

В.П. ВАВИЛОВ

# ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ



С3364135

Москва, Издательский ЦМ



СПЕКТР-2005

**В.П. ВАВИЛОВ**

# **ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ**



Москва, Издательский дом

**"СПЕКТР"**, 2009

УДК [681.2+620.1](035)

ББК 31.32

В12

Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 09-08-07071



**Вавилов В.П.**

В12 Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.: ил. и цветная вкладка 16 с.  
ISBN 978-5-904270-05-6

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.

Для специалистов промышленности, работников служб контроля, эксплуатации и ремонта, а также для научных работников, преподавателей и студентов вузов.

УДК [681.2+620.1](035)

ББК 31.32

---

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Владимир Платонович ВАВИЛОВ**

**ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ**

Редактор *П.Е. Клейзер*

Художественное оформление *Н.В. Клейзер*

Корректоры: *М.А. Евсейчева, Т.А. Сынкova*

Инженеры по компьютерному макетированию: *Т.Ю. Зотова, М.Н. Рыжкова, М.А. Филатова*

Сдано в набор 20.06.2009 г. Подписано в печать 17.08.2009 г.

Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 42,02 (в т.ч. вкл. 1,1). Уч.-изд. л. 38,6 (в т.ч. вкл. 1,1).

Тираж 400 экз. Заказ 1134

ООО «Издательский дом «Спектр»,

119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.

[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: [idspektr@rambler.ru](mailto:idspektr@rambler.ru)

Отпечатано в ГУП ППП «Типография "Наука"» РАН,  
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-904270-05-6

© Вавилов В.П., 2009

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	11	<b>Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-</b>	
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	15	<b>ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕ-</b>	
<b>Глава 1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И ФИ-</b>		<b>РИСТИК МАТЕРИАЛОВ</b> .....	60
<b>ЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕП-</b>		3.1. Представление функции	
<b>ЛОВОГО КОНТРОЛЯ</b> .....	17	изменения температуры в раз-	
1.1. Терминология теплового		личных координатах .....	60
контроля .....	17	3.2. Определение тепловой инер-	
1.2. Пассивный и активный		ции материала (передняя поверх-	
тепловой контроль .....	25	ность полуограниченного тела,	
1.3. Базовые процедуры тепло-		нагреваемого импульсом Дирака)	62
вого контроля .....	30	3.3. Определение температуро-	
<b>Глава 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В БЕЗ-</b>		проводности (задняя поверх-	
<b>ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ</b> .....	33	ность адиабатической пластины,	
2.1. Механизмы теплопередачи ..	33	нагреваемой импульсом Дирака)	62
2.1.1. Теплопроводность, кон-		3.4. Определение температуро-	
векция и излучение .....	33	проводности (передняя поверх-	
2.1.2. Граничные условия на		ность адиабатической пластины,	
поверхности объектов контроля	34	нагреваемой импульсом Дирака)	64
2.1.3. Теплопередача в дефектах		3.5. Определение толщины из-	
и на границах разнородных слоев	35	делия и степени коррозии (пе-	
2.2. Дифференциальное уравне-		редняя поверхность адиабати-	
ние теплопроводности .....	37	ческой пластины, нагреваемой	
2.2.1. Параболическое уравнение		импульсом Дирака) .....	64
теплопроводности в декартовых		3.6. Определение оптимального	
координатах .....	37	времени обнаружения подпо-	
2.2.2. Параболическое уравнение		верхностных дефектов (полуог-	
теплопроводности в цилиндриче-		раниченное тело, нагреваемое	
ских и сферических координатах	37	импульсом Дирака) .....	65
2.2.3. Гиперболическое уравне-		3.7. Функции чувствительности	65
ние теплопроводности в декар-		3.7.1. Полуограниченное тело ...	66
товых координатах .....	38	3.7.2. Пластина .....	66
2.3. Теплофизические характе-		3.7.3. Определение степени	
ристики материалов .....	38	коррозии .....	66
2.4. Классические решения тео-		3.7.4. Определение температу-	
рии теплопроводности .....	41	ропроводности .....	68
2.5. Информативные параметры		3.7.5. Разделение информации о	
теплового контроля .....	51	температуропроводности и ко-	
2.5.1. Амплитудные и временные		эффициенте теплоотдачи .....	70
информационные параметры .....	51	3.7.6. Манипуляции с функцией	
2.5.2. Мощностные и фазовые		температурного отклика на	
информативные параметры .....	54	передней поверхности пластины	71
2.6. Прямые и обратные задачи		3.7.7. Оценка предельной чувст-	
теплового контроля .....	55	вительности теплового метода	
2.7. Анализ классических реше-		при определении ТФХ .....	73
ний теории теплопроводности ...	58	3.8. Определение компонент	
		тензора температуропроводности	74

