают, используя разнообразные методы и приборы. К настоящему времени наиболее надежные результаты в области ТК получены на газопроводах. Проблему обнаружения утечек газа широко обсуждают на международном уровне, опираясь прежде всего на опыт США, Швеции, Японии и России.

В 1997 г. образована международная рабочая группа, выпустившая в 2000 г. отчет "Состояние методов и средств дистанционного обнаружения естественного газа" (State of the Art of Technologies for Remote Detection of Natural Gas, Report SOC 110, ISSN 1102-7371, June 2000).

В течение 2000 – 2003 гг. Европейским сообществом финансируется соответствующий проект VOGUE (Visualization of Gas for Utilities and Environment).

Обычный тепловизор в состоянии визуализировать утечки из продуктопроводов, если они приводят к регистрируемому изменению температурного поля. Возможно несколько механизмов обнаружения утечек и соответственно режимов работы ИК-аппаратуры. В пассивном режи-

ме утечки из магистральных подземных трубопроводов, где газ находится под высоким давлением, могут приводить к заметному понижению температуры вследствие дроссельного эффекта. Сообщалось, что такие утечки уверенно обнаруживали, например, на фоне снега, создающего равномерный температурный фон (см. обобщение российского опыта бортовых тепловизионных съемок в книге Р.М. Алеева с соавторами [174]).

При невысоком давлении газа температурные эффекты в месте утечки невелики в силу низкой теплоемкости и малой массы газов, но возможно обнаружение утечек в узких полосах поглощения/излучения газов; например, метан обладает сильным поглощением на длине волны 3,39 мкм. На холодном фоне теплый газ может быть виден вследствие повышенной эмиссии на длине волны поглощения/излучения. Напротив, на теплом фоне облако газа может наблюдаться в виде холодной зоны вследствие поглощения.

Предварительные результаты по пассивному тепловизионному обнаружению облаков газа из трубопроводов с невысоким давлением были сообщены С. Люнгергом в рамках выполнения проекта VOGUE [175]. Установлено, что эффективность выявления утечек зависит от погодных условий, диаметра дефектов, глубины залегания трубопровода и типа почвы.

Например, утечки объемом 1 ... 20 л/мин из отверстия диаметром 1 мм выявлялись с трудом, тогда как утечки объемом 1 ... 5 л/мин через отверстие диаметром 3 ... 5 мм уверенно обнаруживались тепловизионным методом. Размер дефекта и скорость ветра влияют на формирование облака газа.

Наилучшие условия обнаружения имеют место, когда газ стелется над землей на высоте нескольких дециметров. При этом возникают температурные перепады до 2 °С. При скорости ветра > 3 м/с облако газа поднимается на высоту до не-

скольких метров, смешивается с воздухом, и его обнаружение оператором по тепловизионному сигналу невозможно

В активном режиме осуществляют облучение земной поверхности лучом лазера, работающего на длине волны поглощения/излучения газа (на практике часто используют отношение сигналов в полосе поглощения и вне ее для устранения влияния излучательной способности) Эффективность работы лазерных локаторов зависит от расстояния до объекта контроля и коэффициента отражения подстилающей поверхности

В России разрабатывают *комбинированные* системы обнаружения утечек, включающие как пассивный (тепловизионный), так и активный (лазерный) канал

С методологической точки зрения, обнаружение утечек продукта из трубопроводов, в особенности заглубленных, является сложной научно-технической задачей В книге [174] условия тепловизионных обследований продуктопроводов предложено подразделять на три категории

1) связанные с продуктопроводом (географические, агрофизические, конструктивные),

2) временные и метеорологические,

3) летные

Для северных участков трасс продуктопроводов типично заглубление на 0,5

1 м, причем трассы зачастую проходят по водоемам различной протяженности Наиболее эффективно тепловизионное обследование в ночное время, когда поверхностные тепловые помехи минимальны, однако по соображениям безопасности полетов большинство обследований проводят днем, когда возникают значительные тепловые помехи, вызванные солнечным нагревом открытых участков почвы и затеняющим действием растительности Поэтому рекомендуется проводить обследование при сплошной облачности

Поскольку реальные утечки нефти и газа происходят, как правило, внезапно и подлежат немедленному устранению, при

отработке технологии обследований трасс продуктопроводов большую роль играет моделирование аварийных ситуаций.

Например, открытую утечку продукта создавали посредством его выброса в атмосферу через отборный вентиль на узле секционирования медной трубкой с внутренним диаметром до 6 мм [174]. Длина трубки (30—80 м) определялась расстоянием до площадки, на которой создавали аварийную ситуацию Открытый конец трубки укладывали в грунт так, чтобы продукт выбрасывался в атмосферу под углом 20—30° к горизонту Интенсивность выбросов была такова, что видимое облачко продукта (газа) было не более 0,5 м Закрытые утечки моделировали выбросом продукта в грунт, снег и в воду

Экспериментальные результаты отечественных исследований по тепловизионной диагностике целостности продуктопроводов в различное время года приведены в [174]

9.19. ИК АЭРОСЪЕМКА

Аэрофотосъемка, в том числе в ближнем ИК диапазоне, применялась почти в течение всего прошлого столетия, в то время как регистрация излучения Земли в среднем ИК диапазоне стала возможной после создания специализированных бортовых тепловизоров, а также с началом широкого использования портативных тепловизоров на борту самолетов и вертолетов

В целом ИК изображения Земли менее информативны, чем изображения видимого и ближнего ИК диапазона Основными преимуществами ИК съемки является способность работы в ночное время, что важно для военных применений, а также возможность обнаруживать тепловые источники, которые не видны на обычных снимках Такими источниками являются энергетические установки и трубопроводы, созданные человеком, вулканы и геотермальные источники, лесные

9.10. Цены на спутниковые изображения [176]

Спутник/датчик	Число каналов	Стоимость снимка, долларов США	Ширина полосы съемки, км	Пространств разрешение, м	Стоимость съемки площади 100 км ² , долларов США
Meteosat/MVIRI (ESA)	3	113	Полушарие	2500	Бесплатно
NOAA/AVHRR (США)	5	115	2400	1000	
Ресурс-0/МСУ (Россия)	4	1300	600	150	0 36
IRS (Индия)		300	130	36	2
MOS (Япония)		316	100	50	3
Landsat/MCC (США)		1233	185	80	4
Ресурс-0/МСУ-Э (Россия)	3	200	45	35	10
Landsat/TM (США)	7	5180	185	30	16
SPOT/HRV-XS (Франция)	3	2487	60	20	69
SPOT/HRV-P (Франция)	1	31337	60	10	87

и торфяные пожары, животные и люди и т п

В некоторых случаях удается идентифицировать скрытые объекты и дефекты в них (трубопроводы, археологические объекты, подводные лодки в океане и т д) Используя принцип тепловой инерции (путем сравнения результатов дневной и ночной съемки), можно оценить влажность и/или плотность верхних слоев почвы

При аэросъемке сельскохозяйственных культур оценивают степень созревания урожая, по температуре деревьев можно судить об их здоровье Путем съемки водной поверхности исследуют тайфуны, течения и обнаруживают источники "теплового загрязнения" водной среды

ИК аэросъемка с борта самолета и вертолета обнаруживает очаги лесных и подземных пожаров, зоны самовозгорания в угольных шахтах, заворошенные снегом трещины в ледниках и г п Тепловой ме-

тод надежнее обычного воздушного патрулирования, поскольку ИК излучение лучше, чем видимое, проходит через дым, туман и листву, в ночное время ИК аэросъемку применяют для поиска пропавших людей, определения поголовья диких животных и т п

Для съемки природных ресурсов и для военных целей созданы космические системы (в США ERTS, SkyLab, HCMM, Spot, Irs, ADEOS, Landsat, в СССР и России "Метеор-Погода", "Космос", "Ресурс", орбитальные космические станции), которые просматривают земную поверхность с интервалом 1-2 недели в относительно узкой полосе с пространственным разрешением до 10 м

Космические системы снабжены многоканальной аппаратурой для аэросъемки, перекрывающей диапазон электромагнитного излучения от видимого до средневолнового ИК (обычно имеется

один канал, работающий в диапазоне длин волн 10–12 мкм)

Установлена существенная корреляция между видимым и ИК каналом, однако в практических целях термоизображения, полученные со спутников, используются слабо, за исключением метеорологии, где термограммы земной поверхности являются важным источником информации о тепловых процессах в атмосфере

Российские спутники серии "Ресурс", разработанные ВНИИ электромеханики, имели массу 1900 кг, из них 500 кг приходилось на полезную нагрузку. Пространственное разрешение сканирующего устройства МСУ-Э, работавшего в диапазоне от 0,5 до 0,9 мкм, составляло 45 м поперек и 32 м вдоль полета при ширине полосы сканирования 45 км. ИК сканирующее устройство МСУ-СК работало в каналах длин волн 0,5–0,6, 0,6–0,7, 0,7–0,8, 0,8–1,1, 10,4–12,6 мкм при пространственном разрешении от 140 до 550 м.

Искусственный спутник Земли Landsat-7 массой 2,2 тонны, запущенный в 1998 г., имеет твердотельный накопитель информации емкостью 380 Гбиг, что позволяет хранить до 100 снимков размером 185 × 185 км (часть витка). Оптическое излучение Земли регистрируют в 8 диапазонах от 0,45 до 12,5 мкм с пространственным разрешением 15–30 м в ближнем ИК диапазоне и 60 м в тепловом ИК диапазоне.

В табл. 9.11 приведены цены на спутниковые изображения.

9.20. ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТИВОПЕХОТНЫХ И ПРОТИВОТАНКОВЫХ МИН

Согласно оценкам ООН, в более чем 80 странах мира установлено свыше 100 млн противопехотных мин (по другим оценкам – от 200 до 300 млн). Более того, интенсивность установки новых мин составляет приблизительно 1 млн единиц в год, что в 20 раз превышает интенсивность разминирования. Жертвами мин

становятся 26 тысяч человек ежегодно, или 1 человек каждые 20 минут.

Наибольшей опасности подвержены такие страны, как Афганистан, Камбоджа, Кувейт, Ирак, регион Чечни и др. Проблема обнаружения противопехотных мин имеет ярко выраженное гуманистическое значение. Эту проблему решают как военные, так и общественно-политические организации (ООН, ЮНЕСКО и т.п.). По данной тематике выполняются работы научно-технического и практического характера в рамках международных проектов и прямых контрактов.

В США введены в действие ряд программ по данной или родственной тематике (исследовательская корпорация Коулмана, Центр Изучения Окружающей Среды Армии США и др.). В течение нескольких последних лет в рамках ежегодного симпозиума AeroSense проводится специализированная конференция под названием "Технология обнаружения мин и миноподобных целей" (Detection Technologies for Mines and Minelike Targets). В 1996 г. Ассоциация Минного Вооружения США (Mine Warfare Association) организовала Симпозиум по Технологии и Проблемам Минного Вооружения. В 1997 г. по данной тематике проведена международная конференция в Японии.

Разработано большое число технических средств для обнаружения поверхностных и заглобленных мин, однако в силу разнообразия типов, геометрических форм и размеров мин (до 700 типов), а также способов их установки, наиболее надежные результаты получают путем комбинирования аппаратуры, использующей различные физические принципы. На практике продолжают широко использовать визуальный контроль, собак-ищейек и стандартные металлоискатели. Однако современные безоболочечные мины могут содержать металлические детали весьма малой массы, что делает металлоискатели бесполезными. С другой стороны, на поле

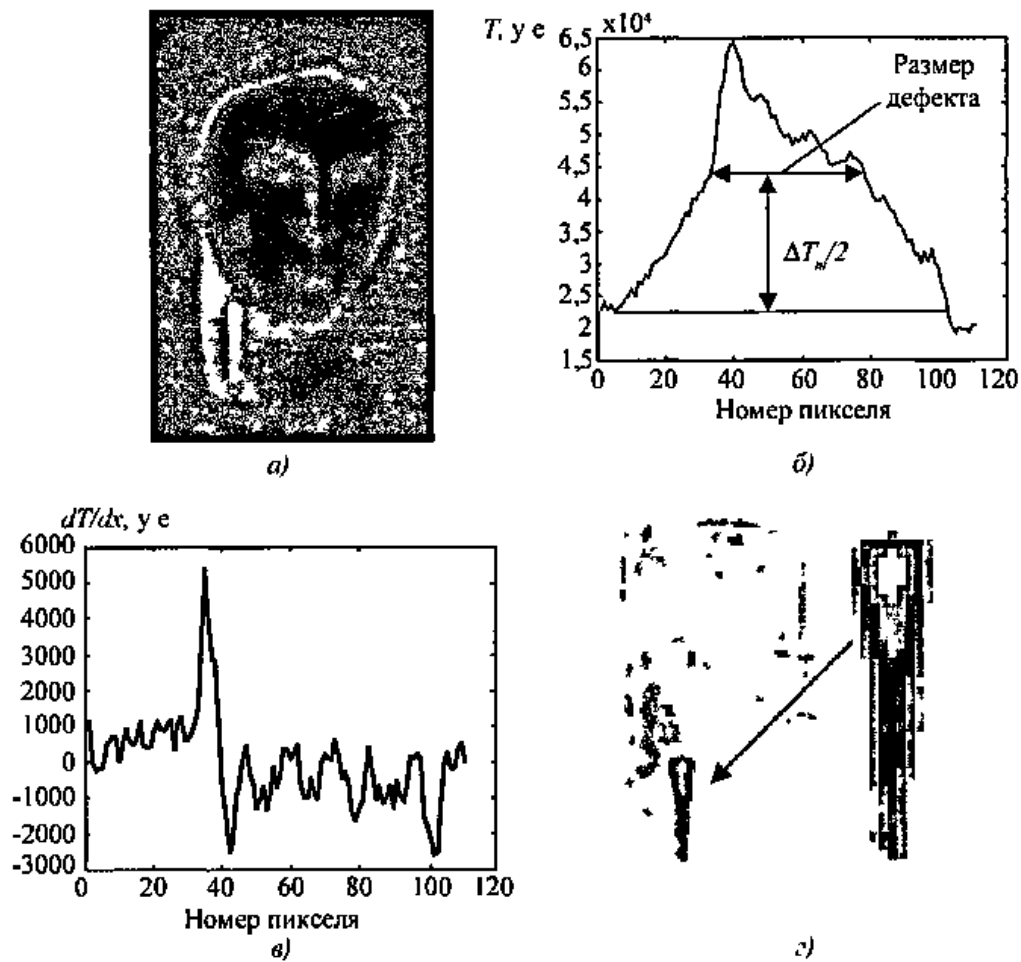


Рис. 4.4. Определение поперечного размера искусственного дефекта в иконе на дереве

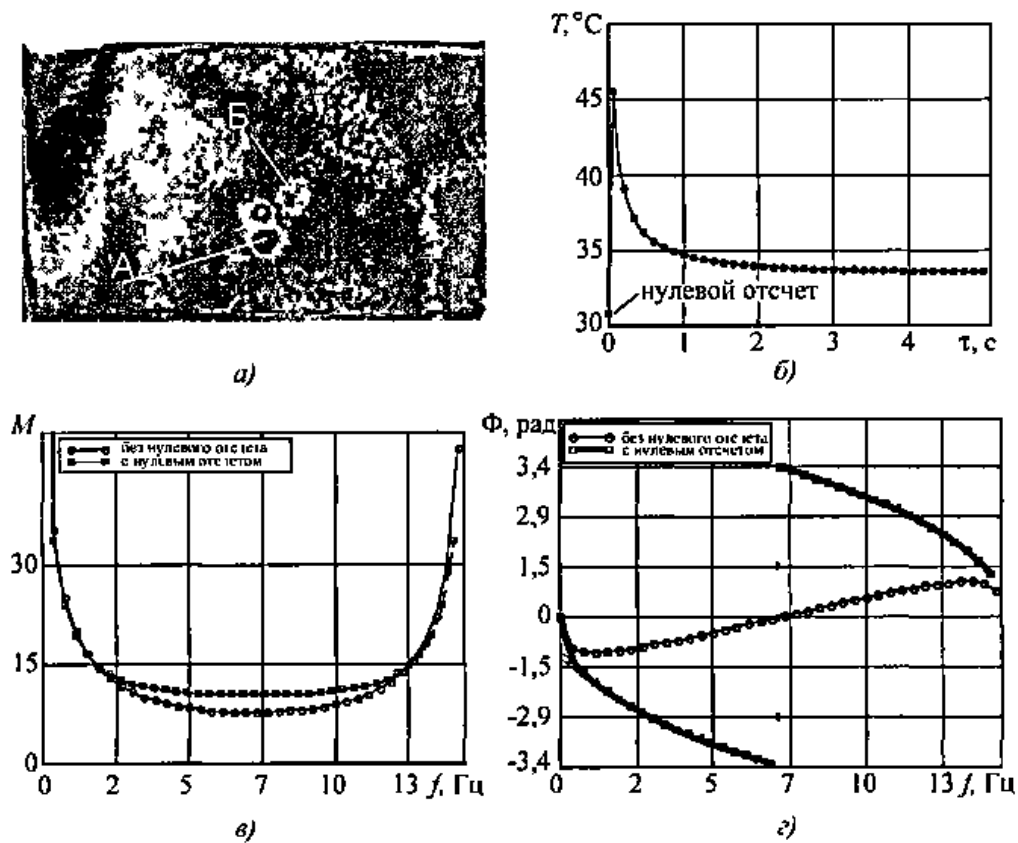


Рис. 5.4. Фурье-анализ импульсного нагрева пластины из углепластика толщиной 2 мм

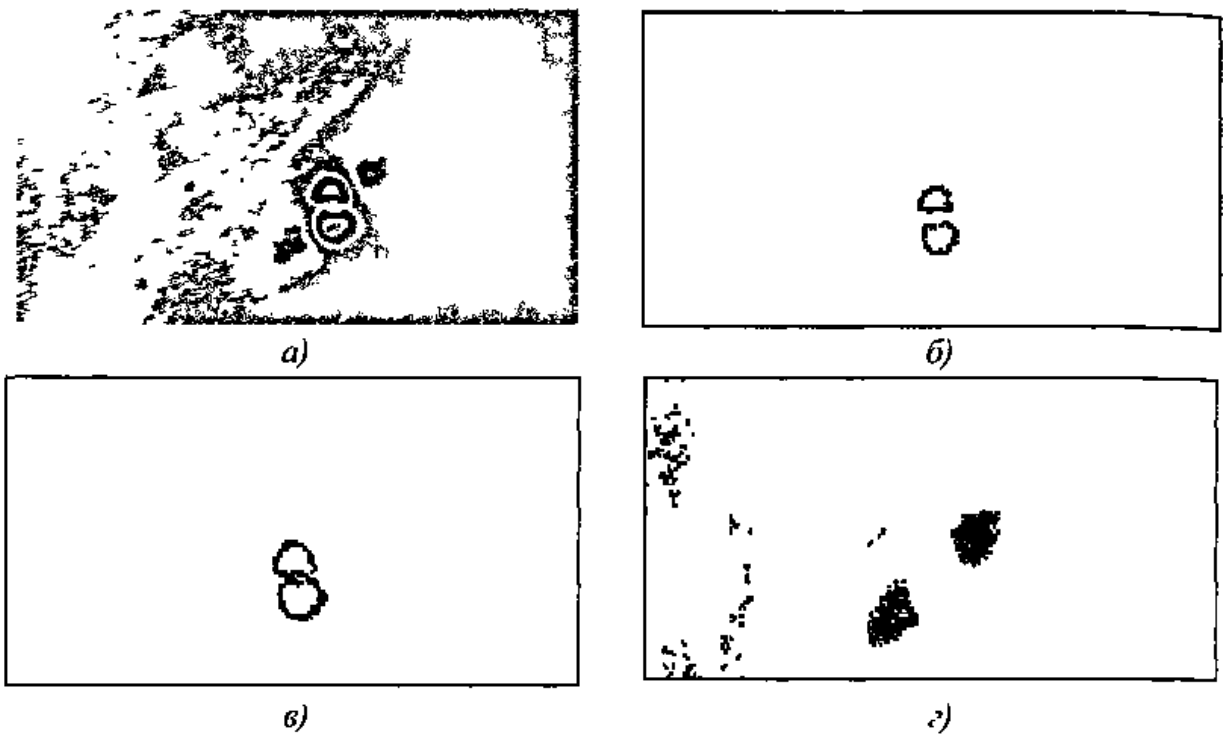


Рис. 5.6. Фазограмма (а) и фазовые тепловые томограммы (б-г) ударного повреждения в углепластике

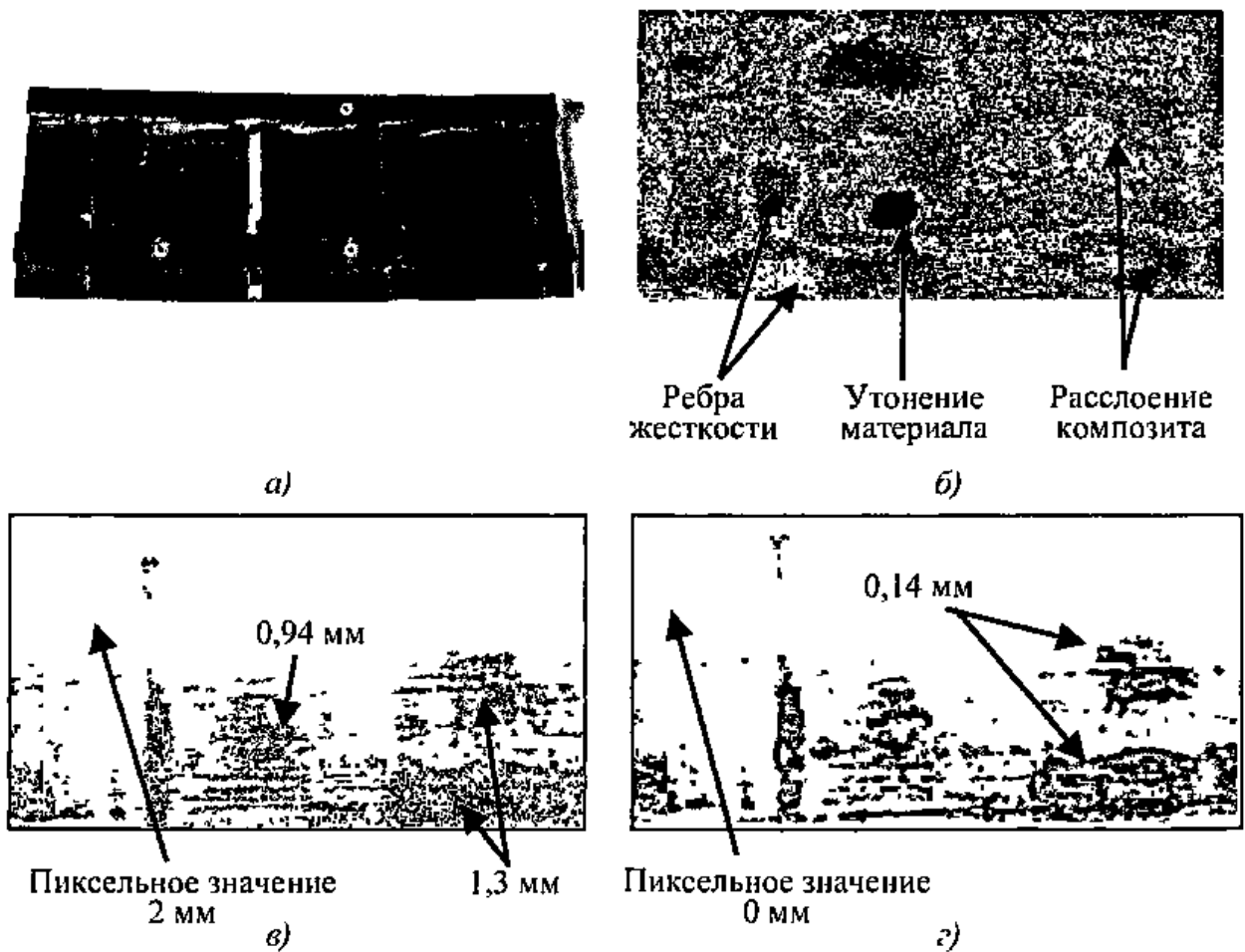


Рис. 5.8. Тепловая дефектометрия углепластиковой панели толщиной 2 мм: а – внешний вид изделия, б – оптимальная термограмма, в – глубинограмма, г – толщинограмма

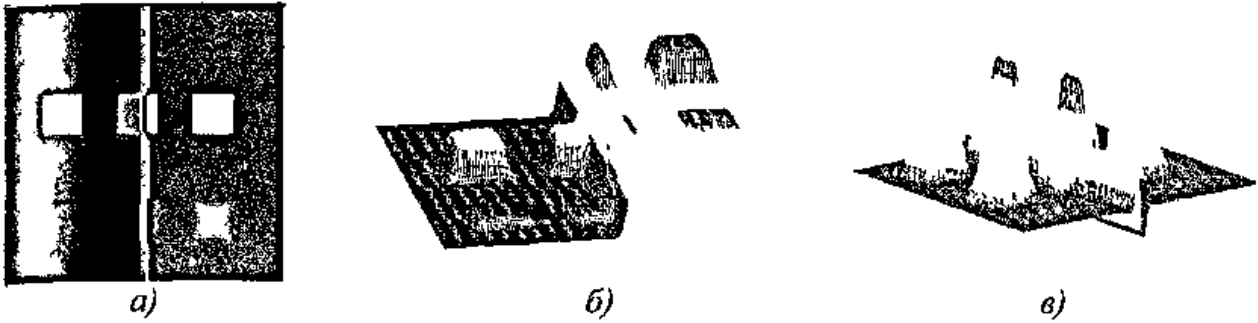
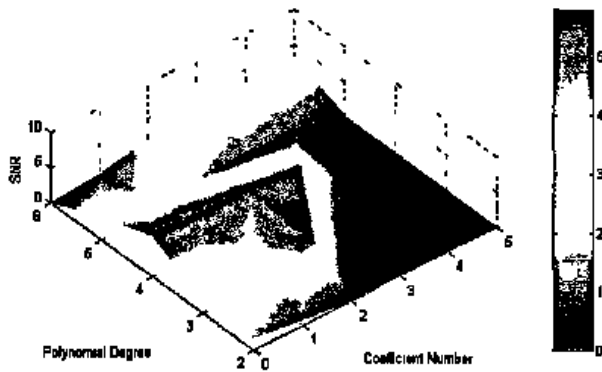


Рис. 5.11. Логарифмическая аппроксимация (ЛА) искусственной последовательности (нагрев иконы на дереве толщиной 20 мм, содержащей 6 скрытых дефектов, в течение 5 с): *a* – исходная термограмма в оптимальный момент наблюдения, *б* – изображение A_0 (полином 3-й степени), *в* – изображение A_1 (полином 3-й степени)