3.9. Нестационарный нагрев многослойных пластин .....	78	4.2. Одномерные модели ТК .....	101
3.9.1. Трехслойная неадиабатическая пластина с идеальным контактом слоев .....	79	4.2.1. Температурный сигнал в одномерной модели .....	101
3.9.2. Трехслойная адиабатическая пластина с идеальным контактом слоев .....	81	4.2.2. Одномерная модель ТК с абсолютно нетеплопроводным дефектом .....	101
3.9.3. Двухслойная адиабатическая пластина с контактными сопротивлением между слоями (нагрев прямоугольным импульсом) .....	82	4.2.3. Гармонические тепловые волны .....	105
3.9.4. Двухслойная адиабатическая пластина с контактными сопротивлением между слоями (нагрев импульсом Дирака) .....	83	4.2.4. Импульсные тепловые волны .....	111
3.10. Одномерные тепловые волны .....	83	4.2.5. Границы применимости реалистичных одномерных моделей ТК .....	117
3.10.1. Полуограниченное адиабатическое тело .....	83	4.3. Двухмерные модели ТК .....	120
3.10.2. Полуограниченное неадиабатическое тело .....	84	4.3.1. Однослойная пластина с дефектом типа "канал" (декартова система координат) .....	120
3.10.3. Неадиабатическая пластина .....	84	4.3.2. Трехслойная анизотропная неадиабатическая пластина с емкостным дефектом (цилиндрическая система координат) ....	121
3.10.4. Температурные волны на границе раздела двух сред .....	85	4.4. Простая трехмерная модель обнаружения поверхностной вертикальной трещины при нагреве полупространства движущимся тепловым источником .....	122
3.11. Связь импульсных и гармонических тепловых волн .....	86	4.5. Трехмерная адиабатическая задача ТК .....	123
3.12. Стационарная теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку и определение термического сопротивления ....	87	4.6. Обобщенная трехмерная модель ТК (трехслойная анизотропная неадиабатическая пластина с произвольными емкостными дефектами) .....	124
3.13. Оценка объема протечек воздуха по результатам температурных измерений .....	89	4.7. Условия обнаружения сигналов от внутренних дефектов ...	126
<b>Глава 4. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ....</b>	<b>91</b>	4.8. Основные функциональные зависимости температурных сигналов от параметров изделия и дефекта .....	<b>127</b>
4.1. Методы решения задач ТК ..	91	4.8.1. Изменение температурных сигналов во времени .....	127
4.1.1. Теплофизическое описание дефектов .....	91	4.8.2. Глубина залегания дефекта .....	132
4.1.2. Преобразование Лапласа и метод "термического четырехполюсника" .....	92	4.8.3. Толщина дефекта .....	133
4.1.3. Численные методы .....	95	4.8.4. Поперечные размеры и конфигурация дефекта .....	133
4.1.4. Точность численных решений .....	97	4.8.5. Протокол нагрева и его оптимизация .....	137
4.1.5. Коммерческие пакеты для численного решения задач ТК ...	98	4.8.6. Материал изделия .....	141
		4.8.7. Мощность нагрева и интенсивность поверхностного теплообмена .....	143

4.8.8. Анизотропия ТФХ .....	144	5.5. Тепловая дефектометрия в пространстве Лапласа (резистивные дефекты) .....	173
4.8.9. Температурное поле в зоне трещины, расположенной перпендикулярно передней поверхности .....	145	5.5.1. Анализ дифференциальной температурной функции на задней поверхности .....	174
4.8.10. Принудительное охлаждение объекта контроля .....	146	5.5.2. Анализ дифференциальной температурной функции на передней поверхности .....	174
4.8.11. Выявление близкорасположенных дефектов .....	148	5.5.3. Покрытие на подложке: двусторонняя процедура ТК .....	175
4.9. Оптимальные параметры обнаружения: примеры .....	150	5.6. Тепловая дефектометрия путем минимизации функционала невязки (метод нелинейной подгонки) .....	175
4.10. Развитые модели ТК .....	155	5.6.1. Использование классических решений .....	175
4.10.1. Обнаружение фторопластовых вставок в углепластике ...	155	5.6.2. Использование многомерных численных решений .....	178
4.10.2. Обнаружение мин в грунте	158	5.7. Определение поперечных размеров дефектов .....	179
<b>Глава 5. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ (ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ)</b>	166	5.7.1. Использование пространственных профилей температуры ...	179
5.1. Дефектометрия путем анализа температурного отклика на передней поверхности пластины после импульсного нагрева .....	166	5.7.2. Функция точечного источника и инверсия размеров внутренних дефектов в пространстве Фурье .....	182
5.1.1. Метод "кажущейся" тепловой инерции (нагрев импульсом Дирака) .....	166	5.7.3. Лапласиан и восстановление размытых границ .....	183
5.1.2. Использование ранних времен наблюдения .....	168	5.7.4. Использование решения трехмерной адиабатической задачи ТК .....	184
5.1.3. Восстановление профиля коррозии .....	168	5.8. Обобщенные формулы инверсии при контроле скрытой коррозии .....	184
5.1.4. Дефектометрия тонких теплопроводных образцов при импульсном нагреве .....	169	<b>Глава 6. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТЕПЛОМ КОНТРОЛЕ</b> .....	187
5.2. "Индивидуальные" функции инверсии .....	170	6.1. Метод оптимального наблюдения .....	188
5.3. Обобщенные формулы инверсии .....	170	6.2. Метод раннего наблюдения	188
5.4. Упрощенные формулы инверсии .....	171	6.3. Метод динамической тепловой томографии .....	188
5.4.1. Определение глубины залегания и теплового сопротивления дефекта, расположенного между двумя высокотеплопроводными пластинами .....	171	6.3.1. Физические принципы .....	188
5.4.2. Определение глубины залегания дефекта по моменту его оптимального проявления .....	172	6.3.2. Максиграмма, таймограмма и томограмма .....	194
5.4.3. Определение теплового сопротивления дефектов с использованием момента температуры нулевого порядка .....	173	6.3.3. Артефакты .....	194
		6.3.4. Неоднородный нагрев .....	195
		6.3.5. Влияние шумов на синтез максиграмм и таймограмм .....	196