Рис. 5.12. Применение алгоритма КАА. Изображение коэффициентов (полиномы 3-й степени):
a – A_0 , *б* – A_2 , *в* – A_6



Степень полинома

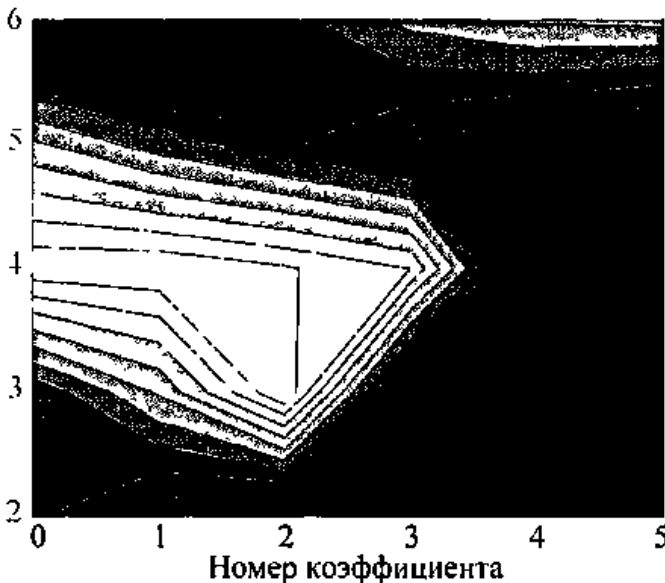


Рис. 5.13. Зависимость отношения сигнал/шум S от номера коэффициента и степени полинома при использовании алгоритма КАА для ТК иконы на дереве, результаты даны на рис. 5.14 (трехмерное и контурное представление)

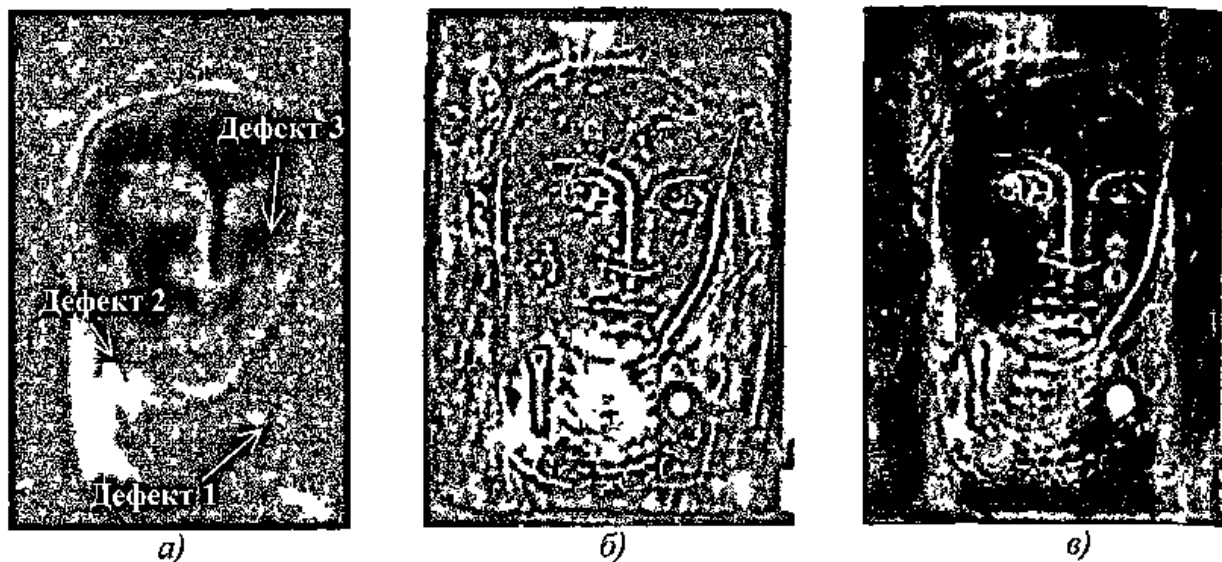


Рис. 5.14. Тепловой контроль дефектов в иконе на дереве:
a – исходная термограмма через 2,5 с после нагрева в течение 5 с ($S=1,3$ для *дефекта 1*), изображение *б* – коэффициента A_2 image (КАА, полином 3-й степени, $S=5,8$ для *дефекта 1*), *в* – критерия χ^2 (КАА, $S=9,9$ для *дефекта 1*)

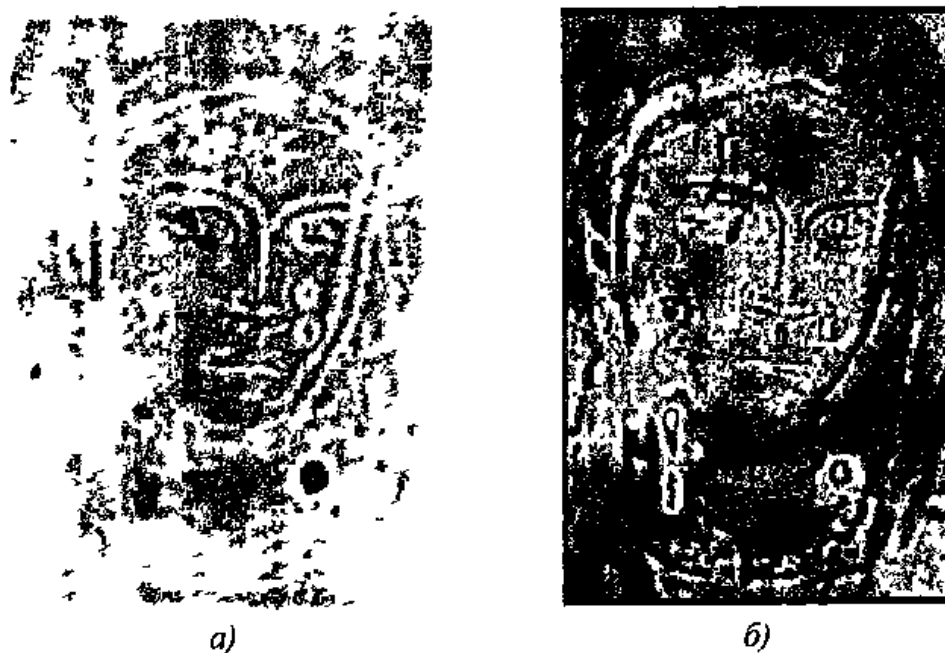


Рис. 5.15. Изображение (a) коэффициента A_3 image (JIA, полином 4-й степени, $S=0,8$) и *б* – максиграмма ($S=4,4$). См. табл. 5.3

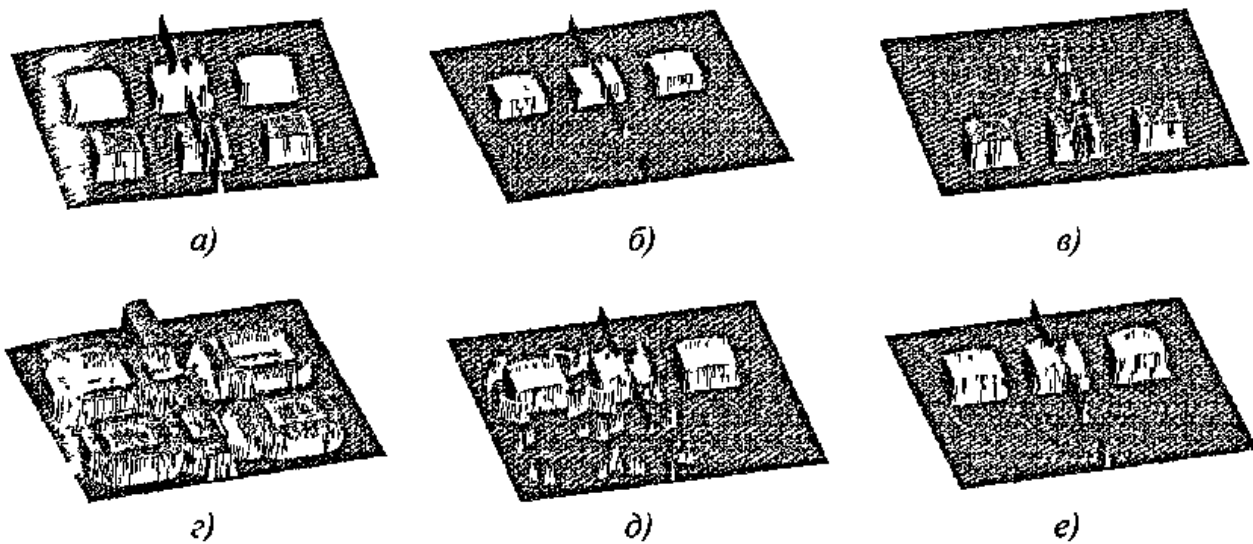


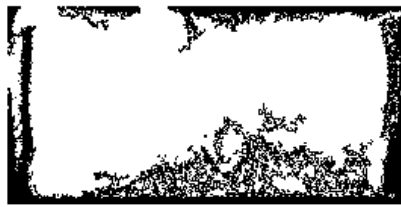
Рис. 5.17. Тепловая томография при анализе искусственной последовательности (рис. 5.11), имитирующей ТК икопы на дереве:

a – томограмма с использованием алгоритма $T^{(6)}_f - T^{(2)}_f$ (слой включает все дефекты),
б – то же, выделен верхний слой, *в* – то же, выделен нижний слой, *г* – "классическая" томограмма (выбранный слой включает все дефекты, амплитудный порог отсутствует),
д – то же, выделен верхний слой, *е* – то же, и что *г*) (выделен нижний слой, амплитудная отсечка на уровне 2%)

Исходная последовательность

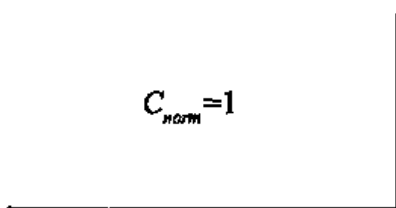


$\tau = \tau_h$



$\tau = \tau_m$

Нормализованная последовательность



$\tau = \tau_h$



$\tau = \tau_m$

Рис. 5.19. Нормализация результатов ТК углепластикового композита

Рис. 5.29. Увеличение цифрового изображения показывает его пиксельную структуру



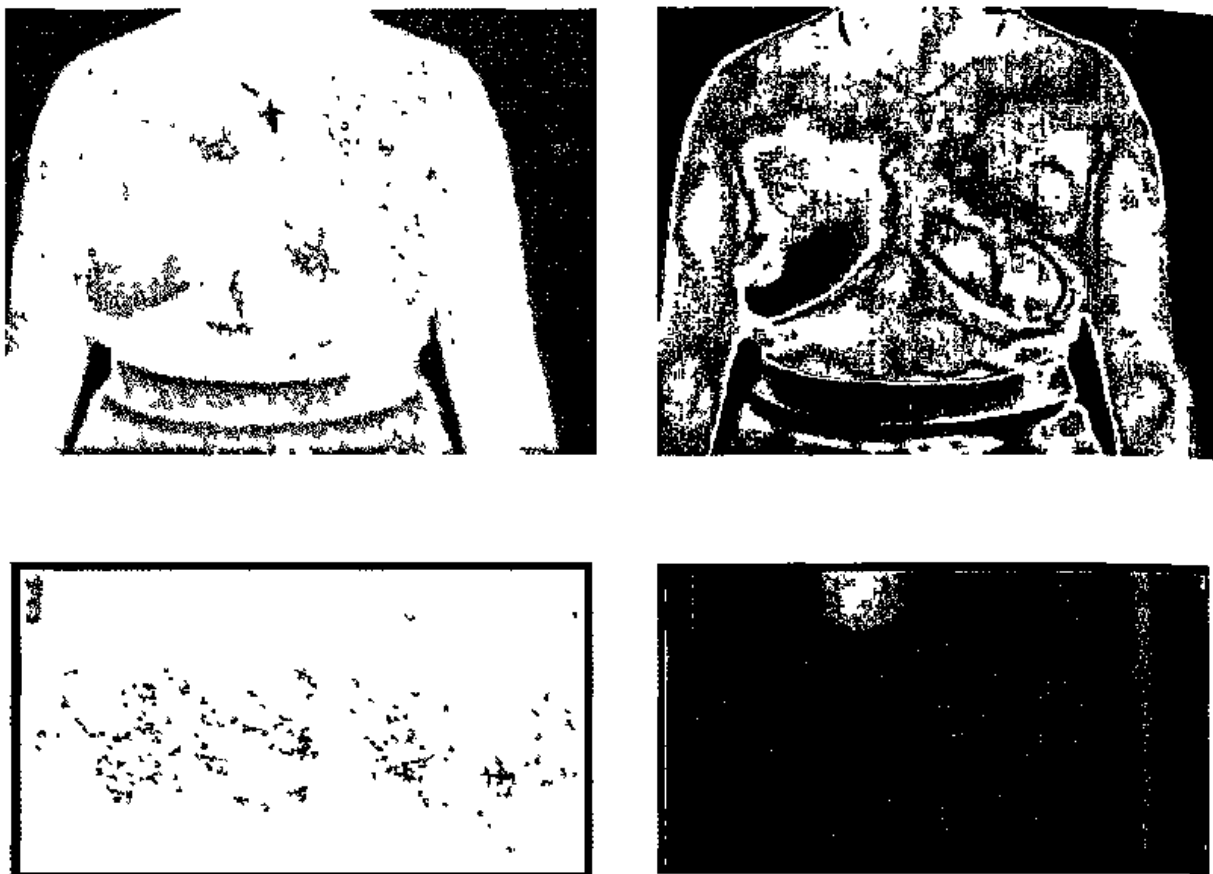


Рис. 5.30. Улучшение изображения изменением динамического диапазона и цветовой палитры (медицинская диагностика и дефекты в углепластике)



Рис. 5.31. Дефекты, обнаруженные с помощью подбора палитры контрастных цветов

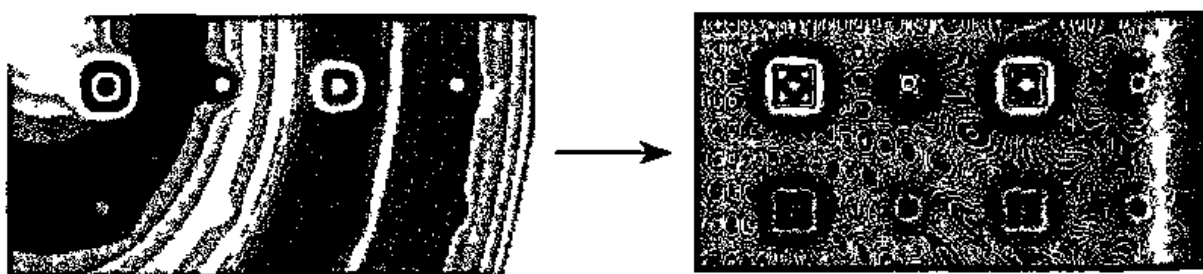


Рис. 5.32. Повышение резкости изображения дефектов с помощью ФРЧ (искусственное изображение)

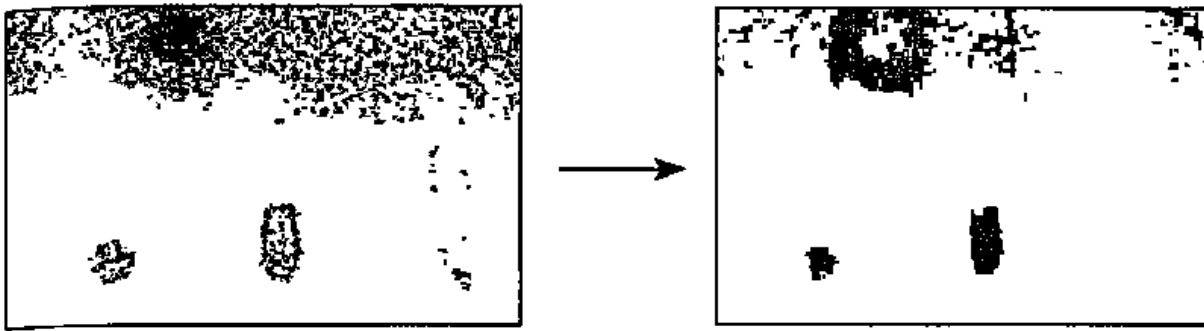


Рис. 5.33. Морфологическая фильтрация (эрозия)



a)



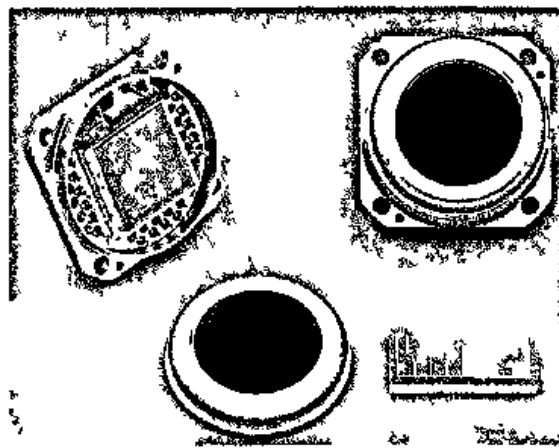
б)

Рис. 5.34. Вычитание (*a*) и деление (*б*) изображений (фторопластовые вставки в углепластике)



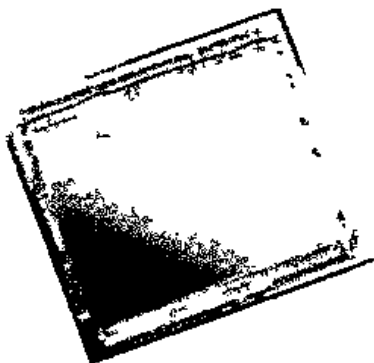
Litton Electro-Optical Systems

256x256 InSb
 CMOS мультиплексор (возможен режим snapshot)
 Размер пикселя 30x30 мкм
 Спектральный диапазон 3,4-4,95 мкм



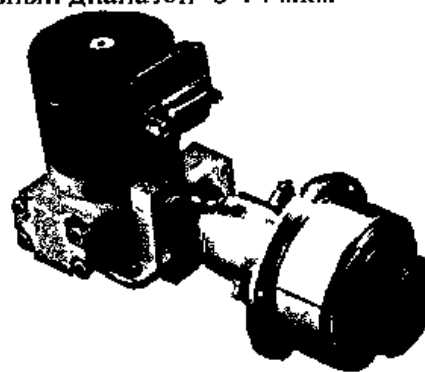
Boeing

U3000 Неохлаждаемая болометрическая матрица
 Формат 320 x 240
 Частота смены изображений 60 Гц
 Размер пикселя 51x51 мкм
 Фактор заполнения 60%
 Спектральный диапазон 8-14 мкм



Santa Barbara Focalplane

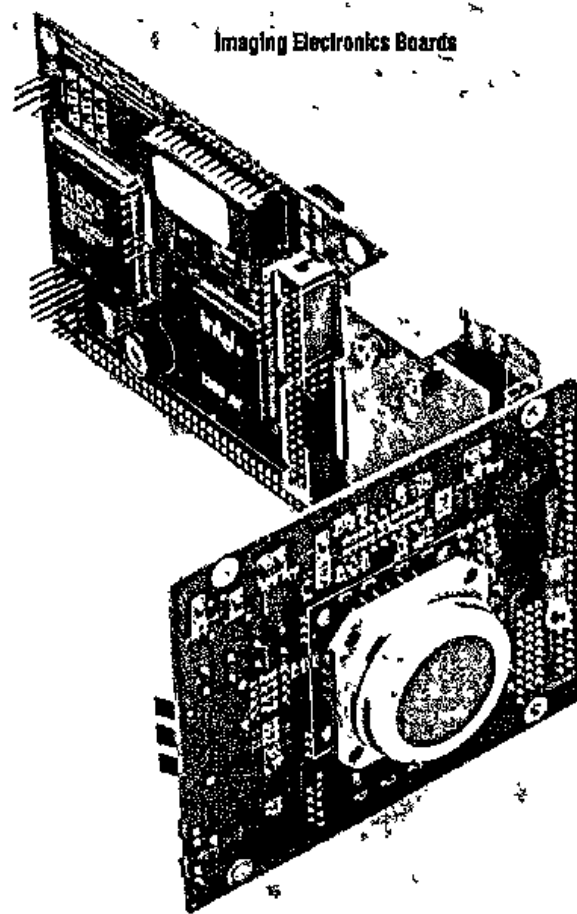
1280x1024 матричный детектор
 Частота смены изображений 60 Гц
 Режим snapshot



BAE Systems

640x512 кви-матрица
 Рабочая температура 70K (холодильник Стирлинга)
 Температурное разрешение 30 мК
 Спектральный диапазон 8-10 мкм

Рис. 7.10. Зарубежные матричные фотоприемники



Тип детектора	болومتر Boeing U3000
Формат матрицы	320 x 240
Спектральный диапазон, мкм	8 – 14
Частота смены изображения, Гц	60
Температурное разрешение, мК	< 80
Рабочая температура, °С	от -20 до +60
Масса, г	405
Питание	AC/DC адаптер или аккумулятор
Потребляемая мощность, Вт	12

Рис.7.15. Неохлаждаемый ИК тепловизионный модуль SE-U20 (Boeing, США)

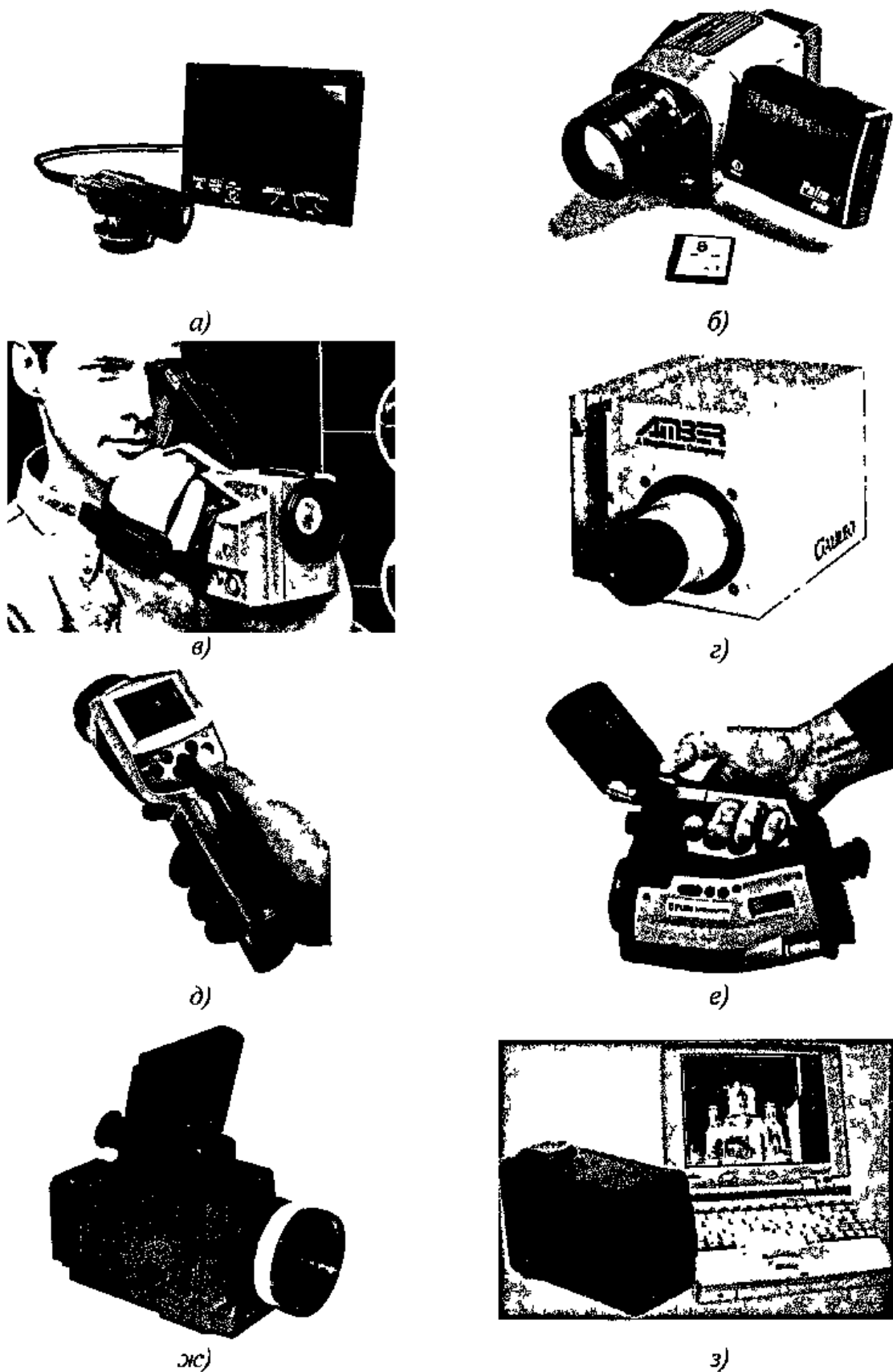
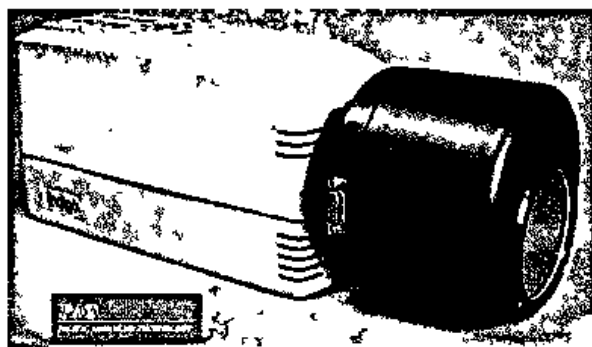


Рис. 7.16. Модели типовых тепловизоров:
a – DVE-1000 (Digital Imaging Infrared), *б* – PalmIR Pro (Raytheon), *в* – ThermoCAM 695 (FLIR Systems), *г* – Galileo (Amber Raytheon), *д* – ThermoCAM E2 (FLIR Systems), *е* – ThermoCAM P60 (FLIR Systems), *ж* – ТН-4604 МП1, *з* – ИРТИС 200



Спектральный диапазон, мкм	3,0-5,0
Номинальное спектральное разрешение (0,01мкм при 4 мкм)	0,25 % $\Delta\lambda/\lambda$
Оптика (при 4 мкм)	$f/2.5$
Поле зрения (при 4 мкм)	5,3x5,3
Мгновенный угол зрения (при 4 мкм), мкрад	372

Рис. 7.17. Визуализирующий спектрометр IMSS-M1

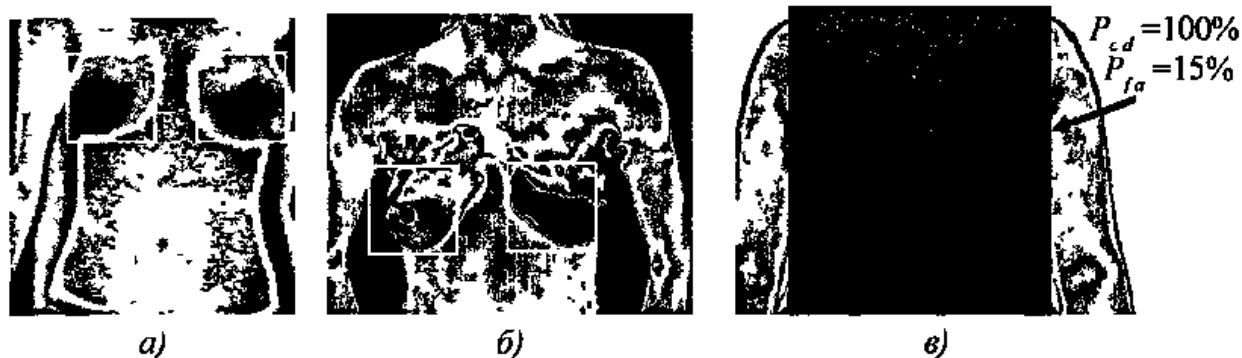


Рис. 8.5. Статистическая обработка данных в медицине (программа ThermoStat)

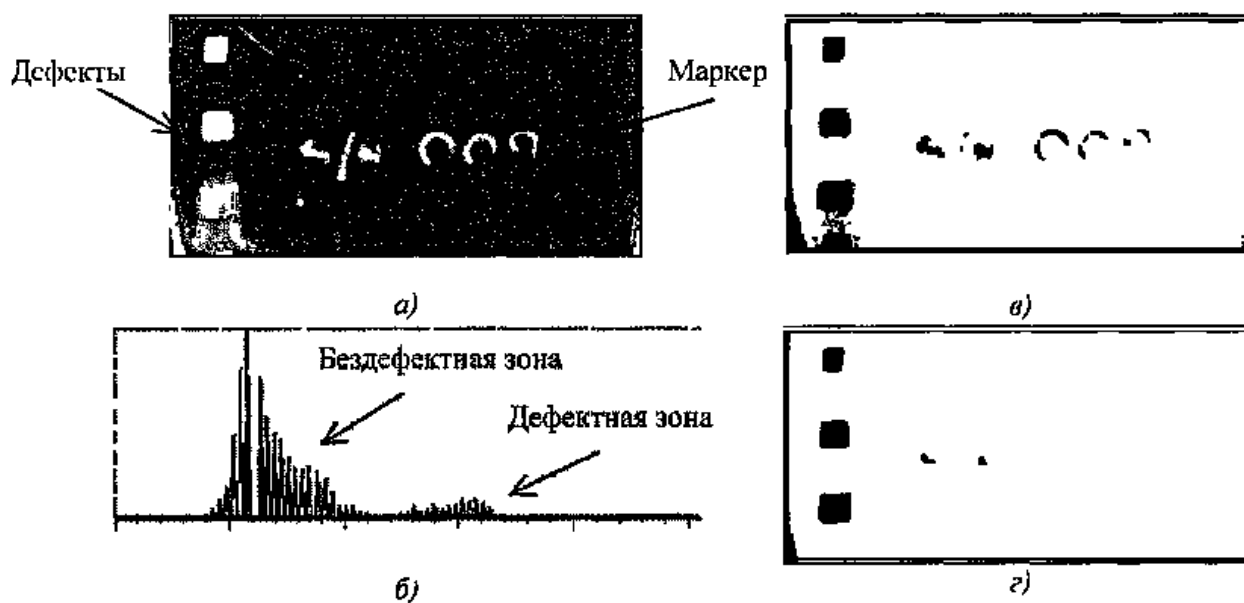


Рис. 8.6. Результаты статистической обработки результатов ТК образца из углеродистика



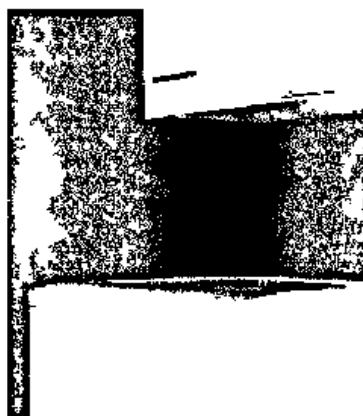
Рис. 9.3. Пример паложения ИК термограммы на видимое изображение жилого дома



Рис. 9.4. Индивидуальный дом



а)



б)

Рис. 9.5. Дефектный вертикальный шов при паружной и внутренней съемках

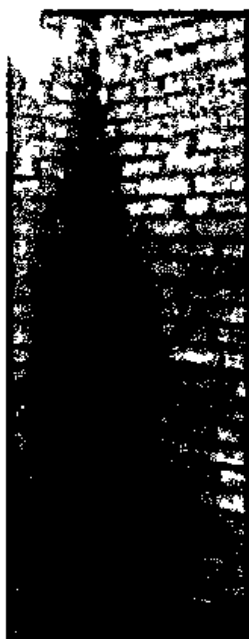


Рис. 9.6. Дефектный вертикальный шов (съемка внутри помещения)



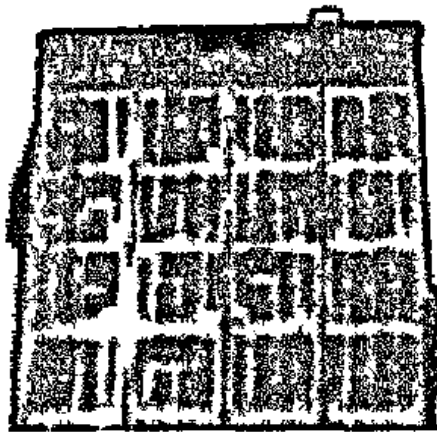
Рис. 9.7. Отслоение декоративной штукатурки от основной стены



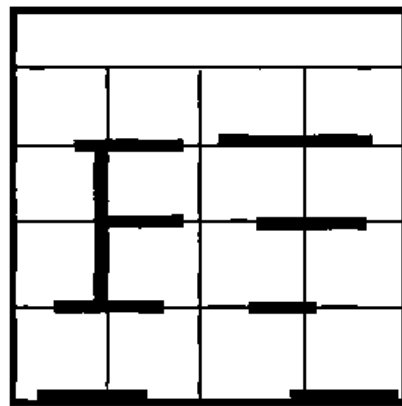
Рис. 9.8. Фасад административного здания со сплошным остеклением



Рис. 9.9. Торец главного корпуса тепловой станции



а)



б)

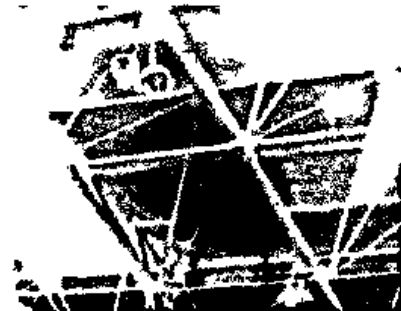
Рис. 9.10. Фрагмент торца жилого панельного дома и карта дефектов



а)

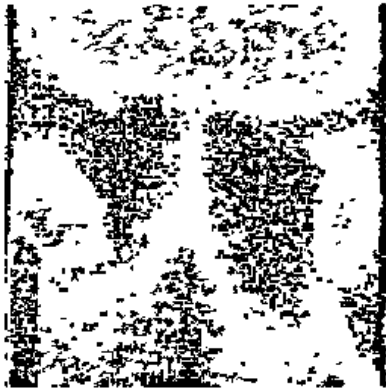


б)



в)

Рис. 9.11. Тепловизионное обследование плоских крыш



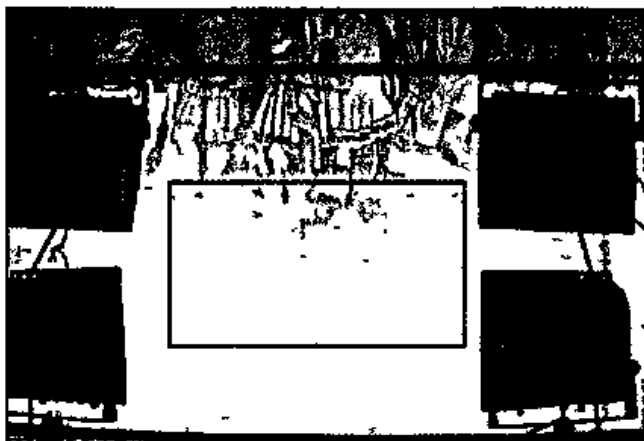
a)



б)

Рис. 9.13. Результаты тепловизионной съемки стыков ригелей и вертикальных колонн развалин казармы ТВВКУС после катастрофы 17 июля 1997 г. [111]:

a – съемка 25 июля 1997 г, амплитуда температурной аномалии 0,8 °С, средняя температура колонны 13 °С, *б* – съемка 26 августа 1997 г, тепловой шум амплитудой 0,3 °С, средняя температура колонны 12 °С



a)



б)



a)



б)

Рис. 9.16. ТК фрески Фоголино в г. Бергамо (Италия), исходные изображения предоставлены Э. Гриццато

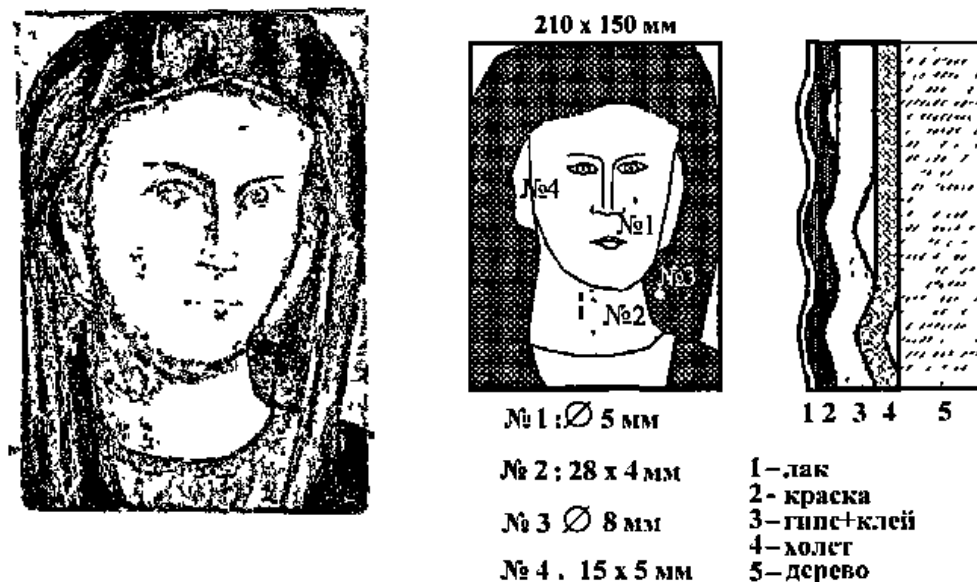


Рис. 9.17. Стандартный образец иконы на дереве [121]

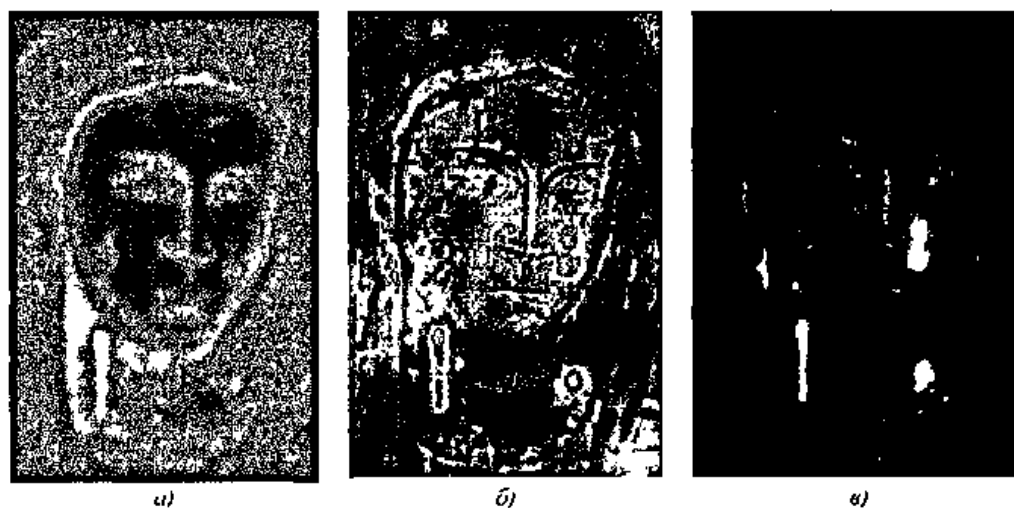


Рис. 9.18. Экспериментальные результаты ТК иконы на дереве (оптимизация по дефектам "Стержень", "Пузырьки" и "Точка"):

а - исходная термограмма через 2,5 с после окончания нагрева, $S=1,29$ (идентично рис 5 20, а), б - максиграмма после полиномиальной аппроксимации и нормализации, $S=3,51$, в - дефектная карта, $P_{cd}=80\%$, $P_{fa}=3\%$

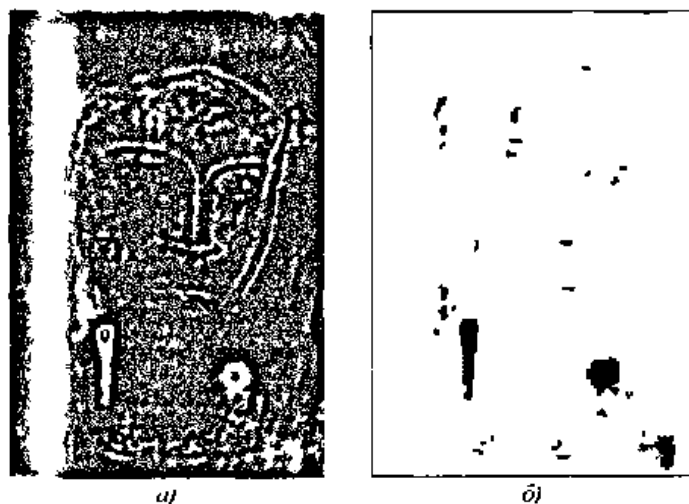


Рис. 9.19. Экспериментальные результаты ТК иконы на дереве (оптимизация по дефекту "Точка"):

а - изображение коэффициента A_3 (три члена полинома), $S=5,79$, б - дефектная карта, $P_{cd}=100\%$, $P_{fa}=3\%$

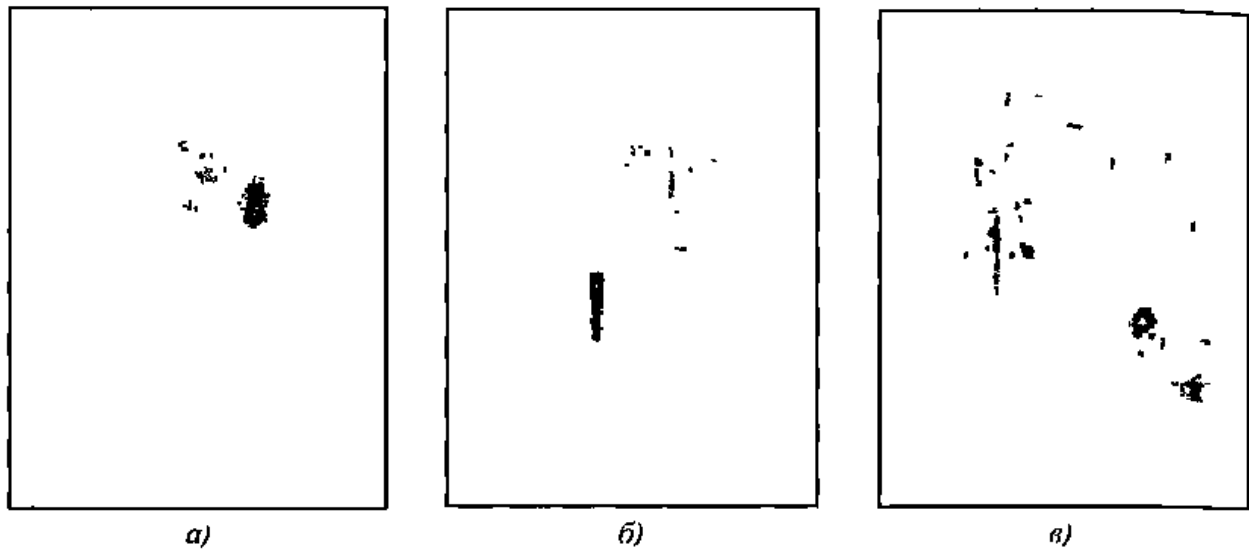


Рис. 9.20. Томографическое представление дефектов в икопе на дереве:
a – слой 0,3 – 0,8 мм, *б* – слой 0,81 – 0,91 мм, *в* – слой 1,43 – 1,47 мм

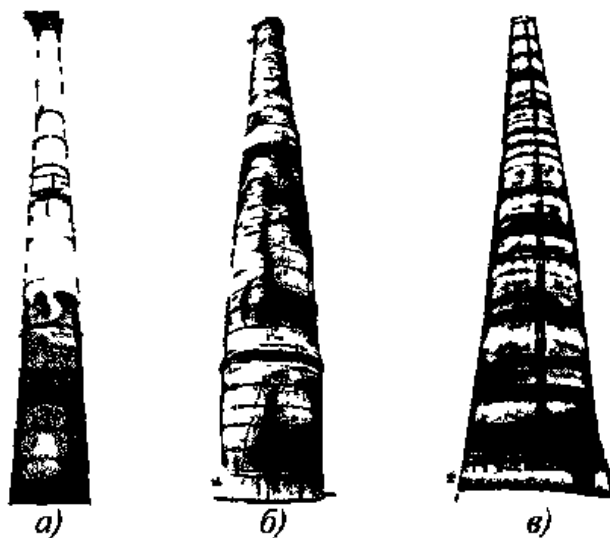


Рис. 9.21. Папорампные термограммы ДТ:
a – металлическая труба высотой 40 м с внутренней футеровкой, достигающей половины высоты (видно разрушение верхней части футеровки, градиент температуры до 6 °С), *б* – кирпичная труба высотой 60 м с многочисленными трещинами (градиент температуры до 7 °С), *в* – железобетонная труба с нарушениями теплоизоляции (градиент температуры до 3 °С)

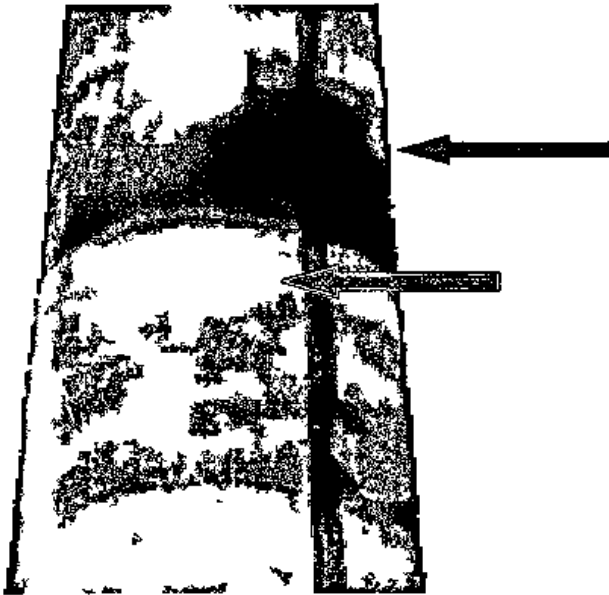


Рис. 9.22. Термограмма зон пониженной теплозащиты (температурный градиент до $+4^{\circ}\text{C}$) и повышенной пористости бетона (температурный градиент до -5°C) железобетонной ДТ

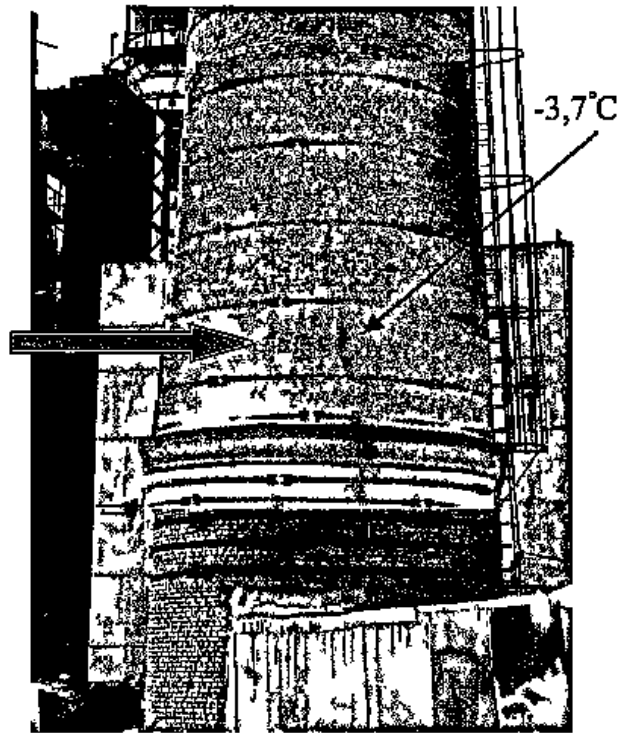


Рис. 9.23. Термограмма отремонтированной вертикальной трещины в кирпичной трубе обнаружила сохранение присоса атмосферного воздуха с градиентом до $-3,7^{\circ}\text{C}$



Рис. 9.24. Термограмма зоны примыкания кирпичного газохода к железобетонной ДТ (градиент температуры в зоне снижения теплозащиты $+5^{\circ}\text{C}$, в зоне присоса атмосферного воздуха -6°C)

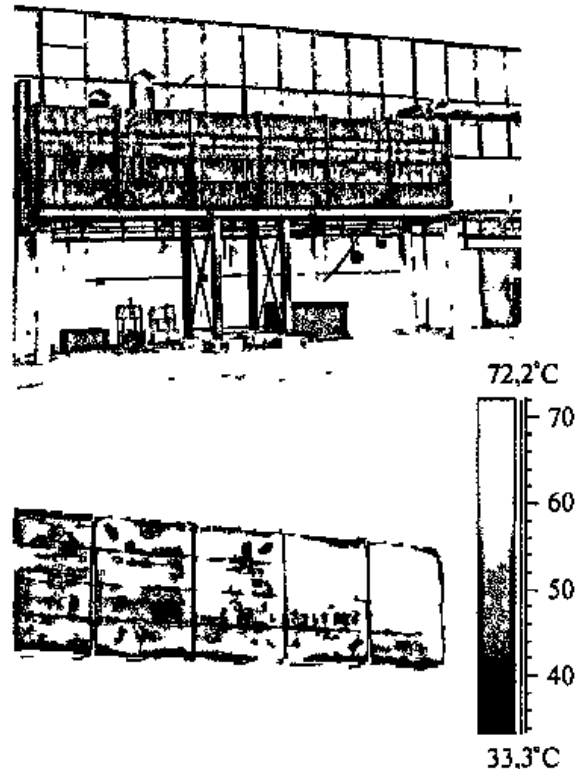
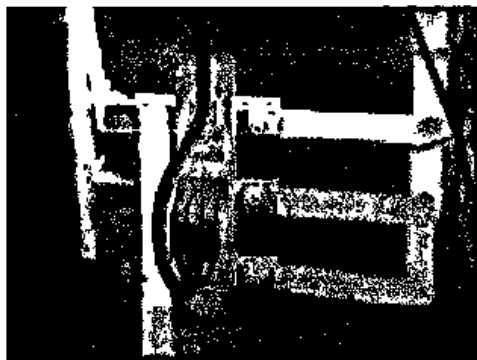


Рис. 9.25. Термограмма зоны износа внутренней футеровки металлического газохода



Перегрев мощных шин
на гидроэлектростанциях



Перегретый контакт на
электрической подстанции

Рис. 9.26. Тепловизионная диагностика электрооборудования



a)



б)

Рис. 9.29. Обнаружение мест нарушения вакуума в турбоустановках тепловой станции: *a* – зона между корпусом турбины и теплоизоляцией (средняя температура теплоизоляции 41 °С, понижение температуры в зоне дефекта до 8 °С), *б* – присос воздуха через трещину в корпусе турбины

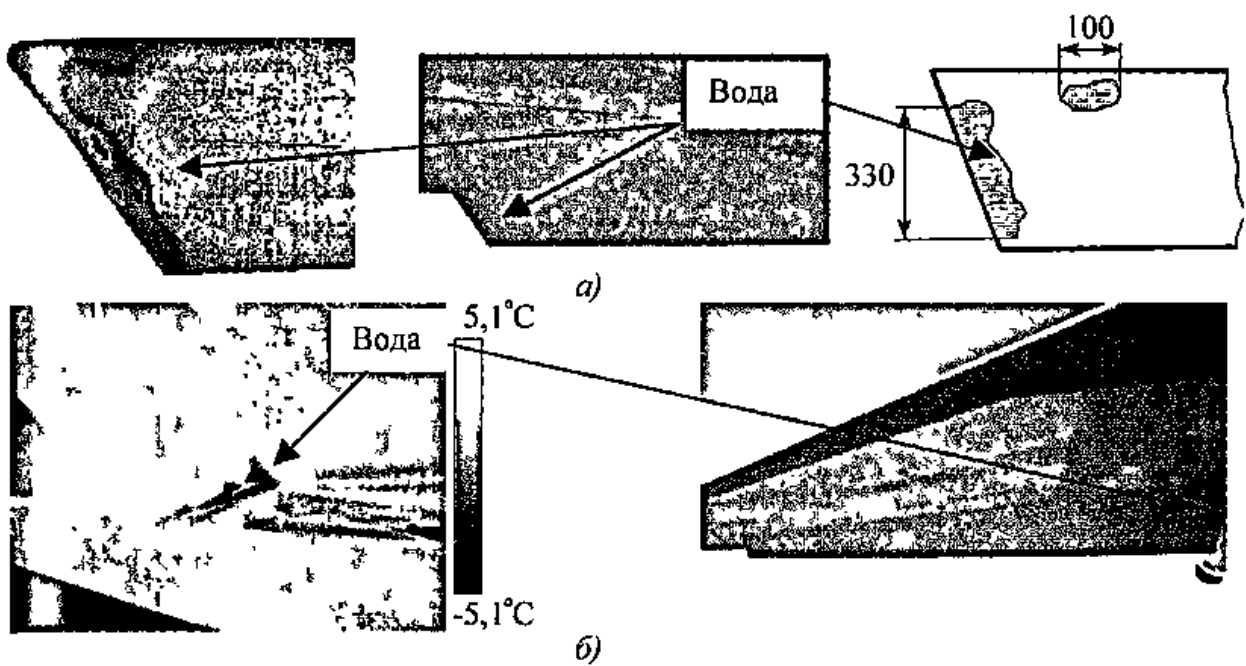


Рис. 9.30. Пассивный ТК воды в композиционных сотовых конструкциях самолета ТУ-204 (через 1 ч после посадки):
a – элерон (справа карта дефектов, полученная УЗ-методом за 2 месяца до тепловизионной съемки), *б* – руль высоты