6.4. Адаптивная тепловая томография .....	196	6.15. Электромагнитная ИК термография .....	239
6.5. Метод импульсной фазовой термографии (Фурье-анализ температурной динамики) .....	197	6.16. Вихретоковая (индукционная) ИК термография .....	240
6.5.1. Общие принципы .....	197	6.17. Элементы искусственного интеллекта в ТК (нейронные сети) .....	241
6.5.2. Количественный подход к фазовой термографии .....	200	6.18. Метод факторизации матриц (анализ главных компонент) .....	243
6.5.3. Фазовая томография .....	204	6.19. Тепловой контроль изделий сложной формы .....	246
6.6. Метод вейвлет-функций .....	205	6.20. Стандартная обработка ИК изображений .....	246
6.7. Тепловая дефектометрия .....	207	6.20.1. "Улучшение" изображений .....	247
6.8. Количественная оценка скрытой коррозии .....	208	6.20.2. Модификация полутоновой шкалы (изменение гистограммы) .....	247
6.9. ИК термография на тепловых волнах .....	208	6.20.3. Выбор цветной палитры .....	248
6.9.1. Синхронная оптическая стимуляция .....	208	6.20.4. Повышение резкости изображения .....	248
6.9.2. Синхронная ультразвуковая стимуляция (периодическая и импульсная) .....	210	6.20.5. Сглаживание .....	249
6.10. Аппроксимация и сглаживание динамических температурных функций .....	214	6.20.6. Выделение границ областей .....	249
6.10.1. Полиномиальная аппроксимация .....	214	6.20.7. Морфологическая фильтрация .....	251
6.10.2. Экспоненциальная аппроксимация (тонкие теплопроводные изделия) .....	220	6.20.8. Восстановление изображения .....	251
6.10.3. Временные производные и синтетическая обработка данных импульсного ТК (метод реконструкции термографического сигнала) .....	220	6.20.9. Вычитание и деление изображений .....	251
6.11. Нормализация динамических термограмм .....	223	<b>Глава 7. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b> .....	252
6.11.1. Нормализация на одно изображение .....	223	7.1. Краткий обзор развития ИК техники и тепловидения .....	252
6.11.2. Трехмерная нормализация .....	224	7.2. Элементы теории теплового излучения .....	259
6.12. Метод движущегося источника .....	225	7.2.1. Спектр электромагнитных колебаний и энергетические величины .....	259
6.12.1. Непрерывный нагрев .....	225	7.2.2. Законы теплового излучения .....	260
6.12.2. Фототермический метод (тепловые волны и импульсный нагрев) .....	228	7.2.3. Схема ИК термографирования .....	264
6.13. Комбинирование ТК и других методов неразрушающего контроля (синтез данных) .....	230	7.2.4. "Отраженная температура" .....	265
6.14. Тепломеханические эффекты в твердых телах .....	233	7.2.5. Проблема коэффициента излучения .....	266
6.14.1. Вибротермография и анализ термоупругих напряжений .....	233	7.2.6. Связь истинных и радиационных температур .....	273
6.14.2. Анализ разрушения материалов .....	236	7.2.7. Двухканальные тепловизоры .....	275
		7.2.8. Прохождение ИК излучения через атмосферу .....	277

<b>Глава 8. АППАРАТУРА ДЛЯ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ</b> ....	279	9.5.5. Устройства записи и твердого копирования термограмм ...	309
8.1. Системный подход к проектированию устройств активного ТК .....	279	9.5.6. Источники питания .....	310
8.2. Коммерческие системы ТК ...	279	9.5.7. Программные средства для ИК термографического анализа и составление отчетов ...	310
8.3. Источники тепловой стимуляции объектов ТК .....	283	9.5.8. Аксессуары тепловизионных комплектов .....	312
<b>Глава 9. ИНФРАКРАСНЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	290	9.5.9. Классификация тепловизоров .....	312
9.1. Системы построения изображения в ИК диапазоне .....	290	9.5.10. Коммерческие тепловизоры .....	314
9.2. Приемники оптического излучения .....	291	9.5.11. Выбор тепловизора .....	343
9.2.1. Тепловые приемники .....	292	9.6. ИК системы визуализации утечек газа .....	344
9.2.2. Фотоэмиссионные детекторы .....	292	9.7. Системы визуализации терагерцового диапазона .....	345
9.2.3. Фотонные детекторы .....	293	9.8. Линейные ИК сканеры .....	346
9.2.4. Фотоприемники на основе квантовых ловушек .....	295	9.9. Инфракрасные термометры (пирометры) .....	347
9.2.5. Матричные фотоприемники	295	9.9.1. Портативные ИК термометры .....	350
9.2.6. Параметры ИК приемников	301	9.9.2. Устанавливаемые бесконтактные датчики температуры ...	354
9.3. Оптика тепловизоров .....	302	9.10. Эталонные источники (модели АЧТ) .....	356
9.3.1. Фокусное расстояние, коэффициент увеличения, относительное отверстие и светосила оптической системы .....	303	9.11. Контактные датчики температуры .....	357
9.3.2. Мгновенный угол зрения и поле зрения .....	303	9.11.1. Термопары .....	357
9.3.3. Щелевая функция чувствительности и модуляционная передаточная функция .....	304	9.11.2. Термометры сопротивления .....	359
9.4. Пространственное и температурное разрешение тепловизоров .....	305	9.11.3. Термисторы .....	360
9.4.1. Формат и частота смены изображения .....	305	9.11.4. Интегральные датчики температуры .....	361
9.4.2. Температурное разрешение	306	9.11.5. Жидкокристаллические термоиндикаторы .....	361
9.5. Современные тепловизоры	307	9.11.6. Термоиндикаторы плавления .....	362
9.5.1. Оптическая головка (сканер) .....	307	<b>Глава 10. ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДАННЫХ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ</b> ....	363
9.5.2. Электронный блок .....	308	10.1. Информативные параметры обнаружения дефектов в тепловом контроле .....	363
9.5.3. Черно-белое и цветное представление термограмм .....	308	10.2. Статистические показатели принятия решений .....	363
9.5.4. Метрология тепловизоров и дополнительные возможности представления информации .....	309	10.3. Карта дефектов .....	370
		10.4. Распознавание образов в тепловом контроле .....	371
		10.5. Помехи в тепловом контроле .....	372