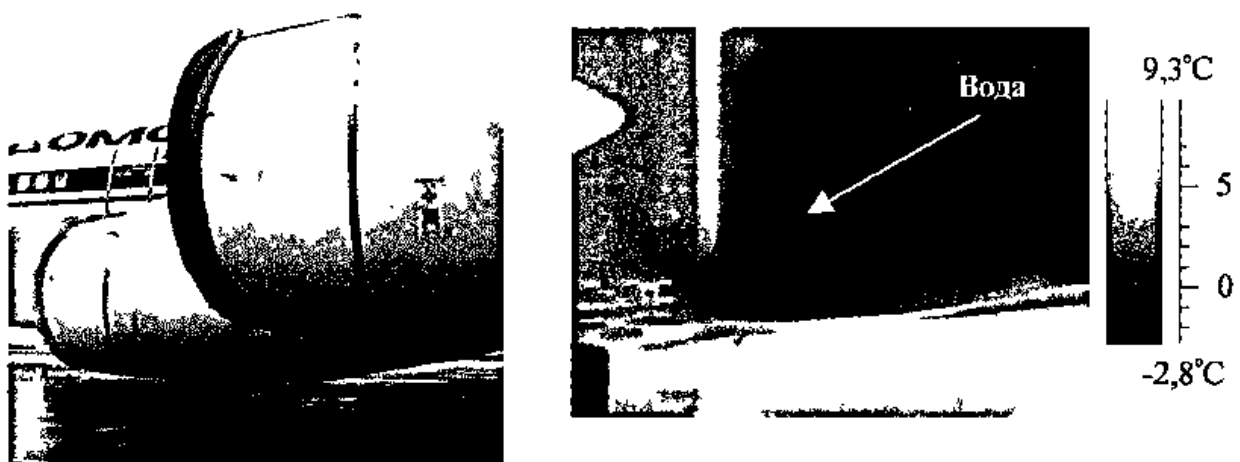


Рис. 9.31. Пассивный ТК воды в алюминиевых сотах воздухозаборников двигателей самолета ИЛ-96 (через 1 ч после посадки)

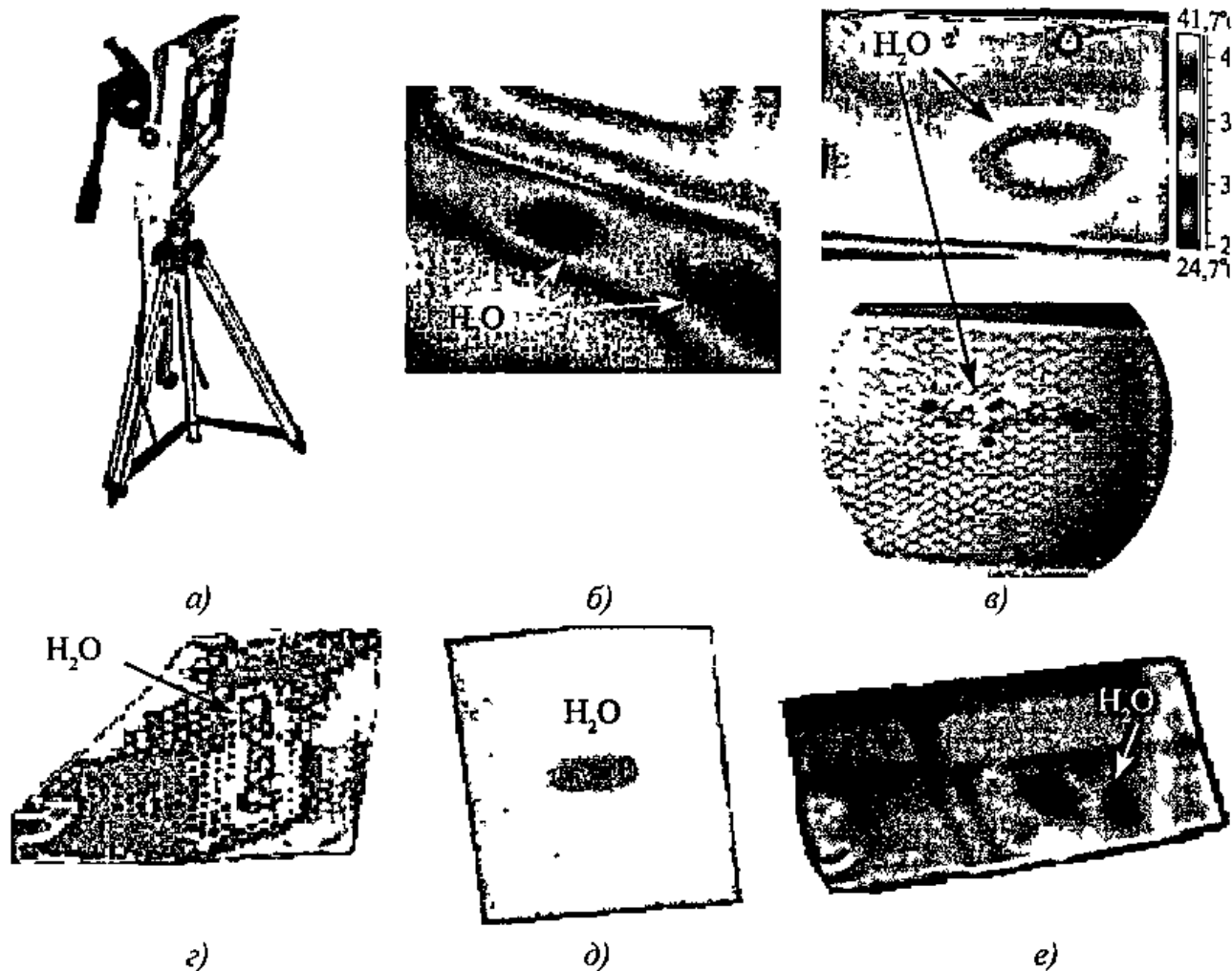


Рис. 9.32. Активный ТК воды в авиационных сотовых панелях:

а – оптический нагреватель, совмещенный с тепловизором, термограммы *б* – алюминиевой сотовой панели с двумя зонами воды, *в* – и рентгенограмма алюминиевой панели, *г* – панели "стеклопластиковая обшивка – алюминиевые соты", *д* – панели "углепластиковая обшивка – бумажные соты", *е* – стальной сотовой панели

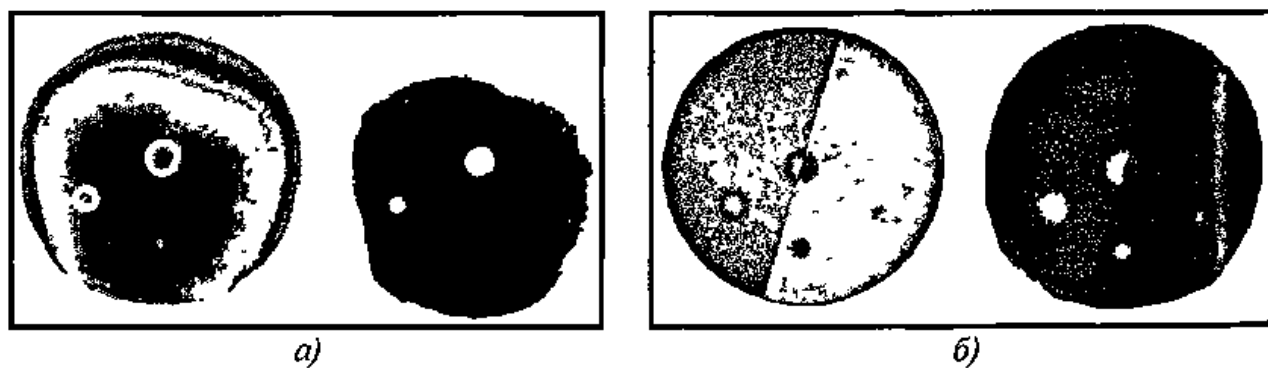


Рис. 9.35. Активный ТК стандартного образца (рис. 9.34) [147]:

а – исходное изображение в оптимальный момент времени и карта дефектов ($S=0,85$; $P_{cd}=78\%$, $P_{fa}=30\%$), *б* – фазограмма и карта дефектов ($S=2,59$; $P_{cd}=63\%$, $P_{fa}=5\%$)

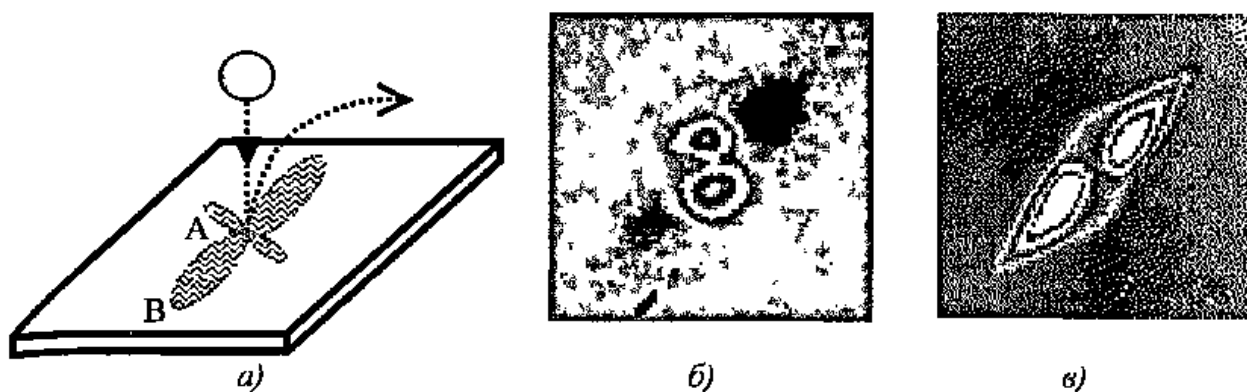


Рис. 9.38. Ударное повреждение углепластикового композита:
а - производство эталонного ударного повреждения, *б* - термограмма передней поверхности при импульсном возбуждении, *в* - термограмма задней поверхности при импульсном возбуждении (метод раннего обнаружения)

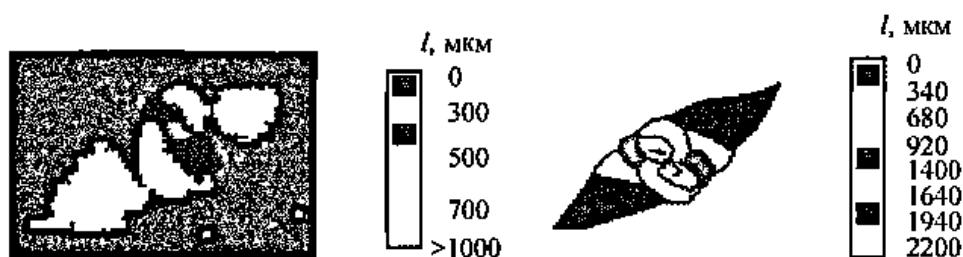


Рис. 9.39. Глубинограмма ударного повреждения в углепластике, полученная методом тепловой томографии (слева) и УЗВ С-сканирования (справа)

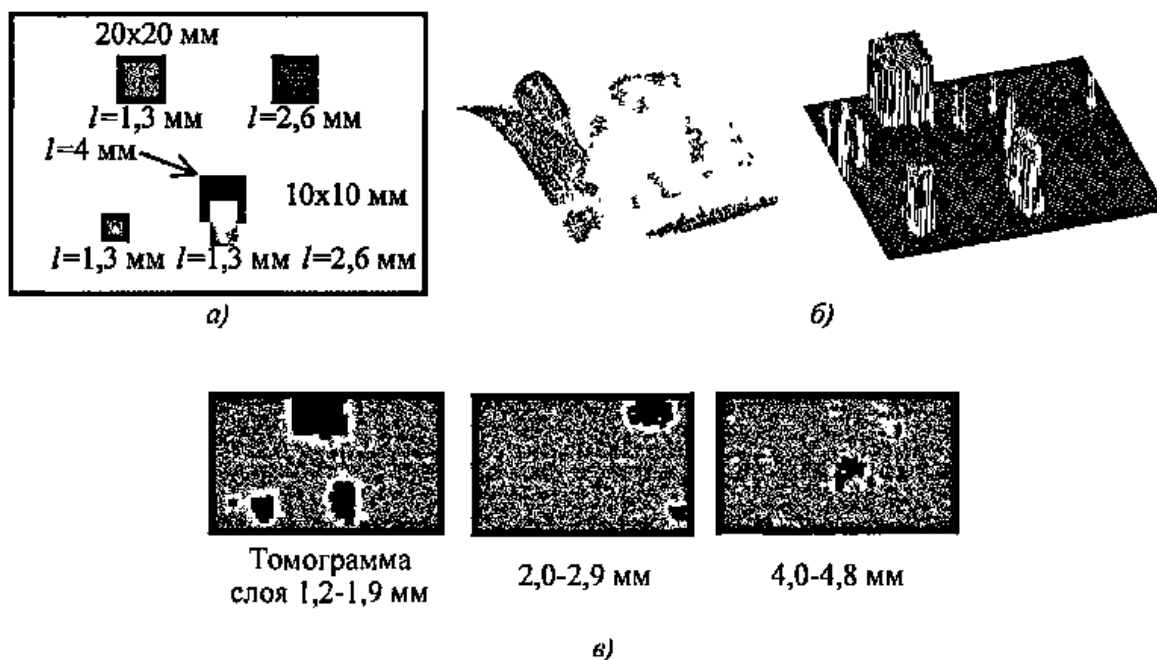
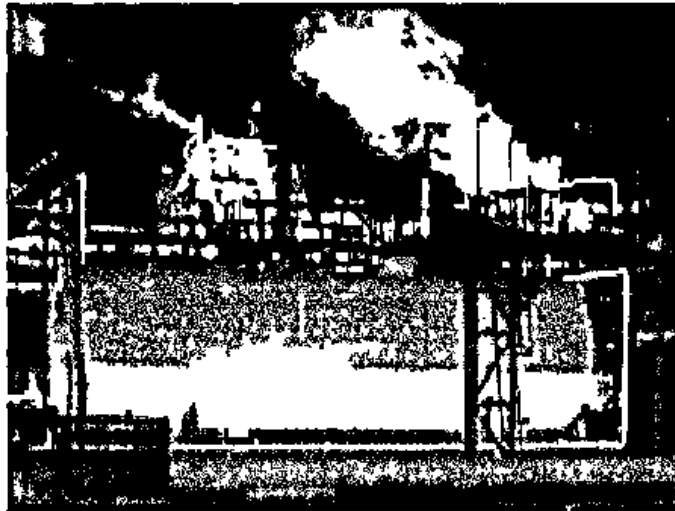


Рис. 9.40. Тепловая томография образца из углепластика толщиной 5 мм с искусственными дефектами в виде фторопластовых вставок (*l* – глубина залегания дефектов; программа ThermoFit):

а - схема расположения дефектов, *б* - исходное изображение (слева) и томограмма слоя 1,2-1,9 мм (справа), *в* - тепловые томограммы



a)



б)

Рис. 9.41. Температурное поле химического реактора (а) и резервуара (б)

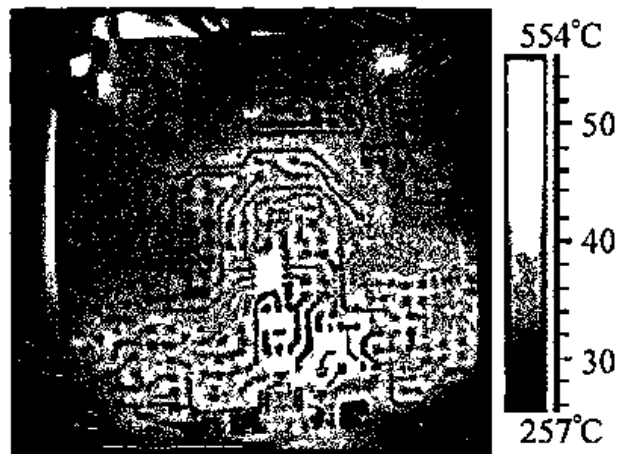


Рис. 9.42. Тепловое поле печатной платы с перегретыми элементами (с разрешения фирмы FLIR Systems)

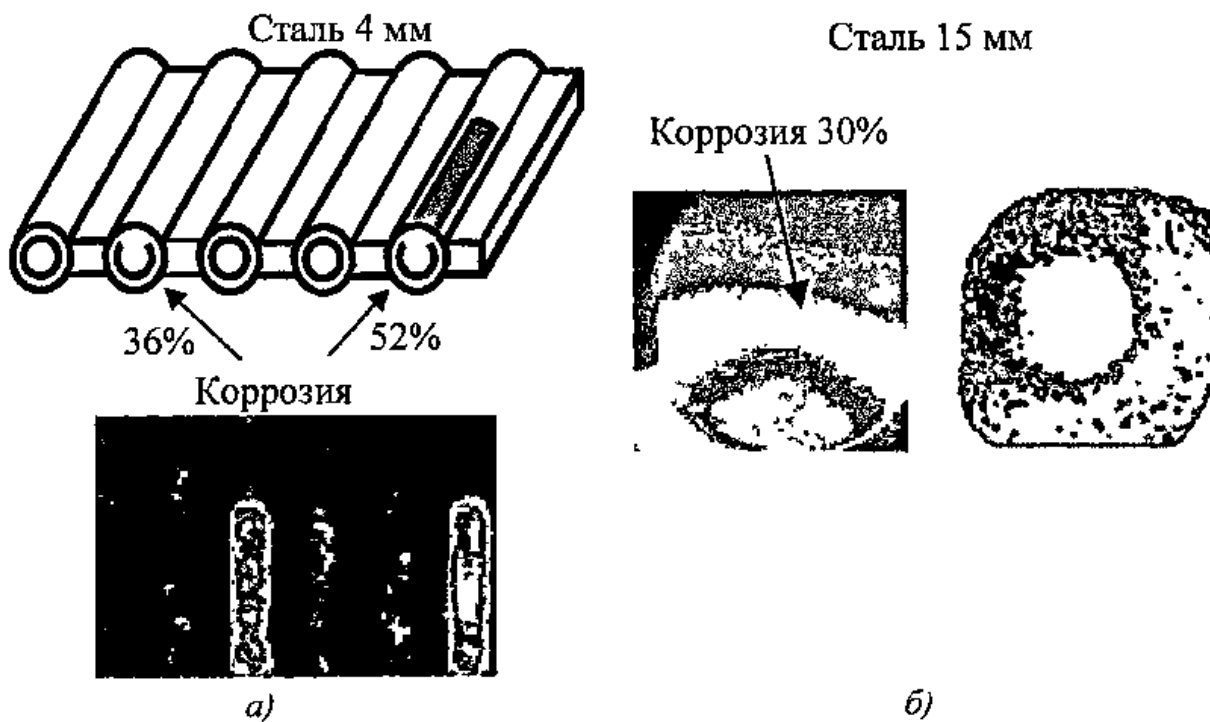


Рис. 9.51. Обнаружение коррозии задней стенки в стальных изделиях:

а – секция котла ТЭС (импульсный нагрев 6 кДж, 10 мс), толщина стальной стенки 4 мм,
б – стальной лист толщиной 15 мм (нагрев галогенными лампами 1 кВт, 300 с, слева – исходное изображение, справа – тепловая томограмма)

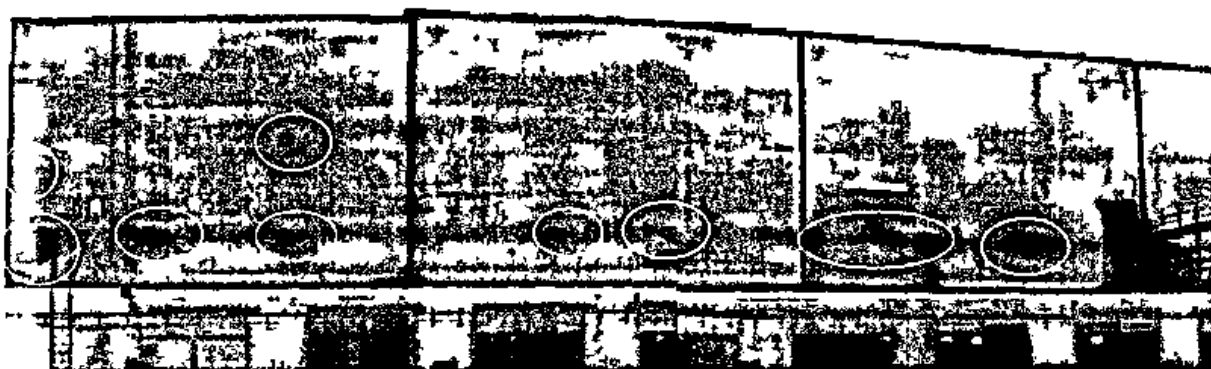
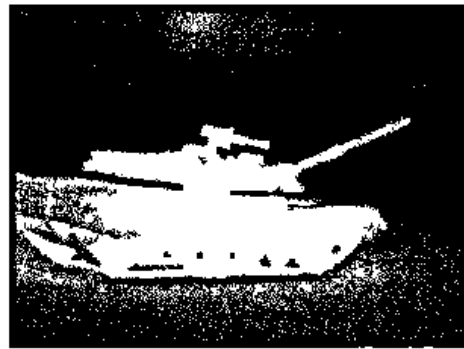


Рис. 9.52. Термограмма стены холодильного корпуса

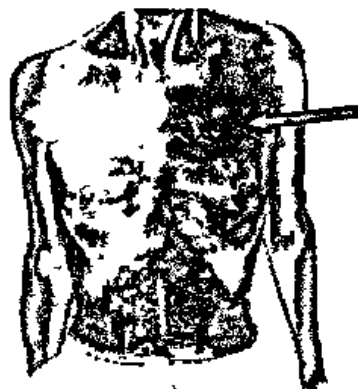


a)

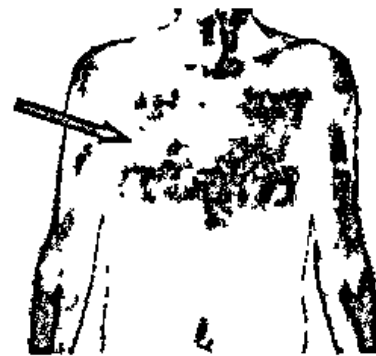


б)

**Рис. 9.54. Применение тепловизоров в качестве приборов ночного видения (ПНВ):
a – полицейская операция, *б* – обнаружение босвой техники**



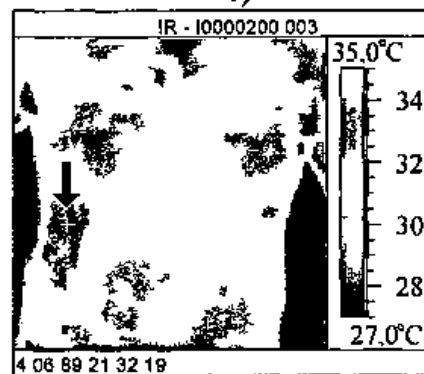
a)



б)



в)



г)

**Рис. 9.55. Термографическое проявление патологий:
a – рак левого легкого, *б* – лимфогранулематоз лимфоузлов средостения,
в – варикозное расширение вен на ранней стадии, *г* – рак печени**

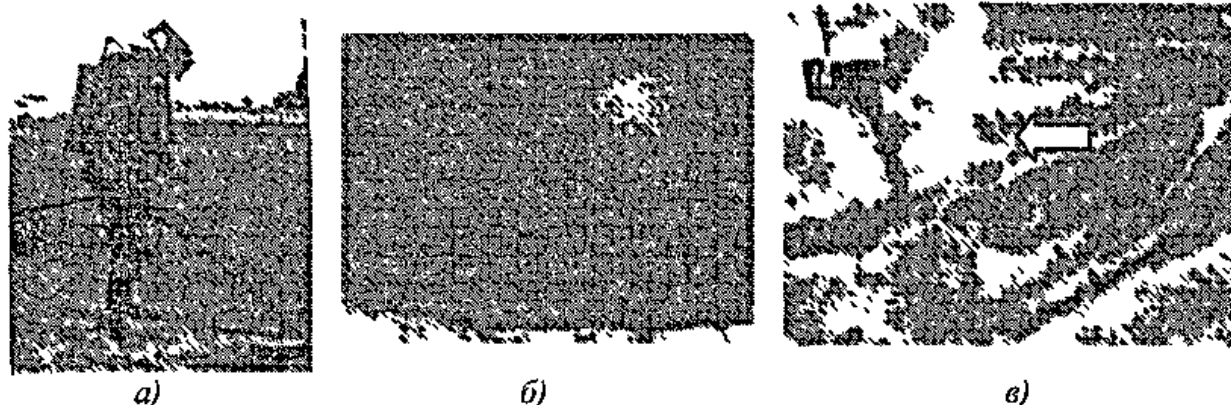


Рис. 9.53. Обнаружение скрытых в почве противопехотных мин:

а – солдат армии США использует детектор металла, нащлемный тепловизор и радар, *б* – термограмма мин без оболочки (справа) и в алюминиевом корпусе (слева), размещенных в песке на глубине 3 см (мощность инсоляции около 250 Вт/м^2), *в* – термограмма двух мин, скрытых в почве открытого лесного участка (снято с высоты 30 м)

боя и в зонах проживания населения имеется большое количество металлических объектов, создающих высокий уровень ложной тревоги. В настоящее время перспективными считают радары с излучением, направленным в почву, а также тепловизионные системы (рис. 9.53, *а*).

Стратегия использования различных методов НК основана на том, что мина, внесенная в почву, обладает иными, по сравнению с почвой, физическими свойствами (плотностью, теплоемкостью, электропроводностью и т.п.), а также изменяет локальную структуру почвы. С точки зрения ТК важно, что мины обладают специфическими ТФХ, а процесс их внесения сопровождается образованием воздушной рубашки вокруг мины, изменениями влажностного режима почвы, коэффициента излучения и структуры растительного покрова. Принципы активного и пассивного ТК могут быть применены, если соответствующие идентификационные параметры (температура или коэффициент излучения) обеспечивают сигнал, превышающий уровень помех.

Тепловизоры используют для обнаружения мин, скрытых в почве, в течение нескольких десятилетий. В монографии Р. Хадсона [1] упоминается, что предельная глубина обнаружения может достигать 40 см, что представляется преувеличением

в свете более поздних исследований. Механизм чистой теплопроводности был рассмотрен в п. 3.10, в результате чего было показано, что предельная глубина обнаружения противопехотных мин в большинстве случаев не превышает 5–10 см. Учет других физических феноменов и шумовых факторов, сопровождающих процесс внесения мин, приводит к сложной комбинации идентификационных параметров, что делает процесс принятия решения ненадежным.

На рис. 9.53, *б* показана термограмма двух мин, размещенных в песке на глубине 3 см. Несмотря на равномерный излучательный фон, поверхностные тепловые отпечатки мин составляют доли градуса вследствие слабой (в данном случае) интенсивности солнечного излучения. Следует подчеркнуть, что, благодаря низкой теплопроводности тринитротолуола, круглая безоболочечная мина создает положительный температурный сигнал ΔT , а мина в металлическом корпусе – отрицательный.

При более мощной инсоляции выявляемость мин может быть существенно лучше, например, армия США с успехом использовала тепловизионную технику для обнаружения мин в Кувейте в ходе операции "Шторм в пустыне". Значительно более трудный случай обнаружения

двух мин в почве (указаны стрелкой), покрытой растительностью, приведен на рис 9 53, в. В данном случае идентификация возможна благодаря круглой форме соответствующих температурных отпечатков (опыту оператора)

9.21. СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОХРАНЫ

Первые приборы ночного видения (ПНВ), появившиеся перед Второй мировой войной, использовали подсветку сцены ИК прожектором и могли быть легко обнаружены аналогичными приборами противника

В настоящее время применяют пассивные ПНВ в виде биноклей и очков, работающие по принципу усилителей света (image intensifier). На качество изображения в этом классе приборов негативно сказывается наличие в сцене точечных ярких источников света. С появлением относительно недорогих малогабаритных тепловизоров, использующих матричные неохлаждаемые приемники излучения, расширяется применение тепловизионных ПНВ.

Преимуществами тепловизоров являются абсолютная пассивность действия, независимость от погодных условий, отсутствие эффекта ослепления и большая дальность действия. В последние годы эти преимущества были по достоинству оценены таможенными службами и береговой охраной, а также полицией США. Описано множество примеров успешного использования тепловизоров в ночных полицейских операциях, когда удавалось обнаруживать преступников в полной темноте, в листве или зарослях, в том числе с борта вертолета. Возможна установка нескольких тепловизоров или более простых ИК-обнаружителей по периметру охраняемой территории, хотя этому по-прежнему препятствует более высокая, по сравнению с обычными ПНВ, цена. Появились сообщения о начале продажи в США малогабаритных тепловизоров ры-

бакам-охотникам по цене около 6 тысяч долларов. Полицией США принят к использованию вариант тепловизора ThermoCAM E2 фирмы FLIR Systems, получивший название ThermoVision Scout. В приборе имеется встроенный алгоритм обработки термограмм – InstAlert, который позволяет окрашивать искомые объекты, например фигуры людей, в красный цвет на черно-белом фоне.

Американские фирмы Raytheon и General Motors были пионерами во внедрении ИК тепловизоров для вождения автомобилей в ночное время. Ожидается, что в ближайшем будущем и другие производители начнут устанавливать на автомобилях тепловизионные устройства ночного видения по цене в несколько тысяч долларов США.

В ряде стран, например Финляндии, созданы поддерживаемые муниципальными органами фирмы, в задачу которых входит поиск пропавших людей с помощью тепловизора, установленного на борту вертолета. Сообщалось об использовании тепловизоров для поиска людей под развалинами зданий, например, после землетрясений.

Две иллюстрации использования тепловизоров в качестве ПНВ показаны на рис 9 54 на цветной вкладке.

9.22. ВОЕННАЯ ТЕХНИКА

Обзор развития ИК техники, приведенный в п 6 1, показывает, что, как и во многих других областях науки и техники, развитие ИК технологии стимулировалось военными применениями. Их подробный анализ выходит за рамки настоящего справочника, поэтому, в основном, ограничимся их перечислением (причина достаточно подробного описания обнаружения заглобленных мин с помощью теплового метода заключается в том, что в данной технологии реализованы принципы активного ТК).

В большинстве военных применений ИК техники используют ее такие преимуще-

щества, как дистанционность, скрытность от визуального обнаружения, привязка к энерговыделяющим объектам

Основными военными применениями являются

1) обнаружение искусственных спутников Земли,

2) раннее обнаружение баллистических ракет по излучению факела на активном участке траектории,

3) обнаружение самолетов, кораблей, танков и другой боевой техники по излучению нагретых двигателей и силовых установок,

4) обнаружение скоплений живой силы и техники,

5) обнаружение заглубленных объектов и сооружений по тепловому контрасту на поверхности земли,

6) обнаружение подводных лодок в погруженном состоянии по тепловому следу реактора на поверхности воды,

7) самонаведение ракет на воздушные, морские и наземные цели,

8) навигация и управление полетом самолетов по наземным ориентирам,

9) тепловая разведка объектов и местности, составление тепловых карт местности,

10) бесконтактный подрыв зарядов,

11) вождение боевой техники и транспортных средств в ночных условиях,

12) обеспечение прицеливания в темноте,

13) вскрытие маскировочных мероприятий,

14) противодействие ИК средствам противника, тепловая маскировка,

15) охранные мероприятия,

16) ИК связь,

17) обнаружение очагов возгорания на военных объектах,

18) оценка разрушений

Анализ вышеприведенных областей показывает, что в военной области ИК техника, в основном, применяется как средство поиска и обнаружения (разведки) или средство наведения боевых средств

Наблюдение объектов в ИК лучах описано в п 9 22 К специфической военной технике относятся ИК пеленгаторы, или тепlopеленгаторы, которые обеспечивают поиск и обнаружение объектов по их собственному тепловому излучению, а также определение направления на объекты Автоматическое наведение на цель осуществляют с помощью специальных модуляторов изображения цели Тепlopеленгаторы использовались еще во время второй мировой войны для обнаружения воздушных целей В настоящее время их широко применяют в авиационной, космической и военно-морской технике

Тепловое излучение сцен является сложной функцией мишеней и фонов, источников тепловой энергии и атмосферных условий Собственное или отраженное излучение проходит от объекта к ИК системе через атмосферу, где испытывает поглощение и рассеяние Турбулентность атмосферы может вызывать рефракцию лучей и, как следствие, искажение изображения объекта в плоскости приемника излучения Если военная ИК система создает изображение цели, то оператор принимает решение о ее наличии, координатах и характеристиках Набор данных, относящихся к излучению цели, называется ее *сигнатурой* Восприятие и оценка распределения испускаемого излучения по поверхности объекта составляет основу выявления и расшифровки ИК сигнатур

Военная ИК техника применялась британскими войсками во время конфликта с Аргентиной за Фолклендские острова, а также войсками США во Вьетнаме, а затем в ходе операций в Кувейте и Ираке Имеются сведения об использовании тепловизионных ПНВ российской армией в Чечне

9.23. МЕДИЦИНА

9.23.1. ИК тепловидение. В 1939 г Д Харди обосновал возможность регистрации температуры тела человека по ИК излучению За прошедшие годы медицинские приложения стали очевидным и ди-

намичным аспектом тепловидения Пик интереса к медицинскому тепловидению в СССР пришелся на 80-е годы прошлого века, когда тепловизионные осмотры населения проводились более чем в 135 городах и обсуждалось создание сети кабинетов тепловизионной диагностики наподобие рентгеновских. В те годы был создан ряд консультативных тепловизионных центров и лабораторий (гг Москва, Ленинград, Горький) и разработаны методические документы.

Особенно интенсивные работы по применению отечественных тепловизоров проводились в Государственном Оптическом Институте им. С.И. Вавилова (г. Ленинград) под руководством М.М. Мирошникова и В.П. Мельниковой. Методическое обеспечение медицинского тепловидения более разнообразно, чем технической тепловизионной диагностики, параметры медицинских тепловизоров регламентированы ОСТ 3-4408-82 Минмедпрома СССР.

Несмотря на определенный спад исследований по медицинскому тепловидению, в России до сих пор сохранилась система переподготовки и аттестации врачей-термографистов, а отечественный матричный тепловизор ТКВр-ИФП (Институт Физики Полупроводников СО РАН) прошел аттестацию в качестве медицинского диагностического прибора и используется в ряде клиник г. Новосибирска и других городов.

Развитие отечественного медицинского тепловидения в целом повторяло общемировую тенденцию. Первичная эйфория, вызванная появлением тепловидения как универсального, неинвазивного и наглядного средства медицинской диагностики, уступила место пониманию многообразия взаимосвязей между патологическими изменениями в человеческом организме и их проявлением в температурном поле поверхности тела человека. Революционизирующее появление рентгеновской и ЯМР томографии, а также портативной

УЗИ-аппаратуры, снизили интерес практикующих врачей к тепловидению.

Тем не менее, в последнее десятилетие в такт с появлением нового поколения тепловизоров и возросшими возможностями компьютерной обработки интерес к медицинскому тепловидению возрождается. В мире сложилось сообщество исследователей по данному направлению и создано Общество Медицинской Термологии, которое проводит международные конференции. В США тепловизоры применяются в качестве инструмента диагностики не только крупными медицинскими учреждениями, но и частнопрактикующими врачами.

Поверхность человеческого тела излучает в следующих диапазонах длин волн: менее 5 мкм – 1 % энергии, 5 ... 9 мкм – 20 %, 9 ... 16 мкм – 38 %, более 16 мкм – 41 %. Максимум излучения приходится на длину волны 9,5 мкм. На длинах более 5 мкм коэффициент излучения человеческой кожи не зависит от расовой принадлежности, пигментации, индивидуальных особенностей и близок к единице. Воспалительные и опухолевые процессы, механические повреждения являются очагами термоасимметрии в организме, которые путем конвекционной, нейрорефлекторной и нейрогуморальной теплопередачи связаны с поверхностью тела человека в соответствии с рефлекторными зонами, часто совпадающими с зонами Захарьина-Геда. Диапазон аномальных изменений температур обычно составляет 0,1 ... 5 °С.

При использовании современных тепловизоров и компьютерных средств возможность осуществлять диагностирование на уровне 0,05 ... 0,1 °С считают реальной. Шумовые флуктуации температуры на поверхности человеческого тела определяются большим количеством факторов, которые связаны как с особенностями конкретного человека (конституция, возраст, пол и др.), так и с внешними факторами (время суток и года, окружающая температура, влажность и т.п.). Результаты исследований, выполненных в Инсти-

туте Радиотехники и Электроники (ИРЭ) РАН, показали, что различные участки тела гармонически изменяют свою температуру во времени, причем частота этого процесса для нормы и патологии различна. Заметная динамика температурного поля на поверхности тела человека возникает также в результате применения функциональных проб или медикаментозного воздействия, что может быть использовано для повышения достоверности медицинской диагностики.

Обработку динамических последовательностей в медицине проводят с помощью специализированных компьютерных программ, например, SCANPRO (ИРЭ РАН). Алгоритмы медицинской диагностики в течение ряда лет разрабатывают в Московском Институте Радиотехники, Электроники и Автоматики (МИРЭА).

В рамках системы АСТ-1 создан метод, в основу которого положен структурно-стохастический принцип аппроксимации информационного пространства диагностических параметров.

Многообразный характер тепловых проявлений патологий, отсутствие эталонов (например, насчитывают до 4-х типов термограмм лица) снижают достоверность медицинской тепловизионной диагностики. Во многих случаях уровень выявляемости патологий относительно не высок (30–85 % в гастроэнтерологии), а количество ложноположительных заключений велико. Считается, что тепловизионный метод является вспомогательным, хорошо дополняя стандартные диагностические процедуры. Чисто пассивные способы тепловизионной диагностики можно сочетать с тепловой СВЧ и УЗВ стимуляцией.

В ряде случаев (диагностика молочных желез и заболеваний органов кровообращения) достаточно погружать руки пациента в холодную или теплую воду. Следует заметить, что выводы по статистической надежности теплового метода были, в основном, получены в 70–80-е годы прошлого века при использовании относительно примитивных тепловизоров

("Рубин", ТВ-03 и "Радуга"). Расширяющееся применение современных матричных тепловизоров может изменить эти оценки, например, в соответствии с общими принципами обнаружения сигналов можно считать, что достоверность диагностирования ограничена только высоким уровнем ложноположительных заключений (ложной тревоги), поскольку любые патологии так или иначе отражаются на температурном поле поверхности тела человека, и проблема состоит в расшифровке слабых сигналов.

Тепловизионные осмотры проводят при температуре воздуха +19–+21 °С, влажности 40–70 % и скорости движения воздуха не более 0,25 м/с. В помещении рекомендуется устранить или экранировать радиаторы отопления, электрические лампы, солнечный свет и т.п. Исследуемые участки должны быть обнажены, лишены косметических и лекарственных средств, волосяных покровов, а также выдержаны в помещении не менее 10–20 мин.

Основные направления тепловизионной диагностики

в онкологии – раннее выявление предопухолевой и онкопатологии,

в гастроэнтерологии – заболевания желудочно-кишечного тракта, такие как язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки, холецистопанкреатит, энтероколит, гепатит, абсцессы брюшной полости,

в урологии – пиелонефрит, мочекаменная болезнь, варикоцеле, водянка, цистит, опухоли предстательной железы, опухоли почек, яичек,

в нейрохирургии – травмы нервов, при выявлении расстройств периферического кровообращения – облитерирующий атеросклероз, венозная недостаточность, тромбофлебит, болезнь Рейно,

в травматологии, ортопедии и ревматологии – псориаз, переломы, сколиоз, артриты, ожоги,

в ЛОР-патологии и пульмонологии – ОРЗ, туберкулез,

в ангиологии и эндокринологии – аритмия, гипертония, инфаркт миокарда, в пластической хирургии и трансплантологии – контроль приживления трансплантата

Кроме того, тепловидение применяют в гинекологии, рефлексотерапии и педиатрии и других областях. В 2003 г., в связи с распространением атипичной пневмонии, появились сообщения об использовании в аэропортах малогабаритных тепловизоров для порохового контроля за температурой пассажиров.

Примеры медицинских термограмм даны на рис. 9.55 на цветной вкладке.

9.23.2. СВЧ-теповидение. ИК тепловидение позволяет регистрировать только поверхностные температуры биологических объектов, связанные с внутренними процессами посредством нескольких механизмов теплопередачи. Представляет интерес регистрировать температуры непосредственно в глубине биологических тканей, что возможно с использованием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с длинами волн от 1 до 150 мм (*радиотепловой метод*).

Различают *дистанционное (радиотепловидение)* и *аппликаторное СВЧ тепловидение*. Первый метод аналогичен ИК методу, обеспечивая определение глубинных интегральных температур при отсутствии контакта с объектом. Результаты измерений зависят от коэффициента излучения и условий эксперимента. Наибольшее распространение получило аппликаторное СВЧ-теповидение, которое реализуют с помощью приемников СВЧ-излучения и накожных накладных антенно-зондов (рупоров). В зависимости от режимов калибровки, частотного диапазона и конструкции приемника излучения СВЧ-теповидение позволяет определять абсолютные и относительные температуры по глубине биологических объектов.

В ИРЭ РАН создан радиотермограф РТ-20, который в комплексе со специали-

зированным алгоритмом обработки данных может быть использован в качестве теплового томографа.

Основные недостатки практических СВЧ термометров (термографов)

1) низкое пространственное разрешение (до нескольких см), что связано с используемыми длинами волн СВЧ-излучения,

2) большое время накопления сигналов (более 10 с) вследствие низкой интенсивности теплового излучения в СВЧ-диапазоне,

3) необходимость применять сверхвысокочувствительные приемники излучения (обычно сверхпроводящие болометры), охлаждаемые до гелиевых температур.

9.24. ПРОЧИЕ ОБЛАСТИ

В криминалистике, помимо известных методов обнаружения подделок в отраженном ИК-излучении, выполнены исследования по фиксации тепловых следов деятельности человека, сохраняющихся от нескольких секунд до нескольких часов в зависимости от вида воздействия и условий.

В полной темноте с помощью тепловизора можно обнаружить человека на расстоянии до 2 км (в зависимости от типа объектива и погодных условий). Тепловизор в состоянии зафиксировать факт недавней парковки автомобилей, обнаружить следы подошв и отстрелянные гильзы. Имеются сведения о возможности обнаружения трупов в почве на значительной глубине. Тепловизор можно использовать в качестве полиграфа (детектора лжи), поскольку температура некоторых точек на теле человека тесно связана с его эмоциональным состоянием, например, японскими исследователями показано, что с этой целью следует сравнивать температурные распределения глазных впадин.

Имеются сведения о применении тепловизоров на таможне, в частности, для обнаружения контрабанды в металлических ящиках, заполненных непрозрачной

жидкостью (маслом) Высказывались идеи создания тепловизионных таможенных постов для обнаружения в ночное время грузовиков с контрабандными товарами на границе России с сопредельными государствами

Предлагалось использовать тепловизоры для обнаружения и анализа аномальных явлений в окружающей среде, включая исследование полтергейста С помощью тепловизора можно исследовать экстрасенсорные возможности человека, например, установлен факт разогрева рук практикующими экстрасенсами за счет мысленных усилий (одна из гипотез экстрасенсорного лечения людей состоит в том, что при повышении температуры ладоней до температуры внутренних органов возникает своеобразный "тепловой резонанс", который обладает лечебными свойствами)

Анализ вышеприведенных сообщений показывает, что в большинстве случа-

ев они носят рекламный характер, поскольку не содержат сведений по статистической достоверности контроля (во многих случаях нетрудно организовать "тепловую маскировку" или противодействие ИК средствам) Тем не менее, даже простое перечисление областей, где были предприняты попытки применить тепловые (теповизионные) методы НК и технической диагностики, доказывает известный тезис Л.З. Криксунова о том, что "возможности ИК-техники ограничены лишь нашим воображением" контроль тепловых градиентов в турбореактивных двигателях, исследования процесса разогрева токамаков (Калхэмовская лаборатория и ряд организаций в СССР и Японии), контроль за работой миксеров, производящих горячий битум для связывания радиоактивных отходов (Комиссариат по атомной энергии Франции), тепловизионные исследования в области фундаментальной гидро- и аэродинамики и т.п.

АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТК И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

10.1. ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ ОПЕРАТОРОВ-ТЕРМОГРАФИСТОВ В РОССИИ

До 2002 г аттестацию специалистов в области НК проводил Национальный Аттестационный Комитет (НАК). Наиболее стройная система создана Федеральным горным и промышленным надзором России (Госгортехнадзором). Однако в работах по ТК также заинтересованы и другие федеральные ведомства: Госэнергонадзор, Госархстройнадзор и др. Усиление требований к лицензированию работ по технической диагностике в промышленности, аккредитации лабораторий НК и аттестация соответствующих специалистов приобрели особое значение после принятия в 1997 г Федерального закона "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

Проблема в том, что многие традиционные объекты НК, подведомственные Госгортехнадзору, в частности объекты котлонадзора, подъемные сооружения, объекты хранения и переработки зерна, не являются первоочередными объектами применения теплового метода. В то же время ряд объектов, для инспекции которых широко используют ТК, могут находиться в сфере интересов двух и более ведомств. Например, дымовые трубы тепловых станций и промышленных предприятий могут рассматриваться как строительные сооружения, а также как объекты повышенной опасности, подведомственные Госгортехнадзору. Производственные корпуса тепловых станций, находящиеся, как правило, в неудовлетворительном состоянии с точки зрения энергосбережения, длительное время рассматривались лишь в качестве строительных объектов. Однако в

последние годы Минэнерго России ставит задачу их инспекции с точки зрения промышленной безопасности. Госгортехнадзор обладает реальными рычагами воздействия на промышленные предприятия любой формы собственности, поэтому в последние годы происходит упорядочение системы аттестации специалистов именно в рамках этого федерального ведомства.

Лаборатории НК предприятий должны быть аттестованы в соответствии с "Правилами аттестации и основными требованиями к лабораториям неразрушающего контроля" (ПБ 03-372-00), а организации, которые выполняют тепловизионные обследования, должны иметь лицензии, выданные соответствующими органами. Наличие лицензии также зависит от цели обследования. Например, для выдачи заключения о промышленной безопасности дымовых труб на нефтехимических предприятиях необходима лицензия Госгортехнадзора. В то же время для штатной тепловизионной диагностики дымовых труб промышленных предприятий достаточно лицензии, выданной Госстроем РФ.

Энергоаудит жилых зданий с выдачей энергетического паспорта требует аккредитации обследующей организации в Минэнерго РФ в качестве энергоаудитора.

Ситуация осложняется тем, что количество отечественных государственных стандартов, нормативных и методических документов, относящихся к ТК, невелико (см п 10.2). Ряд этих документов, например ГОСТ 18353 и ГОСТ 23483, были разработаны в советское время и требуют переработки в связи с существенной модернизацией аппаратной базы тепловидения и появлением новых способов контроля. Пособиями для подготовки специалистов по ТК могут служить книги [10,

12–15, 70, 177], справочник Российского Общества Неразрушающего Контроля и Технической Диагностики (РОНКТД) [178] и настоящее издание

Согласно "Правилам аттестации персонала в области неразрушающего контроля" (ПБ 03-440-02) аттестации подлежат персонал, выполняющий контроль с применением следующих видов (методов) НК

- 1) ультразвукового,
- 2) акустико-эмиссионного,
- 3) радиационного,
- 4) магнитного,
- 5) вихретокового,
- 6) проникающими веществами (капиллярного и течеискания),
- 7) визуального и измерительного,
- 8) вибродиагностического,
- 9) электрического,
- 10) теплового,
- 11) оптического

Предусмотрена возможность использования других методов НК при наличии соответствующей документации и квалификационных требований

Специалисты аттестуются Независимым органом по аттестации по трем уровням профессиональной квалификации I, II и III. Список учебно-аттестационных центров по обучению и сертификации персонала НК России приведен в [179]

Первый уровень аттестации является низшим. Специалисты I-го уровня способны настраивать аппаратуру контроля, проводить испытания и описывать результаты. Выдавать заключения по результатам обследований разрешено специалистам II-го уровня, которые также могут разрабатывать технологические инструкции и карты контроля. Специалисты III-го уровня могут руководить всеми операциями по НК, включая выдачу заключений, кроме того, они могут принимать участие в подготовке и аттестации специалистов на I, II и III уровни квалификации.

Требования к содержанию, порядку проведения экзаменов и документации изложены в документе Госгортехнадзора

ПБ 03-440-02. Типовая программа подготовки по ТК и список экзаменационных вопросов приведены в *Приложении*. Существенной частью аттестации является практический экзамен, который сдают с использованием экзаменационных образцов, соответствующих объектам контроля. При разработке программ практического экзамена можно использовать лабораторные работы по ТК, созданные в ряде российских вузов в рамках учебных курсов по специальности "Неразрушающие физические методы контроля".

10.2. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ В ОБЛАСТИ ТК

В данном параграфе приведены отечественные и зарубежные нормативные документы (стандарты, методические указания, инструкции и т.п.), относящиеся как к пассивному, так и активному ТК. Следует отметить, что многие документы, в частности отраслевые стандарты СССР, к настоящему времени устарели, кроме того, опущены стандарты, в которых описаны процедуры поверки (проверки) основных параметров ИК-тепловизоров и пирометров.

10.2.1. Отечественные стандарты.

Основные стандарты

1 ГОСТ 18353–79 "Контроль неразрушающий. Классификации видов и методов"

2 ГОСТ 23483–79 "Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования"

3 ГОСТ 26629–85 "Метод тепловизионного контроля качества Теплоизоляции ограждающих конструкций"

4 ГОСТ 23483–79 "Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования"

5 ГОСТ 26782–85 "Контроль неразрушающий. Дефектоскопы оптические и тепловые. Общие технические требования"

6 ГОСТ 25314-82 "Контроль неразрушающий тепловой Термины и определения"

7 ОСТ 142107-81 Минавиапрома СССР "Источники теплового нагружения"

8 ОСТ 3-4408-82 Минмедпрома СССР "Приборы тепловизионные медицинские Методы измерений основных параметров"

9 ОСТ 92-1482 Минобщемаша СССР "Неразрушающий контроль теплозащитных покрытий"

Дополнительные стандарты

10 ГОСТ 28243-96 "Пирометры Общие технические требования"

11 ГОСТ 25380-82 "Здания и сооружения Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающую конструкцию"

12 ГОСТ 26254-84 "Здания и сооружения Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций"

13 ГОСТ 26602-85 "Окна Метод определения сопротивления теплопередаче"

14 ГОСТ 8 326-78 "Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений"

15 ГОСТ 8 010-72 "Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений"

16 ГОСТ Р 51379-99 "Энергосбережение Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов"

17 ГОСТ Р 51380-99 "Энергосбережение Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям"

18 ГОСТ Р 51387-99 "Энергосбережение Нормативно-методическое обеспечение"

19 ГОСТ Р 51388-99 "Энергосбережение Информирование потребителей об

энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения"

20 ГОСТ Р 51541-99 "Энергосбережение Энергетическая эффективность, Состав показателей"

10.2.2. Зарубежные стандарты

1 Международный стандарт ISO 6781-83 "Теплоизоляция Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях Инфракрасный метод"

Базовый документ, положенный в основу более позднего отечественного ГОСТ 26629-85 Отсутствуют элементы количественного подхода к расшифровке термограмм

2 ANSI/ASHRAE Standard 101-1981 "Application of infrared sensing devices to the assessment of building heat loss characteristics"- ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, Georgia 30329, U S A

Применение ИК-термографии для оценки теплопотерь из строительных сооружений

3 ASTM Standard C1060-90 "Thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings - ASTM, 1996, U S A

Применение ИК-термографии для проверки качества установки теплоизоляции в ограждающие конструкции

4 ASTM C1153-90 Standard practice for the location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging - Annual Book of ASTM Standards, V 04 06, ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, U S A

Применение ИК-термографии для обнаружения аномального увлажнения кровли крыш

5 ASTM Designation E 1186-87 "Standard Practices for air leakage site detection in building envelopes", Nov 1987. - ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, U S A

Применение ИК-термографии для обнаружения протечек воздуха через ограждающие конструкции

6 SNT-TC-1A Standard "Qualification, certification IR Thermography", U S A
Сертификация в области ИК термографии

7 ASTM Standard E1316-93 "IR Terminology Testing", U S A

Терминология ИК испытаний

8 ASTM Standard C 3259-95 "Infrared determination of the temperature of applied coating on wood products during the coating cycle", U S A

Измерение температуры покрытий на дереве

9 ASTM Standard E 1623-94 "Standard test method for determination of fire and thermal parameters of materials, products and systems using an intermediate scale", U S A

Оценка тепловых параметров материалов и продуктов

10 Standard MIL-ST-185 "Survey procedure of thermal image method for electrical components", U S A

Процедура обследования электротехнических компонентов

11 Standard EPRI-NR-6973 "Guide for IR thermography", U S A

Руководство по ИК-термографии

12 MIL-HDBK-728, V 1, "Nondestructive testing"

Без комментариев

13 Standard MIL-STB-2194 "Infrared thermal imaging Survey procedure for electrical equipment", U S A

Процедура обследования электротехнических компонентов

14 Standard 149-GP-2MP "Manual for thermographic analysis of building enclosure", Canada

ИК термографический анализ строительных сооружений

15 Стандарт Японии JIS T 1141 "Медицинская термография" (на япон языке)

Без комментариев

16 ISO Committee Draft ISO/CD 18434 "Condition monitoring and diagnostics of machines", 09 01 2003/

Проект международного стандарта по ИК термографической диагностике машин и механизмов, включая методологию

сравнительной качественной и количественной проверки температурных режимов, выработки критериев отбраковки, учета мешающих факторов, документирования результатов и т п

10.2.3. Прочие нормативные документы и методики.