<b>Глава 11. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИК ТЕРМОГРАФИИ И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ</b> ....	378	11.5.7. Маслонаполненные вводы	434
11.1. Общие сведения .....	378	11.5.8. Конденсаторы связи и делительные .....	435
11.2. Административные, промышленные и жилые здания .....	384	11.5.9. Силовые конденсаторы ...	435
11.2.1. Общие сведения .....	384	11.5.10. Вентильные разрядники	435
11.2.2. Определение теплотерь	386	11.5.11. Ограничители перенапряжений .....	436
11.2.3. Выявление скрытых дефектов .....	389	11.5.12. Контактные соединения распределительных устройств ...	436
11.2.4. Оценка сопротивления теплопередаче .....	391	11.5.13. Высокочастотные заградители .....	437
11.2.5. Контроль за влажностью кровли крыш .....	399	11.5.14. Подвесные фарфоровые и полимерные изоляторы .....	438
11.2.6. Тепловизоры для строительной диагностики .....	399	11.5.15. Силовые кабели .....	438
11.2.7. Методические особенности термографирования строительных объектов .....	401	11.5.16. Аккумуляторные батареи	438
11.2.8. Иллюстрации .....	408	11.5.17. Комплектные экранированные токопроводы .....	438
11.3. Активный ТК произведений искусства .....	412	11.5.18. Генераторы .....	439
11.3.1. Общие сведения .....	412	11.5.19. Электродвигатели .....	441
11.3.2. Настенные фрески .....	412	11.5.20. Воздушные линии электропередач .....	441
11.3.3. Иконы на дереве .....	415	11.5.21. Электроустановки с напряжением 0,4...10 кВ .....	442
11.4. Дымовые трубы .....	417	11.6. Теплотехническое и гидротехническое оборудование .....	442
11.4.1. Общие положения .....	417	11.6.1. Паропроводы, паровые и водогрейные котлы .....	442
11.4.2. Тепловизоры для диагностики дымовых труб .....	422	11.6.2. Поверхности нагрева котельных агрегатов .....	444
11.4.3. Объект исследований .....	422	11.6.3. Пруды-охладители .....	445
11.4.4. Проведение съемки и анализ результатов (иллюстрации) ...	424	11.6.4. Тепловые сети .....	446
11.5. Электротехнические устройства .....	425	11.6.5. Вакуумное оборудование турбоустановок .....	449
11.5.1. Методические особенности ТК электрооборудования ....	427	11.7. Атомные станции .....	449
11.5.2. Силовые трансформаторы, автотрансформаторы, масляные реакторы .....	432	11.8. Авиакосмическая техника	451
11.5.3. Маслонаполненные трансформаторы тока .....	432	11.8.1. Концепция применения ТК в авиации при выполнении ремонта .....	451
11.5.4. Маслонаполненные трансформаторы напряжения .....	433	11.8.2. Обнаружение воды в сотовых панелях самолетов .....	453
11.5.5. Выключатели масляные, воздушные, вакуумные, элегазовые .....	433	11.8.3. Обнаружение воды в теплозащите космических челноков .....	455
11.5.6. Разъединители и отделители .....	434	11.8.4. Турбинные лопатки .....	456
		11.8.5. Обнаружение и оценка коррозии в авиационных конструкциях .....	460

никновения которых не превышает долей миллиметра [100]. Снижение частоты и получение тепловых изображений большого формата при поточечной схеме сканирования потребовало бы недопустимо длительного времени контроля: например, получение изображения изделия, состоящего из  $320 \times 240$  точек, при реалистичном времени анализа каждой точки 10 секунд составило бы 9 суток.

С появлением компьютерной ИК термографии стал возможным ТК достаточно больших площадей путем синхронизации полученных пиксельных отсчетов с периодической функцией нагрева при равномерном нагреве больших зон. Метод тепловых волн в ИК термографическом контроле была предложен Д. Карломаньо и П. Берарди еще в 1976 г. [101] и усовершенствован другими исследователями [102 – 106]. Метод получил название *синхронной оптической термографии* (optical lock-in thermography). Очевидно, что его наилучшие возможности реализуются при обработке данных в фазовой области. Фазограммы обычно получают с помощью преобразования Фурье, однако запатентованная Г. Буссе и др. технология контроля предусматривает выбор на одном периодическом цикле всего четырех эквидистантных термограмм  $S_{1-4}$ , после чего фазограммы и амплитуды синтезируют согласно выражениям [106]:

$$\Phi = \arctg \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2}; \quad (6.22)$$

$$M = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2}.$$

Использование отношения пиксельных амплитуд позволяет существенно снизить влияние неоднородного нагрева и поглощения 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 по различным причинам большого распространения не получила, в том числе и ввиду отсутствия явных преимуществ этого метода по сравнению с процедурой импульсного ТК. Тем не менее, лабораторные исследования ИК термографии на тепловых волнах продемонстрировали ряд ее полезных свойств, например, способность оценивать структурную целостность больших участков фюзеляжей самолетов, которые в силу непланарной геометрии подвержены влиянию неоднородного нагрева при стандартной процедуре импульсного нагрева [106] (следует отметить, что обработка сигнала во временной области приводит к тем же результатам, что и частотный анализ). Для нагрева использовали 6 ламп каждая мощностью 1 кВт, излучение которых модулировали с частотой 0,015 Гц. Расстояние между стрингерами и корпусом обнаруживали в течение 4-х минут при обследовании зоны площадью до нескольких кв. м. Данный метод обеспечил 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: чугун (2 мм) – алюминий (3 мм) [107]. 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.

В настоящее время метод тепловых волн реализован на коммерческом уровне фирмой EDEVIS (Германия).

*Raffiniert ist der Herrgott aber boshaft ist er nicht*  
(Господь Бог изощрен, но не злокознен)

**Альберт Эйнштейн**

### **Указ царя Петра I Января 11 дня 1723 года**

Повелеваю хозяина Тульской фабрики Корнила Белоглазова бить кнутами и сослать на работу в монастыри, понеже он, подлец, осмелился войску Государства продавать негодные пищали и фузеи.

Старшину альдермала Фрола Фукса бить кнутом и сослать в Азов, пусть не ставит клейма на плохие ружья.

Приказано оружейной канцелярии из Петербурга переехать в Тулу и денно и ночью блюсти исправность ружей. Пусть дьяки и подьячие смотрят, как альдермалы клейма ставят, буде сомнение возьмет, самим проверить и осмотром и стрельбою. А два ружья каждый месяц стрелять, пока не испортятся.

Буде заминка в войсках приключаться при сражении, по недогляду дьяков и подьячих, бить оных кнутьями нещадно по оголенному месту.

Хозяину – 25 кнутов и пени по червонцу за ружье.

Старшину альдермала – бить до бесчувствия.

Старшего дьяка – отдать в унтер-офицеры.

Дьяка – отдать в писари. Подьячего – лишить воскресной чарки сроком на один год.