1 Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом (методика) Свидетельство об аттестации МВИ № 1305/442 от 10 01 2001, Госстандарт РФ 36 с

Один из последних документов, оформленных по форме методики Госстандарта РФ Содержит методические особенности применения тепловизоров при контроле ограждающих конструкций строительных сооружений Описан механизм возникновения сигнала в дефектных участках, порядок определения сопротивления теплопередаче, принципы расшифровки термограмм и форма протокола

2 Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом Аттестована Госстандартом Российской Федерации в 2000 г, новая редакция аттестована в 2001 г

Используется Мосгосэнергонадзором при определении энергоэффективности наружных ограждающих конструкций строительных сооружений

3 Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов Свидетельство об аттестации МВИ № 11/442 от 6 03 2002, Госстандарт РФ 44 с

Один из последних документов, оформленных по форме методики Госстандарта РФ Содержит методические особенности применения тепловизоров при контроле кирпичных, железобетонных и металлических футерованных дымовых труб Описаны типичные дефекты дымовых труб, теория возникновения сигнала в дефектных участках, принципы расшифровки термограмм и форма протокола

4 Методические указания по инфракрасной диагностике тепломеханического оборудования (1-я редакция), РАО "ЕЭС России", ОРГРЭС, Москва, 1998

Документ разработан на основе многолетнего опыта применения тепловизоров в организации ОРГРЭС (г Москва)

5 Вестник Госэнергонадзора Инструктивное письмо от 11 06 99 № 32-10/223 "О применении портативного компьютерного термографа ИРТИС-200"

В письме организациям Минэнерго РФ рекомендуется применять отечественный тепловизор ИРТИС-200

6 Объемы и нормы испытаний электрооборудования, РД 34 45-51 300-97, РАО "ЕЭС России", М., ЭПАС, 1998

Один из наиболее проработанных отечественных нормативных документов в области тепловизионной диагностики электротехнических установок и изделий Обязателен для применения в системе Минэнерго РФ, РАО "ЕЭС России" и на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта

7 Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритного тепловизора (ВСН 43-96) Утвержден 30 07 96 Департаментом строительства г Москвы

Методические указания по применению тепловидения в строительной диагностике, почерпнутые в значительной части из международного стандарта ISO 6781-83 Ряд операций контроля описан в расчете на устаревшие модели тепловизоров

8 Прейскурант на экспериментально-наладочные работы и работы по совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей, том 7, раздел 28 "Инфракрасный контроль состояния энергетического оборудования и сооружений" Москва, ОРГРЭС, 1992

Основной документ при расчете стоимости тепловизионного обследования большого числа объектов в энергетике, строительстве, жилищно-коммунальном хозяйстве Расценки 1991 г требуют соответствующего пересчета Стоимость ряда

операций приведена в расчете на устаревшие модели тепловизоров

9 СП 13-101-99 "Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб" М., Госстрой РФ, 1999

10 Инструкция по эксплуатации железобетонных дымовых труб с металлическими газоотводящими стволами на тепловых электростанциях, РД 34 21-562-93.

11 Технологический регламент по теплотехническим обследованиям, неразрушающему контролю и диагностике технического состояния тепловыделяющих объектов автоматизированным бесконтактным тепловизионным методом Свид. об аттестации №06/442-2001 от 26 06 0, Госстандарт РФ 20 с

Общие положения по использованию портативных тепловизоров и софтвера IrWin (FLIR Systems) для диагностики разнообразного оборудования

12 Thermographic Inspection of Electrical Installations – Publ 556 556 776, AGEMA Infrared Systems Inc, 1985, Sweden 45 p

Первые в мире методические рекомендации по контролю электротехнических изделий и установок, разработанные фирмой AGEMA Infrared Systems (Швеция), материалы публикации широко использованы в соответствующих российских документах

13 Guidelines for Specifying and Performing Infrared Inspections Infraspction Inst, 1st Ed, Jan 1988, U S A 18 p

Общие методические вопросы проведения тепловизионных обследований, разработанные учебным институтом Infraspction (США)

14 Merkblatt uber Thermografische Untersuchungen an Bauteilen and Bauwerken, DGZfP, Ausgabe October 1993, Berlin, Germany 8 p

Методические указания по термографическому контролю строительных сооружений и изделий, разработанные немецким обществом неразрушающего контроля

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Хадсон Р. Инфракрасные системы М Мир, 1972 530 с
- 2 Vernotte P. Mesure de la conductibilité thermique des isolants Methode de touthau // Chaleur et Industrie 1937 N 208 P 331-337 (in French)
- 3 Beller W.S. Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking // Missiles and Rockets V 16 No 22 Jan 4, 1965 P 1234-1241
- 4 Carslow H.S., Jaeger T.S. Conduction of heat in solids Oxford Univ Press, Oxford, U K , 1959 580 p
- 5 Лыков А.В. Теория теплопроводности М Высшая школа, 1967 604 с
- 6 Balageas D.L., Krapez J.-C., Cielo P. Pulsed photo-thermal modeling of layered materials // J Appl Physics, V 59 No 2 January 5 1986 P 348-357
- 7 Vavilov V., Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures // "Res Techn in NDT", ed by R Sharpe, V 5 1982 Academic Press, London, U K P 239-280
- 8 MacLaughlin P.V., Mirchandani H.G. Aerostructure NDT evaluation by thermal field detection (Phase II) Final Rep, AIRTASK, Naval Air System Command AIR-310G Wash, D C , U S A 1984 198 p
- 9 Попов Ю.А., Карпельсон А.Е., Строков В.А. и др Тепловой контроль качества многослойных изделий // Дефектоскопия 1976 №3 С 76-81
- 10 Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля Справочник М Машиностроение, 1991 240 с
- 11 Nondestructive Testing Handbook, V 3 "Infrared and Thermal Testing", U S A , A S N T , 2001 714 p
- 12 Бажанов С.А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств Библиотечка электротехника, Прилож журн "Энергетик", М НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2000 76 с
- 13 Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применения М Интел универсал, 2002 88 с
- 14 Вавилов В.П., Александров А.Н. Тепловизионная диагностика в энергетике Прилож журн "Энергетик", М НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2003 82 с
- 15 Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И и др Тепловой неразрушающий контроль изделий М Наука, 2002 476 с
- 16 Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС М Энергоатомиздат, 1987 340 с
- 17 Тиванов Г.Г. Анализ математических моделей, используемых при тепловом контроле качества композиционных материалов // Дефектоскопия 1987 № 5 С 83-85
- 18 Maillet D., André S., Batsale J.-C. et al. Thermal quadrupoles Solving the heat equation through integral transforms John Wiley & Sons Publ, England, 2000 360 p
- 19 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, Sept 1961 V 32 P 1679-1684
- 20 Troitsky O.Yu., Reiss H. Remote nondestructive monitoring of coatings and materials by the flash technique // High Temperatures-High Pressures, 2000 V 32 P 391-395
- 21 Delpesh P.M., Krapez J.-C., Balageas D.L. Thermal defectometry using the temperature decay rate method // In "Proc Quant Infr Thermography QIRT-94", Eurotherm Seminar #42, August 23-26, 1994, Sorrento, Ital P 220-225
- 22 Fourier J. Théory du mouvement de la chaleur dans les corps solides, 1er partie // Mémoires de l'Académie des Sciences V 4 1924 P 185-555 V 5, 1926 P 153-246
- 23 Angström M.A. New method of determining the thermal conductivity of bodies Phil Mag, V 25, 1863 P 130-142

- 24 **Almond D., Patel P.** Photothermal science and techniques Chapman & Hall, London, 1996 242 p
- 25 **Vavilov V., Demin V., Shiryaev V.** Inspecting smokestacks by IR thermographic surveying and heat conduction modeling In Proc SPIE "Thermosense-XXIII", 2001 V 4360 P 324-332
- 26 **Aamodt L.C., MacLachlan Spicer J.W., Murphy J.C.** Analysis of characteristic thermal transit times for time-resolved infrared radiometry studies of multilayered coatings // *J Appl Physics*, Vol 68, 15 December, 1990 P 6087-6097
- 27 **Bison P.G., Grinzato E., Bragiotti A. Et al.** Non-destructive evaluation of cracks in porous building materials by use of crawling spot thermal technique In *Rev of Progress in Quant NDE*, ed D O Thompson and D E Chimenti, V 15, Seattle, U S A , P 653-658
- 28 **Batsale J.C., Bendada A., Maillet D., Degiovanni A.** Distribution of a thermal contact resistance inversion using experimental Laplace and Fourier transformations and an asymptotic expansion // *Proc 1st Intern Conf on Inverse Problems in Engineering*, Palm Coast, Florida, June 13-18, 1993
- 29 **Карпельсон А.Е., Попов Ю.А., Упадышев А.Б.** Определение оптимального режима активного теплового контроля изделий с нарушением сплошности // *Дефектоскопия* 1978 № 8 С 86-95
- 30 **Вавилов В.П., Касаткин М.А.** Тепловой контроль жаропрочных никелевых сплавов // *Дефектоскопия* 1990 № 4 С 51-54
- 31 **Bendada A., Maillet D., Degiovanni A.** Nondestructive transient thermal evaluation of laminated composites discrimination between delaminations, thickness variations and multidelaminations // *Proc Eurotherm Seminar 27 "Quant InfraRed Thermography QIRT'92"*, July 7-9, 1992, Châtenay-Malabry, France P 218-223
- 32 **Sendur I.K., Baertlein B.A.** Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle // *Proc SPIE "Detection and remediation technologies for mines and mine-like targets"*, 2000. P. 144-150
- 33 **Delpech Ph., Balageas D.** Mesure par thermographie infrarouge stimulée de résistances thermique d'interface dans des structures bonnes conductrices de la chaleur // *Journee d'Etude du 9 Janvier 1991, Soc.Fr. des Thermiciens, Paris, France* 12 p
- 34 **Balageas D., Deom A.A., Boscher D.M.** Characterisation and NDT of carbon epoxy composites by a pulsed photothermal method // *Mater Evaluation*, April 1987 P. 461-465
- 35 **Krapez J.-C., Balageas D.** Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography // *"Proc Quant. Infr Thermography QIRT-94"* Eurotherm Seminar #42, August 23-26, 1994, Sorrento, Italy P 260-266
- 36 **Vavilov V.P., Grinzato E., Bison P.G.** Thermal characterization and tomography of carbon fibre reinforced plastics using individual identification technique // *Mater Evaluation*, May 1996, V 54, No. 6. P 604-611
- 37 **Boscher D.M., Deom A.A., Gardette G., Balageas D.** Thermal NDT of carbon epoxy laminates // *"Proc Eurotherm-4 Seminar"*, June 28-July 1, 1988, Nancy, France P 46-50
- 38 **Grinzato E., Marinetti S.** Materials NDE by non linear filtering applying heat transfer models // *"Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials"*, ed by X Maldague, NATO ASI Series, Series E Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers V 262, 1994. P 117-132
39. **Krapez J.-C., Cielo P.** Thermographic NDE data inversion procedure (Part I 1D Analysis) // *Res in NDE*, 1991 V. 3, No 2 P 69-100
- 40 **Куш Д.В., Рапопорт Д.А., Буладин О.Н.** Обратная задача автоматизированного теплового контроля // *Дефектоскопия*, 1988 № 5 С 64-68
- 41 **Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P.** Thermographic NDE Data inversion procedure (Part II 2D analysis and experimental

results) // Res in NDE, No 2, 1991 P 101-124

42 **Вавилов В.П., Ширяев В.В.** Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // Дефектоскопия, 1979, № 11 С 101-102

43 **Favro L.D., Crowther D.J., Kuo P.K., Thomas R.L.** Inversion of pulse-echo thermal wave Images // Proc SPIE "Thermosense-XV", V 1933, 1993 P 138-141

44 **Walther H.G., Seidel U.** Some remarks on definition, resolution and contrast in photothermal imaging // Proc Eurotherm Seminar #27 "Quant Infrared Thermography-QIRT 92", July 7-9, 1992, Chatenay-Malabry, France P 251-258

45 **Rosenfeld A., Kak A.** Digital Picture Processing V 1, Academic Press, Orlando, U S A , 1982 434 p

46 **Вавилов В.П., Джини Х., Томас Р., Фавро Л.** Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве // Дефектоскопия 1990, № 12 С 60-65

47 **Vavilov V.P., Maldague X.** Dynamic thermal tomography new promise in the IR thermography of solids // Proc SPIE, V 1682 "Thermosense-XIV", 1992 P 194-206

48 **Vavilov V., Bison P.G., Bressan C. et al** Some new ideas in dynamic thermal tomography // Proc Eurotherm Seminar #27 "Quant Infrared Thermography-QIRT 92", July 7-9, 1992, Chatenay-Malabry, France P 259-255

49 **Busse G., Renk F.F.** Stereoscopic depth analysis by thermal wave transmission for NDE Appl Phys Lett, V 42 (4), 15 February, 1983, P 366-368

50 **Vavilov V.P., Maldague X., Dufort B., Ivanov A.I.** Adaptive thermal tomography algorithm // Proc SPIE "Thermosense-XV", V 1933, 1993 P 166-173

51 **Maldague X., Marinetti S.** Pulse phase infrared thermography J Appl Phys, 1996, V 79, P 2694-2698

52 **Вавилов В.П., Маринетти С.** Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // Дефектоскопия 1999 № 2 С 58-72

53 **Galmiche F., Vallerand S., Maldague X.** Wavelet transform applied to pulsed phase thermography // "Proc V-th Workshop on Advances in Infrared Technology and Applications", ed by E Grinzato, P Bison and A Mazzoldi, CNR (Venice, Italy), 1999 P 117-122

54 **Galmiche F., Maldague X.** Depth defect retrieval using the wavelet pulse phased thermography // Proc Eurotherm Seminar N 64 "Quant IR Thermography", Reims, France, July 18-21, 2000 P 194-199

55 **Grinzato E., Vavilov V.** Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modeling Rev Generale Termique, V 37, N 8, Sept, 1998 P 669-679

56 **Carlomagno G.M., Berardi P.G.** Unsteady thermophototopography in nondestructive testing // "Proc 3rd Biannual Exchange, U S A , St Louis, 1976 P 33-39

57 **Busse G., Wu D., Karpen W.** Thermal wave imaging with phase sensitive modulated Thermography // J Appl Physics, V 71, 1992 P 3962-3965

58 **Wu D., Salerno A., Malter U. et al** Inspection of composites by using lockin thermography // Proc Eurotherm Seminar 27 "Quant InfraRed Thermography QIRT'96", July 7-9, 1992, Châtenay-Malabry, Italy P 251-254

59 **Kuo P.K., Feng Z.J., Ahmed T. et al.** Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique Photoacoustic and photothermal phenomena, ed P Hess and J Pelzl, Heidelberg Springer-Verlag, 1987 P 415-418

60 **Busse G., Wu D., Karpen W.** Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography // J Appl Phys, V 71, 1992 P 3962-3965

- 61 **Laloue P., Nigon F., Offermann S. et al.** Photothermal infrared thermography applied to the characterization of thermal resistances at metal-metal interfaces // Proc Eurotherm Seminar N 64 "Quant IR Thermography", Reims, France, July 18-21, 2000 P 206-211
- 62 **Dillenz A., Zwepscher Th., Busse G.** Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features *Insight*, V 42, N 12, December 2000 P 815-817
- 63 **Zwepscher Th., Dillenz A., Busse G.** Ultrasound lock-in thermography - a defect selective method for the inspection of aerospace components *Insight*, V 43, N 3, March 2001 P 173-179
- 64 **Dillenz A., Zwepscher Th., Busse G.** Phase angle thermography with ultrasound burst excitation // Proc Eurotherm Seminar N 64 "Quant IR Thermography", Reims, France, July 18-21, 2000 P 247-252
- 65 **Favro L.D., Xiaoyan Han, Zhong Ouyang, Gang Sun, Hua Sui, Thomas R.L.** Infrared imaging of defects heated with a sonic pulse // *Rev Sci Instr*, V 71, June 2000 P 2418-2422
- 66 **Delpesh Ph., Krapez J.-C., Balageas D.** Thermal defectometry using the temperature decay rate method // Proc Quant Infrared Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar No 42 "Quant IR Thermography", August 23-26, 1994, Sorrento, Italy P 220-225
- 67 **Shepard S.** Advances in pulsed thermography // Proc SPIE "Thermosense-XXIII", V 4360, 2001 P 511-515
- 68 **Wang Y.Q., Kuo P.Q., Favro L.D., Thomas R.L.** Flying laser thermal wave IR imaging of horizontal and vertical cracks // *Rev of Progress in Quant NDE*, Vol 9, Plenum Press, New York, 1989 P 511-515]
- 69 **Bison P.G., Bragiotti A., Bressan C. et al.** Crawling spot thermal NDT for plaster inspection and comparison with dynamic thermography with extended heating // Proc SPIE "Thermosense-XVII", 18-21 April, 1995, Orlando, USA P 234-240
- 70 **Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.** Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом Киев Техника, 1988 128 с
- 71 **Cramer K.E., Winfree W.P.** Thermographic detection and quantitative characterization of corrosion by application of thermal line source // Proc SPIE "Thermosense-XX" 1998 P 291-297
- 72 **Lesniak J.R., Boyce B.R.** Differential thermography applied to structural integrity assessment // Proc SPIE "Thermosense-XVII", 1995 P 179-187
- 73 **Ritter R., Schmitz B.** Photothermal inspections of adhesion strengths and detection of delaminations // Proc Eurotherm Seminar 27 "Quant InfraRed Thermography QIRT'96", Châtenay-Malabry, Italy, July 7-9, 1992 P 251-254
- 74 **Horny N., Henry J.-F., Offermann S. et al** Photothermal infrared thermography applied to the identification of thin layer thermophysical properties // Proc Eurotherm Seminar No 64 "Quant IR Thermography", July 18-21 France, Reims, 2000 P 36-41
- 75 **Gros X.E., Strachan P., Lowden D.W., Edwards I.** NDT data fusion // Proc 6-th European Conf NDT V 1, 1994 P 355-364
- 76 **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, V 43 No 9 P 607-615
- 77 **Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K.** NDT data fusion at pixel level, *NDT&E International*, 1999 V 32 P 283-292
- 78 **Gyekenyesi A.L.** Testing static and dynamic stresses in metallic alloys using thermoelastic stress analysis // *Mater Evaluations*, March 2002 P 445-451
- 79 **Wong A.K., Sparrow J.G., Dunn S.A.** On the revised theory of the thermoelastic effect // *of Physics and Chemistry*, 1988, V 49 P 395-400

- 80 **Tenek L.H., Henneke E.G.** Flaw dynamics and vibrothermographic-thermoelastic NDE of advanced composite materials // Proc SPIE "Thermosense-XIII" 1991 P 252-259
- 81 **Ранцевич В.Б.** Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость // Дефектоскопия, 1977 № 5 С 102-108
- 82 **Куриленко Г.А.** Контроль и прогнозирование индивидуального сопротивления усталости деталей машиностроения на основе кинетики пассивных тепловых полей Докторская диссертация, Новосибирский Государственный Технический Университет, 2000 С 401
- 83 **Luong M.P.** Infrared thermography of fatigue in metals // Proc SPIE "Thermosense XIV" V 1682, 1992 P 222-232
- 84 **Luong M.P.** Infrared thermographic evaluation of fatigue behavior of concrete // Transact 14th Intern Conf on Structural Mech In Reactor Technol (SMIRT 13), Lyon, France, Aug 17-22, 1997 P 155-162
- 85 **Prabhu D.R., Howell P.A., Syed H.I., Winfree W.P.** Application of artificial neural networks to thermal detection of disbonds // Rev Progress in Quant NDE, ed D O Thompson, DE Chimenti, Plenum Press, New York, V 11, 1992 P 1331-1338
- 86 **Prabhu D.R., Winfree W.P.** Neural network based processing of thermal NDE data for corrosion detection // Rev Progress in Quant NDE, ed D O Thompson, DE Chimenti, Plenum Press, New York, V 12, 1993 P 1260-1265
- 87 **Maldague X. et al** A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography modelling, noise, experiments // Rev Generale de Thermique, V 37, No 2, Sept 1998 P 708-716
- 88 **Ciliberto A., Cavaccini G., Salvetti O. et al.** Porosity detection in composite aeronautical structures Infrared Physics & Technology, V 43, 2002 P 139-143
- 89 **Hermosilla-Lara S., Joubert P.-I., Placko D. et al.** Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing // Abstr Intern Conf Quant Infrared Thermography QIRT'02, Sept 24-27, 2002, Dubrovnik, Croatia P 12-13
- 90 **Брамсон М.А.** Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел М Наука, 1965 С 223
- 91 **Госсорг Ж.** Инфракрасная термография М Мир, 1988 С 396
- 92 **DelGrande N., Clark G.A., Durbin P.F. et al.** Buried object remote detection technology for law enforcement Proc SPIE, V 1479 "Surveillance Technologies", April 1991 P 335-352
- 93 **Булюбаш Б.В., Гуревич В.З.** Электричество и тепло М Наука, 1978 С 172
- 94 **Green D.R.** Principles and applications of emittance-independent infrared non-destructive testing Appl Optics, V 7, No 9, 1968 P 1976-1983
- 95 **Baker I.M., Crimes G., Ard C. et al.** Photovoltaic CdHgTe-Silicon Focal Planes // Proc IV Intern Conf on Advanced Detectors and Systems, London, UK, Institution of Electrical Engineers, June 1990 P 53-58
- 96 **Gunapala S.D., Bandara S.V., Liu J.K. et al** Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion Laboratory Infr Physics & Techn, V 42 (2001) P 267-282
- 97 **Sheppard F.D., Yang A.C.** Silicon Schottky retinas for infrared imaging IEDM (Intern Electron Devices Meeting) Technical Digest, USA, New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Dec 1973 P 310-313
- 98 **Якушенко Ю.Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов М Машиностроение, 1989 360 с
- 99 **Мирошников М.М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов Л Машиностроение, 1983 696 с
- 100 **Ллойд Д.** Системы тепловидения М Мир, 1978 410 с

- 101 **Справочник** по инфракрасной технике (под ред У Волфа и Г Цисиса) М Мир, 1999 (в 4-х томах)
- 102 **Sachs L.** Applied Statistics New York Springer-Verlag, 1982 220 p
- 103 **Taylor J.O., Dupont H.M.** Inspection of metallic thermal protection systems for the X-33 launch vehicle using pulsed infrared thermography // Proc SPIE "Thermosense-XX", 1998, V 3361 P 301-310
- 104 **Дроздов В.А., Сухарев В.И.** Термография в строительстве, М Стройиздат, 1987 238 с
- 105 **Vavilov V.P.** Infrared techniques for materials analysis and nondestructive testing // "Infrared Methodology and Technology, Monograph Series "Intern Advances in NDT", ed by X Maldague, Gordon & Breach Science Publisher, 1994, U S A P 230-309
- 106 **Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V.** Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography Research in Nondestructive Evaluation, Springer-Verlag, New York, 1994, V 5 No 4 P 257-271
- 107 **Ljungberg S.-A.** Infrared techniques in buildings and structures operation and maintenance // Infrared methodology and technology Nondestructive testing monographs and tracts, ed X Maldague, Gordon & Breach Science Publishers, U S A , 1992 P 211-252
- 108 **Hart J.M.** A Practical guide to infrared thermography for building surveys Building Research Establishment Report, Garston, Watford, U S A 24 p
- 109 **Evans J.** Meteorology and infrared measurements // Proc SPIE "Thermosense IV", V 313, 1981, U S A P 64-68
- 110 **Вавилов В.П.** Диагностика строительных конструкций методом инфракрасной термографии // В мире неразрушающего контроля 2000, № 2 С 8-11
- 111 **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография механических напряжений в строительных конструкциях (диагностика казармы ТВВКУС в г Томске после катастрофы) // Контроль Диагностика, 1998, № 1 С 21-25
- 112 **Иванов Г.С., Подолян Л.А.** Энергосбережение в зданиях // Новости теплоснабжения, 2001, № 7 С 8-13
- 113 **Moropoulou A., Avdelidis N.P., Kouli M.** Detection of defects of airport pavements using infrared thermography. CSNDT J, Sept/Oct 2000 P 5-8
- 114 **Frumuselu D., Radu C.** IR thermography applied to ground-level reinforced concrete constructions belonging to electricity networks Insight, V 40, No 7, July 1998. P 501-504
- 115 **Grinzato E., Bison P.G., Bressan C. et al.** Active thermal testing of delaminations in frescoes' plaster // Proc. 4th Intern Conf on Nondestr Testing of Works of Art, Berlin, Germany, 3-8 October, 1994. P 357-366
- 116 **Bison P.G., Grinzato E., Marinetti S., Braggiotti A.** Fresco thermographic inspection by convective heating technique. Review of progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation, ed by D O Thompson and D E Chimenti, Plenum Press, New York, 1998, V 17 P 1769-1776
- 117 **Grinzato E., Bison P.G., Bressan C., Mazzoldi A.** NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating // Proc. Eurotherm Seminar #60, QIRT'98, Lodz (Poland), 1998 P 64-67
- 118 **Вавилов В.П., Гринцато Э., Бизон П., Маринетти С** Тепловой контроль воздушных расслоений под фресками Дефектоскопия, 1994, № 7 С 3-83
- 119 **Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V.** Thermal NDE Enhanced by 3D Numerical Modeling Applied to Works of Art // Proc 15th World Conf on NDT, Rome (Italy), 15-21 Oct 2000 (available only on CD) 9 p
- 120 **Spagnolo S., Ambrosini D., Paoletti P.** Comparative study on the efficiency of some optical methods for artwork diagnostics // Proc Laser Techniques and systems in art conservation Munich 18-19, June 2001, Proc SPIE, V 4402 P 227-234.
- 121 **Grinzato E., Marinetti S., Vavilov V., Bison P.G.** Nondestructive test-

ing of wooden painting by IR thermography // Proc 8th Europ Con NDT, Barcelona 2002 P 342-346

122 Энно И.К., Дужих Ф.П., Мелентьев Н.Н. Дефектоскопия дымовых труб инфракрасной техникой // Электрические станции 1988 № 6 С 23-26

123 Vavilov V., Demin V., Shiryaev V. Inspecting smokestacks by IR thermographic smokestacks and heat conduction modeling // Proc SPIE "Thermosense-XXIII", V 4360, Orlando, U S A , 2001 P 324-332

124 Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС М Энергоатомиздат, 1987 240 с

125 Франчук С.В. Таблицы тепло-технических показателей строительных материалов М Энергоатомиздат, 1969 264 с

126 Тепловой расчет котельных агрегатов Под ред Н В Кузнецова М Энергия, 1973 320 с

127 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ (15-е издание) М СПО ОРГРЭС, 1996

128 Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции М Госэнергоиздат, 1976 236 с

129 Lanius M.A. Infrared applications for steam turbine condenser systems // Proc SPIE "Thermosense XXII", V 4020, 2000 P 107-113

130 Ducar R.J. Pulsed thermographic inspection and application in commercial aircraft repair // Proc SPIE "Thermosense-XXI", V 3700, 1999 P 77-83

131 Airbus adopts infrared thermography for in-service inspection Insight, V 36 No 10, October 1994

132 Вавилов В.П., Климов А.Г., Ширяев В.В. Активный тепловой контроль воды в авиационных сотовых конструкциях // Дефектоскопия, 2002 № 12 С 32-38

133 Maldague X., Cielo P., Poussart D., Emerson P. Thermographic nondestructive

evaluation of turbine blades Methods and image processing Industrial Metrology, V 1, 1990 P 139-153

134 Морозов Г.А. Развитие методов неразрушающего контроля в авиации Контроль Диагностика, №7, 2002 С 3-8

135 Rosenwaig A., Gersho A. Thermal-wave imaging Science V 218, Washington, D C , American Association for the Advancement of Science, 1982 P 223-228

136 Cielo P. Pulsed photothermal evaluation of layered materials // J Appl Phys, 1 July 1984 V 56, No 1 P 230-234

137 Cielo P., Dallaire S. Optothermal NDE of thermal-barrier coatings // Proc '85 ASM's Intern Conf Surface Modification and Coatings, Toronto, Canada, 14-16 Oct, 1985 P 10-14

138 Maclachlan Spicer J.W., Kerns W.D., Aamodt L.C., Murphy J.C. Determination of degree of thermal barrier coating disbanding by time-resolved IR radiometry // Rev of Progress in Quant NDE V 10B, Plenum Press, New York, 1991 P 1193-1200

139 Maclachlan Spicer J.W., Kerns W.D., Aamodt L.C., Murphy J.C. Measurement of coating physical properties and detection of coating disbands by time-resolved radiometry // J of NDE, V 8 No 2, 1989 P 107-120

140 Osiander R., Maclachlan Spicer J.W., Amos J.M. Thermal inspection of SiC/SiC ceramic matrix composites Proc SPIE "Thermosense XX", V 3361, 1998 P 339-348

141 Lehtiniemi R., Hartikainen J., Rantala J. et al Fast photothermal inspection of plasma-sprayed coatings of primary circulation seal rings of a nuclear reactor Part two After the trial run // Rev of Progress in Quant NDE, V 12, Plenum Press, New York, 1993 P 1236-1240

142 Varis J., Hartikainen J., Lehtiniemi R., Luukkala M. A simple transportable imaging system for fast thermal nondestructive testing // Proc Quant IR Thermography-QIRT'92, Paris, France, July 7-9, 1992 P 235-238

- 143 **Laloue P., Nigon F., Offermann S. et al.** Photothermal IR thermography applied to the characterization of thermal resistances at metal-metal interfaces // Proc Quant IR Thermography-QIRT'98, Lodz, Poland, Sept 7-10, 1998 P 81-85
- 144 **Netzelmann U., Walle G.** High-speed pulsed thermography of thin metallic coatings // Proc Quant IR Thermography-QIRT'2000, Reims, France, July 18-21, 2000 P 206-211
- 145 **Happlodt P.G., Ellingson W.A., Gardiner T., Krueger J.** Defect detection in multi-layered plasma sprayed zirconia by time-resolved IR radiometry a comparison between analytical and experimental methods // Proc SPIE "Thermosense XVI", V 2245, 1994, P 210-219
- 146 **Shepard S.M., Favro L.D., Thomas R.L.** Thermal wave NDT of ceramic coatings Proc SPIE "Thermosense XVII", V 2473, 1995 P 190-193
- 147 **Bison P., Marinetti S., Grinzato E. et al.** Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography // Proc SPIE "Thermosense XXV", V 5073, 2003 P 165-173
- 148 **Alcott J.** An investigation of non-destructive inspection equipment Detecting hidden corrosion on USAF aircraft Mater Evaluation, 1994, No 5 P 64-73
- 149 **Syed H.I., Winfree W.P., Cramer K.E., Howell P.A.** Thermographic detection of corrosion in aircraft skin // Rev of Progress in Quant NDE, V 12, Plenum Press, New York, 1993 P 724-729
- 150 **DelGrande N.K., Durbin P.F.** Dual-band IR imaging to defect corrosion damage within airframes and concrete structures Proc SPIE "Thermosense XVI", V 2245, 1994 P 202-209
- 151 **Prati J.** Detecting hidden exfoliation corrosion in aircraft wing skin using thermography // Proc SPIE "Thermosense-XXII", 2000, V 4020 P 200-209
- 152 **Burleigh D.** A portable, combined thermography/shearography NDT system for inspecting large composite structures Proc SPIE "Thermosense-XXIV", V 4710, 2002 P 578-587
- 153 **Delpuch Ph., Boscher D.M., Lepoutre F. et al** Quantitative nondestructive evaluation of carbon-carbon composites by pulsed IR thermography // Rev of Progress in Quant NDE, V 12, Plenum Press, New York, 1993 P 672-678
- 154 **Burleigh D., Kuhns D., Cowell S., Engel J** Thermographic nondestructive testing of honeycomb composite structural parts of Atlas space launch vehicle // Proc SPIE "Thermosense-", V 2245, 1994 P 132-138
- 155 **Thompson K.G., Crisman E.M.** Thermographic inspection of solid-fuel rocket booster field joint components Mater. Evaluation, No 48, Sept 1990 P 1096-1099
- 156 **Welch C., Eden T.J.** Numerically enhanced thermal inspection of shuttle solid rocket motor inhibitor/liner/fuel bondline // Rev of Progress in Quant NDE, V 8B, Plenum Publishing Corp, New York, 1989. P 2027-2034
- 157 **Burleigh D., Engel J.** NDT of adhesively bonded fixed foam insulation for Atlas/Centaur cryogenic fuel tanks // Proc 6th NASA NDE Conf, Johnson Space Center, Houston, Texas, May 2, 1989 P 86-94
- 158 **Burleigh D.** Thermographic testing used on the X-33 space launch vehicle program by BF Goodrich Aerospace // Proc. SPIE "Thermosense-XXI", 1999, V 3700 P 84-92
- 159 **Концевой Ю.А., Кудин В.Д.** Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов М: Энергия, 1973 140 с
- 160 **Вавилов В.П.** Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники М Радио и связь, 1984 162 с
- 161 **Данилин Н.С., Бакланов О.Д., Загоровский Ю.И.** Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем М Изд МО СССР, 1974 164 с
- 162 **Boillot J.P., Cielo P., Begin G. et al.** Adaptive welding by fiber optic thermo

- graphic sensing An analysis of thermal and instrumental considerations *Welding Journal*, July 1985 P 209–217
- 163 **Бекешко Н.А., Попов Ю.А.** Контроль качества точечных сварных соединений термографическим методом // *Дефектоскопия*, 1971 № 3 С 123–127
- 164 **Бекешко Н.А., Попов Ю.А.** Контроль диаметра литой зоны точечных сварных соединений с помощью визуализации тепловых полей // *Дефектоскопия* 1972, № 6 С 86–90
- 165 **Вавилов В.П., Горбунов В.И., Кузнецов В.Б.** Теоретическое исследование одной из задач теплового контроля точечных сварных швов // *Дефектоскопия*, 1973, № 1 С 21–27
- 166 **Shepard S., Chaudry B., Pre-desky R., Zaluzek M.** Pulsed thermographic inspection of spot welds // *Proc SPIE "Thermosense-XX"*, 1998, V 3361 P 320–323
- 167 **Брагина Л.А., Вавилов В.П., Иванов А.И. и др.** Контроль дефектов диффузионной сварки выпрямительных элементов активным тепловым методом // *Дефектоскопия*, 1983 № 5 С 69–70
- 168 **Вавилов В.П., Ширяев В.В., Танасейчук С.Ю.** Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений // *Дефектоскопия*, 1978, № 10 С 63–67
- 169 **Денисов С.С., Волков Я.А., Стороженко В.А., Рапопорт Д.А.** Сканирующая оптическая головка для активного неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*, 1975, № 6 С 116–118
- 170 **Cramer K.E., Jacobstein R., Reilly T.** Boiler tube corrosion characterization with a scanning thermal line // *Proc SPIE "Thermosense XXIII"*, V 4360, 2001 P 594–605
- 171 **Maldague X.** Pipe inspection by IR thermography *NDT solution Mater Evaluation*, 1999, V 57, No 9 P 899–902
- 172 **Martinez V.M., Martinez B.T., Olmeda Gonzalez P.O., Peralta Uria R.W.** Fault detection in diesel engines using infrared thermography *Insight*, V 44, No 4, April 2000 P 228–232
- 173 **Jones T.S., Lindgren E.A.** Thermographic inspection of marine composite structures // *Proc SPIE "Thermosense XVI"*, V 2245, 1994 P 173–175
- 174 **Алеев Р.М., Овсянников В.А., Чепурский В.Н.** Воздушная тепловизионная аппаратура для контроля нефтепродуктопроводов М Недра 1995 160 с
- 175 **Ljungberg S.-A., Jonsson O.** Passive gas imaging – preliminary results from gas leak simulations a field study performed during real world conditions // *Proc SPIE "Thermosense XXIV"*, V 4710, 2002 P 468–477
- 176 **Поцелуев А.А., Архангельский В.В.** Дистанционные методы исследования окружающей среды Учебное пособие для вузов Томск, STT, 2001 С 184
- 177 **Синеглазов В.М., Кеткович А.А.** Активная тепловая интроскопия - Киев Техника, 1990 110 с
- 178 **Неразрушающий контроль и диагностика** Справочник / Под ред В В Клюева, М Машиностроение, 2003 650 с
- 179 **Неразрушающий контроль** Россия, 1900–2000 г / Справочник Под редакцией В В Клюева, М Машиностроение, 2002 628 с

ПРИЛОЖЕНИЯ

**1. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ
ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ПО ТЕПЛОВОМУ МЕТОДУ
(СИСТЕМА ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ГОСГОРТЕХНАДЗОРА РФ)**

**2. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВОПРОСЫ
ОБЩЕГО ЭКЗАМЕНА ПО ТЕПЛОВОМУ КОНТРОЛЮ**

**1. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ПО ТЕПЛОВОМУ МЕТОДУ (СИСТЕМА ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ГОСТОРТЕХНАДЗОРА РФ)**

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
<i>1. Классификация видов и методов НК</i>		
1.1 Термины и определения 1.2 Тепловой вид НК 1.3 Активный ТК 1.4 Пассивный ТК 1.6 Типовые группы дефектов, выявляемых ТК	1.1 Термины и определения 1.2 Тепловой вид НК 1.4 Квалификационная система методов ТК 1.6 Типовые группы дефектов, выявляемых ТК	1.3 Тепловой вид НК 1.5 Квалификационная система методов ТК 1.6 Типовые группы дефектов, выявляемых ТК
<i>2. Физические основы ТК</i>		
2.1 Элементы теории теплопроводности теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность Определение, единицы измерения Закон теплопроводности (Фурье) 2.4 Источники теплового излучения, температура и ее измерение Реперные точки температурных шкал	2.1 Элементы теории теплопроводности теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность Определение, единицы измерения 2.2 Закон теплопроводности (Фурье) 2.4 Источники теплового излучения, температура и ее измерение Статистическое и термодинамическое определение температуры Международная практическая шкала Яркая, цветная и радиационная температура, их взаимосвязь Реперные точки температурных шкал	2.1 Элементы теории теплопроводности 2.2 Способы измерения ТФХ при импульсном, гармоническом и изотермическом воздействии 2.3 Адиабатические системы Температурные волны Измерение тепловых потоков, тепломеры 2.4 Источники теплового излучения, температура и ее измерение Методы фотографической и телевизионной пирометрии Метрологическое обеспечение температурных измерений Измерение температур при быстротекущих процессах

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
<p>2 7 Спектр излучения АЧТ Поглощение, рассеяние и пропускание ИК излучения в атмосфере</p>	<p>2 5 Закономерности испускания, распространения и поглощения теплового излучения 2 6 Коэффициент излучения. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина Ламбертовский излучатель</p> <p>2 7 Спектр излучения АЧТ Закон Планка Поглощение, рассеяние и пропускание ИК излучения в атмосфере Закон Бугера-Ламберта-Бера Индикатрисы отражения и пропускания ИК излучения Излучение полостей черных тел Закон Ламберта Коэффициент поглощения твердых непрозрачных тел, методы его измерения Коэффициент поглощения солнечной радиации и способы его определения.</p>	<p>2 5 Закономерности испускания, распространения и поглощения теплового излучения 2 6 Тепловое излучение полупрозрачных и селективно поглощающих сред Уравнение переноса излучения Теплообмен излучением в излучающей, поглощающей и рассеивающей средах Полное внутреннее отражение ИК излучения, ИК световоды Спектры излучения типовых объектов ТК (частотные и оптико-геометрические характеристики) ИК излучение фоновых излучателей, способы его фильтрации Поляризация ИК излучения Поляризационные ИК фильтры (типы, характеристики, области применения)</p>

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
3. Элементы теории оптико-электронных приборов		
<p>3 1 Оптические системы для фокусировки, модуляции и сканирования ИК излучения, их характеристики</p>	<p>3 1 Оптические системы для фокусировки, модуляции и сканирования ИК излучения, их характеристики Расчет увеличения и облученности в плоскости изображения Линзовые объективы и материалы для их изготовления Линзы Френеля Оптическая передаточная функция Реакции оптической системы на точечный, линейный и полубесконечный источники излучения, их взаимосвязь</p> <p>3 2 Пространственно-частотные спектры дефектов, методы их фильтрации Критерии качества изображения Матричные и сканирующие преобразователи изображения, их характеристики Учет свойств зрения при анализе термограмм Пороговая разность температур, обнаруживаемая тепловизором, и факторы, влияющие на нее</p>	<p>3 2 Мультиспектральная и пространственно-частотная селекция ИК излучателей.</p> <p>3 3 Сигнатуры дефектов, методы их распознавания</p> <p>3 4 Реакции оптической системы на точечный, линейный и полубесконечный источники излучения, их взаимосвязь Методы устранения влияния посторонних источников излучения на тепловые изображения</p>

Продолжение прилож. 1

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
		3.5 Цифровые и аналоговые методы фильтрации пространственных частот. Способы компьютерной обработки тепловизионных сигналов. Пороговая разность температур, обнаруживаемая тепловизором, и факторы, влияющие на нее.
4. Аппаратура ТК		
<p>4.1 Современные типы приборов ТК. Представление данных и методы регистрации.</p> <p>4.2 Пирометры, ИК сканеры, матричные тепловизоры, вспомогательные приборы. Способы контроля их характеристик.</p>	<p>4.1 Современные типы приборов ТК. Представление данных и методы регистрации.</p> <p>4.2 Пирометры излучения, их технические характеристики, способы калибровки. Сканирующие линейные пирометр и тепловизоры. Пировидеоны и матричные тепловизоры. Способы контроля их характеристик.</p> <p>4.3 Источники нагрева изделий при ТК (лазеры, галогенные лампы и т.п.), их характеристики.</p> <p>4.4 Источники типа АЧТ для калибровки тепловизоров.</p> <p>4.5 ИК волоконно-оптические эндоскопы.</p> <p>4.6 Тепловизионные микроскопы.</p> <p>4.7 Способы представления термограмм, термопрофили, изотермы, окрашивание, трехмерная индикация.</p>	<p>4.1 Современные типы приборов ТК. Представление данных и методы регистрации.</p> <p>4.2 Компьютерные тепловизионные системы с импульсным и стробоскопическим нагревом изделий. ИК волоконно-оптические эндоскопы. Тепловизионные микроскопы. Тепловизионные системы для дистанционного мониторинга объектов (вертолетные, самолетные и спутниковые системы).</p> <p>4.7 Спектрометрия, способы выделения частотных диапазонов теплового излучения и их обработка для исключения влияния излучательной способности.</p> <p>4.8 Особенности пирометрии при сверхнизких температурах.</p>

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
5. Технология ТК		
<p>5.1 Основные информативные параметры ТК</p> <p>5.3 Выбор метода контроля и аппаратуры в зависимости от задачи и вида объекта контроля</p> <p>5.4 Методика калибровки оборудования</p> <p>5.5 Методика измерений и порядок передачи результатов измерений на обработку</p>	<p>5.1 Основные информативные параметры ТК Выбор метода контроля и аппаратуры в зависимости от задачи и вида объекта контроля Методика калибровки оборудования</p> <p>5.2 Пассивный и активный ТК Одно- и двухсторонний синхронный и несинхронный методы ТК Методы измерения температур тепловидения Критерии обнаружения дефектов Основные закономерности процедуры ТК Зависимость максимального температурного перепада над дефектом от площади его раскрытия, глубины залегания, соотношения дефектов и стандартных образцов</p>	<p>5.1 Основные информативные параметры ТК</p> <p>5.3 Выбор метода контроля и аппаратуры в зависимости от задачи и вида объекта контроля</p> <p>5.4 Методика калибровки оборудования</p> <p>5.6 Статистические процедуры обнаружения дефектов</p> <p>5.7 Тепловая толщинометрия Методы дефектометрии при ТК Тепловая томография</p> <p>5.8 Лазерное тепловизионное обнаружение утечек в атмосферу</p>

Продолжение прилож. 1

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
6. Метрологическое обеспечение и стандартизация		
6.1 Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД Поверка средств ТК	6.1 Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД Поверка средств ТК	6.1 Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД Поверка средств ТК
7. Правила безопасности на опасных производственных объектах. Охрана труда.		
	7.1 Конструкция технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах 7.2 Правила безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов 7.3 Требования к качеству технических устройств, зданий, сооружений (объектов контроля) на опасных производственных объектах 7.4 Техническая оснащенность и организация работ по ТК в лаборатории НК 7.5 Требования безопасности при проведении НК 7.6 Организация участка для проведения НК 7.7 Требования техники безопасности на производстве Общие положения 7.8 Требования пожарной безопасности	7.1 Конструкция технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах 7.2 Правила безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов 7.3 Требования к качеству технических устройств, зданий, сооружений (объектов контроля) на опасных производственных объектах 7.4 Техническая оснащенность и организация работ по ТК в лаборатории НК 7.5 Требования безопасности при проведении НК 7.6 Организация участка для проведения НК 7.7 Требования техники безопасности на производстве Общие положения 7.8 Мероприятия по пожарной безопасности.

Продолжение прилож 1

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
<p>8. Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД.</p> <p>12 Критерии оценки состояния объекта контроля с учетом специфических требований каждой отрасли производства (промышленный сектор).</p> <p>13 Характерные особенности проведения ТК строительных объектов и объектов ЖКХ.</p> <p>14 Характерные особенности проведения ТК объектов энергетики</p> <p>15 Перспективы развития ТК в области его применения по областям и объектам контроля.</p> <p>16 Практические занятия по овладению навыками тепловизионной съемки.</p>	<p>8 Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД</p> <p>Критерии оценки состояния объектов контроля по результатам ТК и диагностики с учетом специфических требований каждой отрасли производства</p> <p>9 Современное состояние и направления развития ТК, его значимость для обеспечения качества и надежности выпускаемой предприятием продукции</p> <p>10. Стандарты, методические рекомендации, инструкции, порядок оформления результатов ТК</p> <p>11. Понятие о других методах НК</p>	<p>8 Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД</p> <p>9 Современное состояние и направления развития ТК</p> <p>11. Значимость НРК для обеспечения качества и надежности выпускаемой предприятием продукции Понятие о других методах НРК</p> <p>12 Критерии оценки состояния объекта контроля с учетом специфических требований каждой отрасли производства (промышленный сектор)</p>

2. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕГО ЭКЗАМЕНА ПО ТЕПЛОВОМУ КОНТРОЛЮ*

I-й уровень квалификации

1. Процесс передачи тепла от объекта к объекту осуществляется:
 - а) теплопроводностью
 - б) конвекцией
 - в) излучением
 - г) всем перечисленным
2. Температура может измеряться:
 - а) в градусах Цельсия
 - б) в кельвинах
 - в) в градусах Фаренгейта
 - г) "а", "б" и "в"
3. За начало отсчета в шкале абсолютных температур принимают температуру:
 - а) $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - б) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - в) $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - г) $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. Интегральная интенсивность теплового излучения объектов пропорциональна:
 - а) коэффициенту излучения поверхности
 - б) первой степени температуры объекта
 - в) четвертой степени температуры объекта
 - г) "а" и "в"
5. Коэффициенты отражения поверхностей могут принимать значения:
 - а) от 0 до 1
 - б) от 0 до ∞
 - в) от 0 до 10
 - г) "а" и "б"
6. Какой характер имеет отражение от плоской полированной поверхности:
 - а) зеркальное, направленное
 - б) диффузное
 - в) диффузное, направленное
 - г) "б" и "в"
7. Коэффициенты пропускания оптически прозрачных материалов могут изменяться в пределах:
 - а) от 0 до 1
 - б) от 0 до 2
 - в) от 0 до 0,5
 - г) все вышеперечисленное
8. Оптическая плотность прозрачного объекта связана с его толщиной зависимостью:
 - а) линейной
 - б) квадратичной
 - в) кубической
 - г) обратно пропорциональной
9. ИК излучение занимает диапазон длин волн от ... до
 - а) 0,076 0,76 мкм
 - б) 0,76 1000 мкм
 - в) 1000 2000 мкм
 - г) 2000 4000 мкм
10. АЧТ по определению поглощает ... падающего на него излучения:
 - а) 25 %
 - б) 50 %
 - в) 75 %
 - г) 100 %
11. Серое тело по сравнению с АЧТ при одной и той же температуре имеет ... спектр и ... интенсивность излучения:
 - а) тот же большую
 - б) тот же меньшую
 - в) другой большую
 - г) другой меньшую
12. Шероховатые поверхности твердых тел излучают ... зеркальные:
 - а) слабее, чем
 - б) сильнее, чем
 - в) так же, как
 - г) "б" или "в"

* За основу принята программа АНО «Спектр-Тест-С»

13. Радиационные пирометры, работающие в широком спектральном диапазоне, используют, в основном, для измерения температуры тел:

- а) сильно нагретых
- б) слабонагретых
- в) "а" и "б"
- г) "а" или "б"

14. Действие термондикаторов основано на изменении ... некоторых веществ при нагреве:

- а) агрегатного состояния
- б) яркости
- в) цвета
- г) все перечисленное

15. Действие жидкостных термометров основано:

- а) на термоэлектрическом эффекте
- б) температурной зависимости цвета
- в) зависимости между температурой и давлением
- г) термическом расширении жидкости

16. Рабочим веществом термометров, использующих шкалу Цельсия, служит:

- а) вода
- б) спирт
- в) ртуть
- г) "б" и "в"

17. Спектральный коэффициент поглощения равен спектральному коэффициенту излучения:

- а) у любых тел
- б) АЧТ
- в) серых тел
- г) "а", "б" и "в"

18. Наиболее высокой излучательной способностью при одной и той же температуре будет обладать:

- а) полированный алюминий
- б) шероховатый алюминий
- в) полированное железо
- г) литое необработанное железо

19. К основным ТФХ объектов не относятся:

- а) теплопроводность
- б) температуропроводность
- в) теплоемкость
- г) температуру

20. Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладает:

- а) алюминий
- б) латунь
- в) серебро
- г) медь

21. Какие средства бесконтактной визуализации тепловых полей могут применяться в ТК:

- а) пировидиконы
- б) сканирующие тепловизоры с оптико-механической разверткой
- в) тепловизоры с матричными фотоприемниками
- г) все вышеперечисленное

22. Мгновенное поле зрения сканирующего тепловизора определяется:

- а) фокусным расстоянием объектива тепловизора
- б) размером приемной площадки ИК приемника
- в) относительным отверстием объектива
- г) "а" и "б"

23. Поле обзора тепловизора с матричным детектором ИК излучения зависит:

- а) от размера матрицы детекторов
- б) фокусного расстояния объектива тепловизора
- в) светосилы объектива
- г) "а" и "б"

24. Как зависит минимальная обнаруживаемая тепловизором разность температур от светосилы его объектива:

- а) не зависит
- б) зависит линейно
- в) зависит нелинейно
- г) зависит случайным образом

25. Какие эталонные излучатели могут использоваться для калибровки тепловизионных систем:

- а) полостные излучатели типа АЧТ
- б) планарные (плоскостные) излучатели
- в) дифференциальные излучатели АЧТ
- г) все вышеперечисленное

26. Если дефект плохо проводит тепло, то место, где он находится, при одностороннем активном ТК характеризуется локальным ... температуры:

- а) понижением
- б) повышением
- в) как "а", так и "б"
- г) ни "а", ни "б"

27. Момент регистрации температурного перепада зависит от:

- а) теплопроводности объекта контроля
- б) теплопроводности дефекта в объекте контроля
- в) глубины залегания дефекта
- г) все вышеперечисленное

28. Увеличение мощности нагревателя ... температурный перепад и ... текущий температурный контраст:

- а) уменьшает уменьшает
- б) уменьшает ... увеличивает
- в) увеличивает .. не изменяет
- г) увеличивает .. увеличивает