Новому хозяину ружейной фабрики Демидову повелеваю построить дьякам и подьячим избы не хуже, чтоб хозяйской были, буде хуже, пусть Демидов не обидится, повелеваю живота лишить.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Рубеж XX-го и XXI-го веков ознаменовался существенным снижением межнациональных и межгосударственных барьеров и утверждением глобальной мировой экономики, в связи с чем проблема *унификации и обеспечения качества промышленной продукции* приобрела для экономически развитых стран особое значение. *Техническая диагностика* (ТД) и *неразрушающий контроль* (НК) качества, объединяемые термином "*инспекция качества*", будучи частью системы обеспечения качества, играют все возрастающую роль в глобальной экономике, в особенности, в тех секторах промышленности, где требуется повышенная надежность технических систем, машин и установок (военная, авиационная и космическая техника, энергетика, трубопроводный и железнодорожный транспорт).

Инспекция качества может быть определена как операция, в результате которой устанавливаются соответствие определенных характеристик объекта контроля требованиям соответствующих стандартов (нормативов). В научно-техническом аспекте ТД и НК являются динамично развивающимися областями академических исследований и практических приложений с использованием разнообразных физических эффектов взаимодействия частиц и полей с веществом.

С коммерческой точки зрения внедрение ТД и НК требует дополнительных расходов, т.е. повышает стоимость конечного продукта, поэтому всегда имеет место определенный компромисс между расходами на НК и производственными расходами. Другими словами, инспекция качества должна быть *реалистичной*: производительной, надежной и приемлемой по стоимости.

В последнее время все больше говорят о *тотальном контроле качества*, концепция которого заложена в междуна-

родной системе сертификации качества ISO (стандарт ISO 9000). Тотальный контроль качества является весьма привлекательным для объектов массового производства, таких как автомобили, бытовая электроника, персональные компьютеры и т.п. Тем не менее, в авиакосмической и военной промышленности тотальный подход к обеспечению качества остается в целом неприемлемым по причинам секретности.

Физические методы НК основаны на использовании феноменов, которые сопровождают процессы взаимодействия объектов контроля с полями корпускулярных и волновых излучений. Российский ГОСТ 18353–79 устанавливает 9 видов НК согласно используемым физическим явлениям: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. "Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02), принятые Госгортехнадзором РФ (ныне Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, или Ростехнадзор) в 2002 г., признают уже 11 методов НК: ультразвуковой (УЗ), акустико-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами (капиллярный и течеисканием), визуальный и измерительный, вибродиагностический, электрический, тепловой, оптический. При этом допускается использование и других методов диагностики и неразрушающих испытаний. В англоязычной литературе часто упоминают так называемую "большую пятерку" методов НК, куда включают радиационные, УЗ, вихретоковые и магнитопорошковые методы, а также метод проникающих жидкостей.

Цель настоящей книги – последовательное изложение основ теплового метода ТД и НК, связанного с исследованием

температурных (тепловых) полей объектов контроля. Подобно другим прикладным областям знания, 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. Все эти вопросы будут изложены в данной книге в том объеме, который, по мнению автора, необходим для получения законченного представления о современном состоянии и перспективах развития теплового контроля (ТК).

Актуальность издания настоящей книги обусловлена рядом факторов. За прошедшие два десятилетия произошли принципиальные изменения технической базы ТК. Во-первых, на рынке появились портативные неохлаждаемые измерительные тепловизоры, что существенно расширило возможности инфракрасных (ИК) съемок в задачах ТД. Во-вторых, сочетание мощных импульсных нагревателей и компьютерных термографических систем, работающих в реальном времени, позволило исследовать быстрые тепловые процессы, имеющие место, например, при испытаниях высокотеплопроводных металлов и тонких металлических/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, которые получают с помощью радиационных, УЗ и других методов НК, основанных на принципе прямолинейного распространения физических носителей информации. В-третьих, на фоне ошеломляющего прогресса компьютерной техники стало возможным разрабатывать и практически применять такие процедуры испытаний, которые требуют значительных вычислительных усилий; в частности, сюда относятся задачи *тепло-*

*вой дефектометрии*, использующие решения *обратных задач математической физики*. Наконец, вхождение стран бывшего СССР в мировую экономику позволило приблизить российские достижения 70–80-х годов прошлого века в области ТК, носившие в значительной степени теоретический (умозрительный) характер, к высоким западным технологиям и превратить тепловой метод в истинно интернациональную дисциплину. С учетом вышеуказанных факторов, очевидно, что монография автора по данной тематике, датированная 1984 г. [1], не может удовлетворить запросы нового поколения отечественных исследователей. "Справочник по тепловому и инфракрасному контролю", изданный в 2001 г. Американским обществом неразрушающего контроля (ASNT) [2] и доступный в силу языка лишь ограниченному кругу российских исследователей, написан большой группой авторов из различных стран, что обусловило неоднородную и зачастую чрезмерно упрощенную форму изложения, не говоря о неизбежной в таких случаях тавтологии. Аналогичным недостатком страдает монография, написанная другим интернациональным коллективом [3]. Среди англоязычных изданий по ТК следует выделить две монографии, опубликованные профессором Университета Лавалья (Канада) К. Малдагом [4–5], однако содержание и стиль изложения этих книг более соответствует менталитету западных специалистов, нежели российских исследователей, склонных к глубокой теоретической проработке задач НК. Недавно опубликованные в России брошюры С.А. Бажанова [6], В.П. Вавилова и А.Г. Климова [7], а также В.П. Вавилова и А.Н. Александрова [8], затрагивают лишь отдельные аспекты тепловизионной ТД, а вышедшее в 2002 г. научно-методическое пособие по ТК материалов и изделий О.Н. Будагина с соавторами отражает преимущественно научные интересы авторов и не охватывает теплофизические основы ТК, а также многие практические применения ИК термографии [9].

Материал настоящей книги основан на анализе как мировых достижений в области ТК за последние два десятилетия, так и на персональных результатах автора, многие из которых получены в процессе сотрудничества с ведущими мировыми исследователями. Используются многочисленные обзорные и оригинальные публикации автора в зарубежных изданиях, включая соответствующие главы, включенные в вышеупомянутый справочник ASNT [2]. Данное издание отражает попытку автора объединить материал справочного, т.е. устоявшегося, характера с новыми направлениями исследований в области ТК. В методологическом плане изложение материала книги следует логике, принятой автором в лекциях, читаемых на протяжении ряда лет в рамках ежегодной конференции "Thermosense" (США, г. Орландо) [10], кроме того, использован опыт чтения автором соответствующих лекций для студентов и сотрудников Томского политехнического университета. В целом материал книги существенно повторяет структуру и содержание справочника по ТК, выпущенного в 2004 г. и переизданного в 2006 г. под эгидой Российского общества НК и ТД (РОНКТД) [11] с учетом изменения некоторых акцентов и появления новых теоретических и экспериментальных результатов. Достаточно заметить, что темпы появления на рынке новых моделей тепловизоров в ряде случаев опережают темпы размещения информации о них в Интернете. Список литературы включает наиболее существенные мировые публикации, как последних лет, так и более отдаленные, но рассматриваемые автором в качестве краеугольных. Для специфических терминов, принятых в англоязычной научно-технической литературе, приводятся их английские оригиналы. Данная книга содержит два уровня представления и, соответственно, освоения основ ТК. Прикладная часть материала рассчитана на широкий круг читателей, в том числе

интересующихся практическими приложениями ИК тепловидения, включая активный ТК, техническую диагностику, воздушный ИК мониторинг, антитеррористическую деятельность и другие области. В то же время ряд глав ориентирован на исследователей с определенной математической подготовкой, поскольку описывает решения прямых и обратных задач теории теплопроводности в приложении к твердым телам, содержащим структурные неоднородности и дефекты.

Автор глубоко благодарен жене Н.М. Вавиловой, помощь которой выходила далеко за рамки семейной поддержки. Многие результаты ИК съемок, приведенные в книге, были получены в результате работ, выполненных научно-внедренческой фирмой "Инновация", директором которой она является. Неоценимый вклад в содержание книги внесли сотрудники Томского политехнического университета: В.В. Ширяев, А.И. Иванов, С.Ю. Танасейчук, М.А. Суханов, Д.А. Нестерук, а также главный инженер муниципального предприятия жилищного хозяйства г. Северска К.Д. Трофимов. Особую благодарность автор выражает А.Б. Упадышеву и В.В. Коннову (НПО "Молния"), чья поддержка в 80-е годы прошлого века помогла становлению ТК в Томском НИИ интроскопии. Многие научные результаты, вошедшие в книгу, получены в процессе международного сотрудничества автора с ведущими специалистами в области ТК: К. Малдагом (Канада), Э. Гринцато, П. Бизоном и С. Маринетти (Италия), Д. Берли, Р. Томасом и С. Фавро (США), В.А. Стороженко (Украина), Т. Кауппиненом (Финляндия), Д. Лахири (Индия), Й. Окамото и А. Камой (Япония).

Раздел по применению теплового метода в теплоэнергетике написан по материалам, любезно предоставленным сотрудниками ЗАО "ПАНАТЕСТ" М.А. Вихровым и С.В. Миловановым. Многие идеи, относящиеся к описанию тонкостей процедур ТК, обсуждались с Г. Буссе (Германия), Д. Балажа (Франция) и С. Шепардом

(США). Доброжелательная помощь сотрудников фирмы FLIR Systems Т. Тенгесдаль и А. Томаса ощущалась автором на протяжении многих лет исследований в области ИК термографии. В последние годы продвижение ИК технологий на российский рынок связано с активной деятельностью фирмы "Пергам" и ее директора А.Г. Климова, сотрудничество с которым автор с благодарностью признает. Полезными в части разработки технологии ТК и освоения ИК аппаратуры были контакты с Д.С. Петровым (фирма "ТТМ"), И.В. Фокиной и Г.В. Гусевым (фирма "ТЕККНО"). В области 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), институтом "ВЕМО" (О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова,

В.И. Сучков и Т. Троицкий-Марков) и предприятием "ОРГРЭС" (А.Н. Александров). На содержание книги оказали влияние беседы с разработчиками и потребителями ИК технологий: В.Г. Торгунаковым, В.А. Захаренко, Б.Н. Епифанцевым, П.А. Морозовым и С.П. Морозовой, К. Велесом, В.В. Рейно, В.Г. Федчишиным, А.А. Кетковичем, А.В. Ковалевым, В.А. Воробьевым и многими другими, кто оказал автору осознанную или неосознанную помощь. Наконец, приятный долг автора – отметить доброжелательное внимание к изданию литературы по ТК президента Российского общества по НК и ТД (РОНКТД) В.В. Клюева.

Замечания и предложения по книге автор примет с благодарностью (Россия, 634028, г. Томск, 28, ул. Савиных, 7, НИИ интроскопии ТПУ, E-mail: vavilov@introscopey.tpu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

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. Промышленная деятельность сопровождается необратимыми потерями тепловой энергии, поэтому очевидно, что анализ тепловых процессов (температурных полей, потерь тепла и т.п.) позволяет получать разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов в природе, энергетике, строительстве, промышленности и медицине.

Идеи ТК восходят к началу XX-го века, хотя первые попытки дистанционного обнаружения животных и человека по их тепловому излучению с помощью термпар были сделаны еще в XIX веке (см. монографию Р. Хадсона [12]). 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 (Д. Никольс, 1935). Современный анализ теплофизических характеристик (ТФХ) материалов во многом восходит к работе П. Верно, опубликованной в 1937 и посвященной анализу ТФХ человеческой кожи [13]. Начиная с 60-х годов XX-го 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 радиоэлектронных компонент (сам термин "тепловидение" произошел в результате перевода на русский язык соответствующего брэнда фирмы AGA – Thermovision). Одна из первых процедур активного ТК контроля была реализована в 1965 г. У. Бел-

лером, который предложил испытывать корпус двигателя ракеты "Поларис" путем перемещения их из холодного помещения в теплое [14]. В те же годы Д. Грин выполнил исследование по активному ТК тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных реакторов, в котором успешно решил проблему учета коэффициента излучения [15]. В целом, 60-е годы XX-го века стали периодом расширяющегося применения ИК техники в промышленности, прежде всего, при анализе стационарных тепловых полей.