29. Кратковременный локальный нагрев объекта контроля по сравнению со способом одновременного нагрева всей поверхности образца обладает ... эффективностью выявления дефектов и ... производительностью

- а) повышенной ... высокой
- б) низкой ... низкой
- в) повышенной ... низкой
- г) низкой . высокой

30. Для неметаллических объектов контроля (приблизительно толщиной 1 до 10 мм) значение момента регистрации температурного перепада составляет:

- а) несколько мкс
- б) несколько мс
- в) от нескольких секунд до нескольких минут
- г) десятки минут

31. При пассивном методе ТК:

- а) объект контроля нагревают о внешнего источника
- б) объект контроля не нагревают
- в) объект контроля нагревается процессе естественного функционирования
- г) "а" и "б"

32. Для металлических объектов контроля (приблизительно толщиной от 1 до 10 мм) значение момента регистрации температурного перепада составляет:

- а) несколько мкс
- б) от долей секунд до нескольких секунд
- в) от одной до нескольких минут
- г) десятки минут

33. При дефектоскопии тепловым методом основным информационным параметром является:

- а) температура отдельных точек
- б) излучательная способность
- в) перепад температуры между дефектной и бездефектной зоной
- г) "а" и "б"

34. В полевых условиях тепловизор для защиты от солнечного излучения должен иметь спектральную чувствительность с коротковолновой границей менее:

- а) 1 мкм
- б) 3 мкм
- в) 5 мкм
- г) 10 мкм

35. Объемный нагрев металлических изделий наиболее эффективен с помощью:

- а) индуктора
- б) лазера
- в) импульсной лампы
- г) галогенной лампы накаливания

36. Для измерения температуры в труднодоступных полостях пирометры снабжаются:

- а) световодом
- б) телескопической насадкой
- в) лазерным визиром
- г) светофильтром

37. Для создания реперных точек с высокой излучательной способностью на объектах из металлов, визируемых пирометром, применяют:

- а) локальное окисление поверхности
- б) окраску сажевой краской
- в) сверление отверстий
- г) "а", "б" или "в"

38. Электронно-оптический преобразователь с внешним фотоэффектом имеет длинноволновую границу чувствительности:

- а) 0,8 мкм
- б) 1,0 мкм
- в) 1,3 мкм
- г) 10 мкм

39. Тепловизионные микроскопы имеют пространственное разрешение на уровне:

- а) десятков мкм
- б) долей мм
- в) долей см
- г) менее 1 мкм

II-Й УРОВЕНЬ КВАЛИФИКАЦИИ

1. Коэффициент излучения серого тела может изменяться:

- а) от 0,0 до 1,0
- б) от 0 до 2
- в) от 0,5 до 1,0
- г) все вышеперечисленное

2. Сумма коэффициентов пропускания (τ), отражения (ρ) и поглощения (α) объектов равна:

- а) $\sum = \tau + \rho + \alpha$
- б) $\sum = 0,5$
- в) $\sum = 10$
- г) $\sum = 100$

3. Закон Планка характеризует:

- а) спектральное распределение мощности излучения нагретого тела
- б) интегральную мощность излучения нагретого тела
- в) мощность излучения в определенном спектральном диапазоне
- г) все вышеперечисленное

4. Радиационная температура слабонагретых тел измеряется пирометром, работающим:

- а) в монохроматическом спектральном диапазоне
- б) в широком спектральном диапазоне
- в) в диапазоне видимого излучения
- г) все вышеперечисленное

5. На показания цветового пирометра коэффициент излучения объекта:

- а) влияет слабо
- б) абсолютно не влияет
- в) влияет периодически
- г) влияет случайным образом

6. Между коэффициентами диффузного R_D и направленного R_N отражения материалов существует соотношение:

- а) $R_D \geq R_N$
- б) $R_D < R_N$
- в) $R_D = R_N$
- г) $R_D > R_N$

7. Основными оптическими константами вещества являются:

- а) показатель преломления и показатель поглощения

- б) коэффициенты отражения и пропускания
 в) коэффициенты излучения и поглощения
 г) "б" и "в"
- 8. Ослабление излучения в поглощающем материале (закон Бугера-Ламберта) зависит от его толщины:**
 а) экспоненциально
 б) линейно
 в) квадратически
 г) никак не зависит
- 9. Предельная температура спиралей галогенных ламп накаливания составляет:**
 а) 1000 °С
 б) 3000 °С
 в) 3200 °С
 г) 6000 °С
- 10. Спектр излучения газоразрядных источников света имеет характер:**
 а) линейчатый
 б) непрерывный
 в) смешанный
 г) монохроматический
- 11. При тепловизионном контроле удаленных объектов влияние атмосферы может проявляться как:**
 а) возникновение миража (искривление световых лучей)
 б) мерцание изображения (флуктуации)
 в) ослабление ИК излучения из-за рассеяния и поглощения в атмосфере
 г) все вышеперечисленное
- 12. Какие aberrации характерны для зеркальных оптических систем тепловизоров:**
 а) хроматическая aberrация
 б) дисторсия и кома
 в) сферическая aberrация
 г) "б" и "в"
- 13. Масштаб изображения M связан с расстоянием до объекта D и фокусным расстоянием F приближенным соотношением:**
 а) $M = D/F$
 б) $M = DF$
 в) $M = F/D$
 г) $M = D + F$
- 14. На погрешность измерения абсолютных температур тепловизором влияют в основном:**
 а) дрейф чувствительности приемника и видеоусилителя
 б) светосила объектива
 в) отличие условий градуировки от условий измерения
 г) "а" и "в"
- 15. Основными операциями аналоговой обработки тепловизионного сигнала являются:**
 а) усиление сигналов фотоприемника
 б) суммирование видеосигналов и регулируемой постоянной составляющей для согласования его динамического диапазона с возможностями кинескопа
 в) разбиение видеосигнала на уровни постоянной энергии (изотермы)
 г) все вышеперечисленное
- 16. Как длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения серого излучателя (закон Вина), зависит от его температуры:**
 а) линейно
 б) обратно пропорционально
 в) квадратично
 г) не зависит вообще
- 17. Основными пространственно-энергетическими параметрами тепловизоров являются:**
 а) минимальная обнаруживаемая разность температур на поверхности объекта
 б) поле зрения
 в) мгновенный угол зрения
 г) все вышеперечисленное

18. Как зависит минимальная обнаруживаемая тепловизором разность температур двух зон на поверхности объекта контроля от размера этих зон:

- а) не зависит
- б) зависит линейно
- в) зависит нелинейно
- г) зависит случайным образом

19. Как зависит пространственное разрешение тепловизора от разности температур между деталями объекта:

- а) не зависит
- б) пространственное разрешение улучшается с уменьшением разности температур
- в) ухудшается
- г) зависит случайным образом

20. К мешающим факторам при тепловизионном контроле относят:

- а) неоднородность излучательной способности поверхности объекта
- б) наличие посторонних источников теплового излучения
- в) наличие паров и/или газов над объектом, поглощающих тепловое излучение
- г) все вышеперечисленное

21. Зависимость спектрального распределения плотности мощности теплового излучения серого излучателя от его температуры описывается законом:

- а) Стефана-Больцмана
- б) Планка
- в) Кирхгофа
- г) "а" и "в"

22. Модуляционная функция тепловизора описывает:

- а) зависимость коэффициента модуляции сигнала от пространственной частоты деталей объекта
- б) зависимость амплитуды сигнала от температуры объекта
- в) зависимость амплитуды сигнала от относительного отверстия (светосилы объектива тепловизора
- г) "б" и "в"

23. Применение матричных приемников излучения в тепловидении обеспечивает:

- а) увеличение времени накопления сигнала на элементах матриц
- б) сужение полосы пропускания усилителя сигналов
- в) повышение температурной чувствительности
- г) "а", "б" и "в"

24. Как влияет число элементов разложения в тепловизионном кадре на его температурную чувствительность (при прочих равных условиях)

- а) никак не влияет
- б) ухудшает
- в) улучшает
- г) "а" или "б"

25. Современные цифровые тепловизоры с обработкой изображения обеспечивают:

- а) измерение температуры в любой точке изображения
- б) визуализацию профилей температуры по любому сечению и построение изотерм
- в) возможность цифровой апостериорной коррекции резкости изображения и его псевдоцветовую "раскраску"
- г) все вышеперечисленное

26. Для тепловизионного контроля удаленных и малоразмерных объектов целесообразно применять:

- а) широкоугольные объективы
- б) телеобъективы с узким полем зрения
- в) микрообъективы
- г) "б" и "в"

27. Тепловизионные микроскопы могут обеспечить пространственное разрешение в пределах:

- а) не лучше 200 мкм
- б) долей мм
- в) около 20 мкм
- г) менее 1 мкм

28. Для изготовления линзовых объективов тепловизоров применяют материалы:

- а) силикатные стекла и кварц
- б) халькогенидные ИК стекла
- в) германий и кремний
- г) "б" и "в"

29. Какие системы развертки изображения в сканирующих тепловизорах имеют наиболее высокий коэффициент использования (т.е. отношение полезного времени развертки к холостому ходу)

- а) вращающиеся зеркальные барабаны и призмы
- б) вращающиеся многогранные призмы, работающие на пропускание
- в) вибрирующие зеркала на торсионных подвесках
- г) "а" и "б"

30. Для увеличения чувствительности тепловизора с приемником излучения, работающим в режиме ограничения фоновым шумом, целесообразно:

- а) увеличивать диаметр объектива
- б) уменьшать фокусное расстояние объектива
- в) использовать просветление оптических элементов (линз, зеркал и т.п.)
- г) "а", "б" и "в"

31. Одномерная оптическая передаточная функция (ОПФ) тепловизора есть Фурье-образ:

- а) импульсной реакции (функции рассеяния линии)
- б) функции скачка (функции рассеяния полуплоскости)
- в) функции рассеяния точки
- г) "а" и "б"

32. Для измерения ОПФ тепловизора можно применять тест-объекты в виде:

- а) узкой светящейся линии
- б) светящейся полуплоскости
- в) набора мир (регистр переменной пространственной частоты)
- г) "а", "б" или "в"

33. В установках локального нагрева объектов с малогабаритными источниками излучения (галогенные лампы и т.п.) наиболее эффективно применять следующие фокусирующие оптические системы:

- а) линзы Френеля
- б) эллиптические зеркальные отражатели
- в) сферические зеркала
- г) "а" и "б"

34. Для лучистого нагрева больших поверхностей без сканирования применяют:

- а) лазеры
- б) трубчатые галогенные лампы накаливания
- в) трубчатые ксеноновые лампы
- г) "б" и "в"

35. При использовании мощных импульсных источников нагрева уменьшение длительности импульса:

- а) повышает текущий температурный контраст над дефектом, но влечет риск перегрева изделия
- б) улучшает все параметры обнаружения дефекта
- в) ухудшает все параметры обнаружения дефекта
- г) не влияет на параметры обнаружения дефекта

36. Преимуществом нагрева изделий потоком горячего воздуха является:

- а) слабая зависимость от коэффициента излучения изделия
- б) высокая плотность поглощенной энергии
- в) кратковременный характер нагрева
- г) "б" и "в"

37. Угол расхождения неколлимированного излучения газовых лазеров имеет типовое значение, град:

- а) 0,1
- б) 1
- в) 10
- г) 90

38. Что является основным информационным параметром при ТК:

- а) только локальная разность температур ΔT (перепад температуры) между дефектной и бездефектной областью
- б) перепад температуры ΔT и текущий температурный контраст $\Delta T / T$ (T – средняя избыточная температура объекта)
- в) средняя избыточная температура объекта T
- г) первая производная от температурного перепада по времени или пространству

39. При нагреве изделий в области слаботеплопроводных дефектов имеет место следующее изменение температуры относительно бездефектной области:

- а) при одностороннем контроле – температура не меняется
- б) при одностороннем контроле – понижение
- в) при двухстороннем контроле – повышение
- г) при двухстороннем контроле – понижение

40. Как характеризуется временной ход температурного перепада над дефектом при нагреве изделия:

- а) монотонное возрастание
- б) монотонное уменьшение
- в) кривая с максимумом
- г) гармонические осцилляции

41. Существует ли и от чего зависит оптимальный момент регистрации температурного перепада над дефектом при активном ТК:

- а) существует, зависит от ТФХ объекта и дефекта, геометрии и глубины залегания дефекта
- б) не существует, не зависит никак
- в) существует, не зависит от ТФХ дефекта и изделия
- г) существует, зависит только от глубины залегания дефекта

42. Преимущества лазерного нагрева сказываются при:

- а) локализованном нагреве, если требуется большая плотность поглощенной энергии
- б) использовании длины волны, находящейся вне диапазона чувствительности ИК системы, что приводит к снижению отраженной за светки
- в) расфокусировании лазерного пучка, в результате чего возрастает поглощенная изделием энергия
- г) "а" и "в"

43. Как влияет поляризация света и его интенсивность на коэффициент отражения от поверхности диэлектрика:

- а) не влияют
- б) поляризация не влияет, интенсивность влияет
- в) поляризация влияет, интенсивность не влияет
- г) влияют оба фактора

44. В качестве реперных марок с известными коэффициентами излучения на поверхность объекта при тепловизионном контроле можно наносить:

- а) краску на основе жидкого стекла ($\epsilon = 0,96$)
- б) липкую ленту из поливинилхлорида ($\epsilon = 0,92$)
- в) химически полированную алюминиевую фольгу ($\epsilon = 0,03$)
- г) все вышеперечисленное

45. Для регистрации длинноволнового ИК излучения (диапазон 8-14 мкм) в сканирующих тепловизорах применяют детекторы:

- а) охлаждаемые фотосопротивления из антимолида индия
- б) охлаждаемые фоторезисторы на основе тройных соединений КРТ (кадмий-ртуть-теллур)
- в) болометр
- г) "а" и "б"

46. Механизм теплопередачи описывается законами:

- а) Фурье
- б) Ньютона
- в) Стефана-Больцмана
- г) "а", "б" и "в"

III -Й УРОВЕНЬ КВАЛИФИКАЦИИ

1. В качестве опорных точек в шкале Цельсия приняты:

- а) температуры замерзания и кипения воды
- б) температуры кипения воды и замерзания спирта
- в) температуры кипения воды и замерзания ртути
- г) температуры замерзания ртути и кипения воды

2. Каково соотношение между температурами в шкалах Кельвина (T , K) и Цельсия (t , $^{\circ}C$):

- а) $T = t + 273$
- б) $T = t - 273$
- в) $T = 273/t$
- г) $T = 273 - t$

3. Каково соотношение между интервалами в один градус шкал Кельвина (K) и Цельсия ($^{\circ}C$):

- а) $1 K = 1 ^{\circ}C$
- б) $1 K = 10 ^{\circ}C$
- в) $1 K = 0,1 ^{\circ}C$
- г) $1 K = 273^{\circ}C$

4. Рабочим телом волоконно-оптического термометра может быть:

- а) термолюминофор
- б) жидкий термохромный кристалл
- в) двупреломляющий термочувствительный кристалл
- г) все вышеперечисленное

5. Мгновенный угол зрения тепловизоров, как правило, ... угла зрения ИК термометров:

- а) равен
- б) больше
- в) или "а", или "б"
- г) меньше

6. Между коэффициентами поглощения α , излучения ε и отражения ρ для непрозрачных материалов существует зависимость (закон Кирхгофа):

- а) $\alpha = \varepsilon = 1 - \rho$
- б) $\alpha = \varepsilon = 1 + \rho$
- в) $\alpha = \varepsilon = 1/\rho$
- г) $\alpha = \varepsilon = \rho^2$

7. Радиационный метод измерения коэффициента излучения основан:

- а) на сравнении энергетических светимостей (ЭС) эталона и объекта испытаний (ОИ), нагретых до одинаковой температуры
- б) на сравнении ЭС ОИ с ЭС эталона, нагретого до более высокой температуры, чем ОИ
- в) на сравнении ЭС ОИ и эталона в процессе их охлаждения
- г) "б" и "в"

8. Увеличение шероховатости поверхности объекта контроля изменяет ее коэффициент излучения следующим образом:

- а) увеличивает
- б) уменьшает
- в) никак не влияет
- г) все вышеперечисленное

9. Яркость поверхностного излучения идеального (ламбертовского) излучателя в любом направлении:

- а) постоянна
- б) изменяется по косинусоидальному закону
- в) изменяется линейно
- г) изменяется случайным образом

10. Для устранения помех от высокотемпературных источников (Солнце, пламена и т.п.) в тепловидении применяют:

- а) отсекающие спектральные фильтры с коротковолновой границей 2-2,5 мкм
- б) монохроматические ИК фильтры
- в) ИК поляризаторы
- г) модуляцию потока излучения

11. Спектральный коэффициент излучения АЧТ:

- а) постоянен для всех длин волн
- б) монотонно увеличивается с ростом длины волны
- в) гармонически изменяется (осциллирует) при изменении длины волны
- г) изменяется случайным образом

12. Коэффициенты излучения ϵ селективных излучателей изменяются в пределах:

- а) $0 < \epsilon < 1,0$
- б) $0,1 < \epsilon < 10$
- в) $0,1 < \epsilon < 100$
- г) $0,1 < \epsilon < 0,5$

13. Коэффициент излучения металлов с ростом температуры:

- а) не изменяется
- б) увеличивается
- в) уменьшается
- г) изменяется случайным образом

14. Интегральный коэффициент излучения при увеличении угла наблюдения (т.е. угла между линией визирования и нормалью к поверхности объекта):

- а) не меняется
- б) увеличивается
- в) уменьшается
- г) изменяется периодически

15. Какие объективы можно применять в тепловизорах, работающих в длинноволновом окне прозрачности атмосферы (8-14 мкм):

- а) зеркальные
- б) выполненные на основе германиевых и кремниевых линз
- в) выполненные из стеклянных или кварцевых линз
- г) "а" и "б"

16. В каком диапазоне ИК излучения прозрачны кварцевые световоды, используемые для тепловизионной эндоскопии:

- а) 1 – 4 мкм
- б) 1 – 20 мкм
- в) 2 – 10 мкм
- г) 1,5 – 14 мкм

17. Типовые значения температурной чувствительности ..., пространственной разрешающей способности ... и постоянной времени для пленочных жидкокристаллических термоиндикаторов составляют:

- а) $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 10 мм^{-1} , 1 с
- б) $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 100 мм^{-1} , 10 с
- в) $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 1 мм^{-1} , 0,1 с
- г) $10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $0,1 \text{ мм}^{-1}$, 1 с

18. Диапазон длин волн, соответствующий спектральному диапазону чувствительности типового пировидикона, составляет

- а) 1 – 10 мкм
- б) 2 – 20 мкм
- в) 3 – 100 мкм
- г) 1 – 50 мкм

19. Области длин волн, соответствующие практически используемым в тепловидении окнам прозрачности атмосферы в ИК спектре, находятся в диапазонах:

- а) 1 – 3 и 5 – 10 мкм
- б) 3 – 5 и 8 – 14 мкм
- в) 1 – 10 и 2 – 20 мкм
- г) "а" и "в"

20. Для повышения чувствительности фотонные детекторы ИК излучения обычно охлаждаются с помощью:

- а) жидкого азота
- б) термоэлектрических холодильников
- в) холодильников Стирлинга
- г) "а" или "б", или "в"

21. Излучатель типа АЧТ нагрет до температуры 300 К. Чему равна длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения?

- а) 1 мкм
- б) 10 мкм
- в) 50 мкм
- г) 100 мкм

22. Полимерная пленка имеет спектральную полосу поглощения на длине волны 3,39 мкм. В каком диапазоне спектра должен работать пирометр для измерения ее температуры?

- а) 3,38 – 3,40 мкм
- б) 2 – 5 мкм
- в) 1 – 20 мкм
- г) 8 – 14 мкм

23. Как зависит минимальная обнаруживаемая тепловизором разность температур от его динамического диапазона?

- а) не зависит
- б) зависит линейно
- в) зависит нелинейно
- г) зависит случайным образом

24. В каком спектральном диапазоне лучше производить тепловизионный контроль удаленных объектов, особенно в сложных метеоусловиях?

- а) 2 – 5 мкм
- б) 8 – 14 мкм
- в) 1 – 20 мкм
- г) 0,3 – 100 мкм

25. Какие светофильтры применяют для контроля селективно излучающих объектов (полимерных пленок и т.п.)?

- а) соответствующие полосе поглощения материала
- б) соответствующие максимуму спектральной плотности излучения материала при данной температуре
- в) соответствующие спектральным областям прозрачности атмосферы
- г) "а" и "б"

26. При малой разности температур объекта и окружающей среды следует принимать меры для:

- а) выравнивания коэффициентов излучения деталей его поверхности
- б) устранения посторонних нагретых тел
- в) стабилизации чувствительности приемника излучения тепловизора
- г) все вышеперечисленное

27. Пороговая величина обнаруживаемой тепловизором разности температур деталей объекта зависит от:

- а) детектирующей способности приемника излучения
- б) светосилы объектива
- в) флуктуаций интенсивности излучения объекта (тепловым шумом)
- г) всего вышеперечисленного

28. Приемники излучения тепловизоров охлаждаются с целью:

- а) снизить собственные тепловые шумы приемника
- б) стабилизировать температуру внутри оптической головки
- в) уменьшить собственное излучение оптических элементов
- г) "б" и "в"

29. Для определения минимальной разрешаемой тепловизором разности температур используют:

- а) решетки (миры) переменной частоты с минимальной разностью температур между мирой и фоновым излучателем
- б) решетки переменной частоты с максимально возможной разностью температур между мирой и фоновым излучателем
- в) целевую диафрагму переменной ширины, визируемую на фоне излучателя с большей (по сравнению с диафрагмой) температурой
- г) "б" и "в"

30. Минимальную обнаруживаемую тепловизором разность температур обычно определяют с помощью:

- а) двух излучателей большого углового размера с фиксированными температурами, которые размещают в поле зрения тепловизора
- б) линейного излучателя с известным распределением температуры по его длине
- в) излучателя большого углового размера с переменной температурой, уменьшаемой последовательно оператором до порогового значения (исчезновение изображения, отношение сигнал/шум или др. критерий)
- г) "а", "в" или "б"

31. В процедуре активного ТК расстояние d между областью нагрева и съема информации о дефекте зависит от теплопроводности объекта следующим образом:

- а) для металлов $d \rightarrow 0$
- б) не зависит вообще
- в) для диэлектриков $d \rightarrow 0$
- г) для диэлектриков $d = \text{const.}$

32. Тепловой контроль процесса охлаждения листового стекла, прозрачного в диапазоне 0,4 – 4 мкм следует проводить тепловизором с коротковолновой границей спектральной чувствительности:

- а) 4 мкм
- б) 10,4 мкм
- в) 3,4 мкм
- г) 0,4 мкм

33. При активном одностороннем ТК материалов с дефектами типа воздушных полостей в области над дефектами наблюдается:

- а) повышение температуры
- б) понижение температуры
- в) нет изменения температуры
- г) изменение температуры носит осциллирующий характер

34. При активном двухстороннем ТК материалов с дефектами типа воздушных полостей в области над дефектами наблюдается:

- а) повышение температуры
- б) понижение температуры
- в) нет изменения температуры
- г) изменяется гармонически

35. Основными ТФХ объектов являются:

- а) объемная плотность
- б) теплоемкость и температуропроводность
- в) температуропроводность и теплопроводность
- г) "а" и "в"

36. Какой зависимостью связан момент максимального температурного перепада над дефектом с глубиной его залегания при одностороннем ТК:

- а) никак не связан
- б) связан приблизительно линейной зависимостью
- в) уменьшается по квадратическому закону с ростом глубины залегания дефекта
- г) уменьшается по гиперболическому закону с ростом глубины залегания дефекта

37. Время проявления максимального температурного перепада с ростом теплопроводности изделия ...

- а) увеличивается
- б) уменьшается
- в) не изменяется
- г) либо "а", либо "б"

38. Как влияет увеличение мощности нагревателя на выявляемость дефектов при ТК и чем она ограничена:

- а) не влияет, ничем не ограничена
- б) не влияет, ограничена порогом теплового разрушения объекта
- в) улучшает выявляемость дефектов, ограничена порогом теплового разрушения объекта

г) повышает уровень нагрева объекта, улучшает выявляемость дефектов, ограничена порогом теплового разрушения объекта

39. В основе аналитического решения задач активного ТК лежит:

- а) уравнение электромагнитного поля Максвелла
- б) уравнение конвективного теплообмена Ньютона
- в) уравнение Стефана-Больцмана для полной энергии, излученной телом
- г) дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом условий непрерывности теплового потока на границах слоев и между изделием и дефектами

40. При активном ТК изделий с помощью линейного сканера целесообразно применять источник нагрева:

- а) полосовой
- б) точечный
- в) распределенный (площадочный)
- г) матричный (систему точечных источников)

41. Тепловой контроль вращающихся шин производят с помощью:

- а) обычного тепловизора
- б) тепловизора, работающего в стробоскопическом режиме
- в) линейного сканера
- г) пирометра

42. Активный ТК двухслойного изделия, состоящего из материалов с различной теплопроводностью (типа металл-пластик) и дефектами типа непроклеев, целесообразно проводить:

- а) односторонним методом с нагревом со стороны металла
- б) односторонним методом с нагревом со стороны пластика
- в) двухсторонним методом с нагревом со стороны металла
- г) двухсторонним методом с нагревом со стороны пластика

43. Для повышения вероятности распознавания дефектов методом ИК-сигнатур можно использовать:

- а) двухспектральные или мультиспектральные термограммы
- б) пространственно-временную фильтрацию тепловизионного сигнала
- в) статистические характеристики термограмм
- г) все вышеперечисленное

44. Для привязки координат тепловых аномалий к поверхности объекта контроля применяют:

- а) метод двухспектральных термограмм
- б) наложение изображений, полученных в видимом и ИК-диапазоне
- в) спектральную фильтрацию излучения
- г) "а", "б" и "в"

45. Для определения глубины залегания дефектов односторонним тепловым методом необходимо:

- а) повысить мощность источника нагрева
- б) применить объемный нагрев объекта
- в) использовать метод анализа изменения поверхностного температурного перепада во времени
- г) "а" и "б"

46. Для импульсного нагрева массивных объектов из электропроводящих материалов (листы металла и т.п.) рационально использовать:

- а) мощный лазер
- б) индуктор
- в) СВЧ-излучатель
- г) "б" и/или "в"

47. В процедурах двухстороннего ТК оптимальное время наблюдения сигналов от дефектов зависит от глубины залегания дефектов:

- а) слабо
- б) сильно
- в) осциллирует
- г) изменяется случайным образом