К концу 1970-х годов применения ИК техники оставались скорее качественными, что не позволило ТК успешно конкурировать с другими методами НК. Новый уровень использования теплового метода стал возможным с внедрением достигнутых теорий теплопроводности, основы которой изложены в основополагающих монографиях Х. Карслоу и Д. Эгера [16] и А.В. Лыкова [17]. "Теплофизический" подход к ТК стали использовать в своих работах Д. Балажа, В.П. Вавилов и Р. Тейлор, П. Маклафлин и Х. Мирчандани, Н.А. Бекешко, Ю.А. Попов и А.Е. Карпельсон, а также другие исследователи, которые ввели понятие одно-, двух- и трехмерных моделей ТК [18 – 21]. В результате стало возможным объединить достижения в области теории теплопередачи и практической ИК технологии и создать условия для практического применения ИК термографии в НК.

При анализе технологических процессов (condition monitoring) и прогностическом обслуживании систем и установок (predictive maintenance) ИК диагностику уже в течение длительного времени рассматривают как сложившийся практический метод, экономическая эффективность которого не подлежит сомнению. В то же время при НК материалов развитие теплового метода долгое время сопровождалось поочередно сменявшимися оптимистическими и пессимистическими прогнозами. Например, стоит отметить, что еще в



1967 г. до 70 % докладов на Ежегодной конференции Американского общества НК (ASNT) было посвящено ИК методу. Однако на всемирных конференциях по НК в течение длительного времени тепловые методы были представлены ограниченным числом работ. В последние годы возросший интерес к ТК обусловлен как появлением на рынке тепловизоров нового поколения, так и уникальными возможностями компьютерной обработки ИК изображений, что позволяет реализовать на практике потенциальные преимущества ТК.

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

Ситуация в области активного ТК стала меняться в середине 90-х годов XX-го века. В эти годы произошли изменения в отношении к тепловому методу со стороны национальных обществ НК таких стран, как США, Германия, Франция, Италия, Япония. В частности, в Американском обществе НК комитет по ИК/ТК существовал в течение многих лет, однако сам метод считался экзотическим, и только последние годы ознаменовались выпуском соответствующей нормативно-методической документации [2] и началом массовой сертификации специалистов I-го, II-го и III-го уровней. Интерес к активному ТК продолжает стимулироваться необходимостью проверки большого количества ответственных узлов и изделий, используемых в авиакосмической промышленности, где широко используют так называемые "новые" и "умные" (smart) материалы. В 1993 г. Федеральная авиационная администрация (FAA) США внедрила программу оценки коррозии парка стареющих самолетов. В рамках этой программы конкурировали производители аппаратуры НК, реализующей различные физические

принципы. Результаты ИК термографических испытаний были признаны надежными и заслуживающими дальнейшего развития в части количественной оценки данных и снижения уровня ложной тревоги. Тепловой метод укрепил свои позиции в США после работы комиссии NASA (CAIB-Columbia Accident Investigation Board) по расследованию причин катастрофы корабля Columbia, произошедшей 1 февраля 2003 г. В настоящее время NASA рассматривает ТК в качестве основного метода при разработке и эксплуатации космических челноков. В результате исследований NASA на фазе орбитального полета челнока Discovery в августе 2005 г. астронавты США применили тепловизор для ТК состояния углерод-углеродных панелей с использованием естественного градиента температуры между нагреваемой Солнцем и теневой поверхностью корабля. В России в последние годы выполняются работы по применению активного метода ТК в металлургии для обнаружения дефектов проката и в авиации для выявления воды в сотовых изделиях. Имеются фрагментарные сведения об использовании ТК в программе создания российского космического челнока "Клипер" (в настоящее время заменен на проект "Русь").

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 УЗ и голографический (с этими методами тепловой объединяют ряд общих физических аспектов, а в ряде случаев – общие элементы аппаратурной базы). В настоящее время целесообразность ИК термографической диагностики материалов признана в строительстве, электро-, тепловой и ядерной энергетике, авиакосмической промышленности. Пограничными к тепловому НК и ТД областями применения являются обеспечение общественной безопасности, скрытное наблюдение и разведка (ночное видение), а также антитеррористическая деятельность.

# Глава 1

## ТЕРМИНОЛОГИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

### 1.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

В последние годы, с расширением пограничных исследований и компьютерного анализа, появилось большое количество новых терминов, относящихся к ТК и приведенных в табл. 1.1 вместе с их англо-

язычными аналогами. Следует заметить, что большинство новых терминов относится главным образом к алгоритмам обработки данных, а в части разработки новых физических процедур ТК наблюдается значительная тавтология, обусловленная персональными предпочтениями отдельных исследователей.

#### 1.1. Терминология теплового контроля

Термин	Описание
<i>Общие термины</i>	
Стационарный режим (steady-state, stationary)	Температура не изменяется во времени
Нестационарный, динамический режим (transient, dynamic)	Температура изменяется во времени
Дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа (differential parabolic equation of heat conduction)	$a\nabla^2 T = \partial T / \partial \tau$ ; $a$ – коэффициент температуропроводности
Дифференциальное уравнение теплопроводности гиперболического типа (differential hyperbolic equation of heat conduction)	$a\nabla^2 T = (\partial T / \partial \tau) + \tau_r (\partial^2 T / \partial \tau^2)$ ; $\tau_r$ – время релаксации
Термография (thermography)	Анализ пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся, как правило, построением тепловых изображений ( <i>Термограмм</i> )
ИК термография (infrared thermography)	Термография, осуществляемая путем анализа теплового излучения объектов
Тепловидение	См. <i>Инфракрасная термография</i>
Визуализация фононного излучения (phonon imaging)	Визуализация баллистических фононов, распространяющихся в чистых кристаллах при низких температурах (см. <i>Дифференциальное уравнение гиперболического типа</i> )

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Тепловой НК (thermal NDT)	Контроль материалов путем анализа тепловых потоков (температурных полей); в отличие от технической диагностики, этот термин относится к тем случаям, когда температура объекта контроля перед испытанием равна температуре окружающей среды, поэтому необходима тепловая стимуляция объекта
Инфракрасный НК (infrared NDT)	Контроль материалов путем анализа их ИК (теплового) излучения; как правило, этот термин идентичен <i>Тепловому НК</i>
Термографический НК (thermographic NDT)	Контроль материалов с применением термографии (тепловидения); как правило, этот термин идентичен <i>Тепловому НК</i>
Активный ТК (stimulated, forced, active, transient)	Контроль материалов с использованием дополнительного источника тепловой стимуляции
Пассивный ТК (passive)	Контроль при отсутствии дополнительного источника тепловой стимуляции
Тепловой НК "на отражение", односторонний ТК (reflection mode, front-surface or one-sided test)	Контроль, при котором тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на одной и той же поверхности образца
Тепловой контроль "на просвет", двухсторонний ТК (transmission mode, rear surface or two-sided test)	Контроль, при котором тепловую стимуляцию и регистрацию температуры осуществляют на противоположных поверхностях изделия
Прямая задача ТК (direct problem)	Для известной конфигурации объекта и дефектов (известных теплофизических характеристик (ТФХ)) рассчитывают изменения температуры во времени и в пространстве
Обратная задача ТК (inverse problem)	По экспериментально регистрируемым изменениям температуры во времени и пространстве определяют конфигурацию и/или ТФХ объекта контроля и дефектов
Тепловизионная квалиметрия	Тепловизионное обследование объектов с целью количественной оценки параметров и характеристик, определяющих качество
Дефектометрия (defect characterization, identification)	Определение параметров дефекта по экспериментальным данным с использованием алгоритмов решения <i>Обратных задач</i>
Планарный дефект (planar defect)	Дефект расположенный параллельно стимулируемой плоскости и создающий максимальное тепловое сопротивление основному тепловому потоку

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Функция точечного распределения (point-spread function)	Распределение (поверхностной) температуры для точечного заглубленного дефекта
Тепловой пакет (heat packet)	Пакет ("сгусток") тепловой энергии, распространяющийся в объекте
<i>Процедуры ТК</i>	
Анализ в пространственной области (space-domain analysis)	Анализ амплитудных распределений ("мощности" сигнала)
Анализ во временной области (time-domain analysis)	Анализ изменения сигналов во времени
Анализ в частотной области (frequency-domain analysis)	Анализ частотного спектра температурных сигналов
Фотоакустический метод (photoacoustic method)	Разновидность УЗ метода НК, при котором акустические сигналы возбуждаются с помощью оптического излучения (может рассматриваться как комбинация УЗ и ТК)
Фототермический (фототепловой) метод (photothermal, optothermal method)	Контроль, при котором тепловую стимуляцию объекта производят с помощью оптического излучения (как правило, возбуждают тепловую волну в локальной зоне малого размера и производят сканирование объекта по точкам)
Радиотепловой метод (радиотермометрия)	Измерение теплового излучения из глубинных слоев изделия по его СВЧ излучению в диапазоне длин волн 1...150 мм. (применяют в медицине для измерения температуры внутри человеческого организма)
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 контроля стимулируют с помощью теплового импульса
Импульсный метод (flash technique)	Контроль, при котором длительность тепловой стимуляции существенно меньше характерного времени наблюдения; как правило, нагрев производят с помощью импульсного лазера или импульсной лампы (см. <i>Импульсный ТК</i> )

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Метод тепловых волн (thermal wave technique)	Контроль, при котором тепловую стимуляцию объекта производят путем периодического (гармонического) нагрева, в результате чего в объекте возникают тепловые волны; температуру регистрируют в квазистационарном режиме
Фототермическая ИК термография (photothermal infrared thermography)	Разновидность фототермического контроля, при котором нагревают значительный участок объекта контроля, а вместо ИК радиометра используют тепловизор (см. <i>Фототермический метод</i> )
Эхо-импульсный метод тепловых волн (pulse-echo thermal wave approach)	Концепция ТК, в которой 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 (устаревший термин)
Импульсная видеотермография (pulsed video thermography)	Видеотермография при равномерном импульсном нагреве больших зон (устаревший термин)
Дифференциальная термография (differential thermography)	Термография, при которой выделяют динамические компоненты в термограмме, как правило, путем вычитания эталонного изображения
Термография при вынужденной диффузии тепла (forced diffusion thermography)	Метод термографии, при котором поток излучения от распределенного нагревателя проектируют на объект контроля через щелевую маску; объект контроля перемещают в поле зрения тепловизора
Синхронная ИК термография (lock-in IR thermography)	Термография, при которой объект стимулируют тепловыми волнами сравнительно низкой частоты при синхронной регистрации термограмм с выделением фазовых характеристик
Импульсная фазовая термография (pulsed phase thermography)	Термография, при которой термограммы обрабатывают в частотной области с построением " <i>Фазограмм</i> " (преимущественно с использованием преобразования Фурье)
Синхронная УЗ термография (ultrasonic lock-in thermography)	Термография, при которой объект контроля стимулируют упругими периодическими УЗ волнами

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Импульсная УЗ термография, термозвуковой метод (ultrasonic burst excitation, sonic IR imaging, thermosonic method)	Термография, при которой объект контроля стимулируют импульсными УЗ волнами
Вибротермография (vibrothermography)	Термография с применением механической (вибрационной) стимуляции объекта
Индукционная (вихретоковая) ИК термография, вихретокопловой метод (induction, eddy-current)	Метод активного ТК, использующий нагрев металлов токами относительно высокой частоты (~ 100 кГц)
Электромагнитная ИК термография (electromagnetic IR thermography)	На тонкой ("фототепловой") мишени, расположенной вблизи объекта контроля, происходит наложение прямого и отраженного от изделия СВЧ излучения, а тепловизор является средством регистрации температурного поля мишени
Теплоголография	Совместная регистрация термограмм и голографических интерферограмм изделия при нагреве (за рубежом: комбинирование ТК и "ширографии" (shearography"))
Метод вейвлет (волновых)-функций (wavelet-analysis)	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 фазовой термографии</i> (подчеркивается, что 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>

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Синтетическая обработка сигнала (synthetic processing)	Метод запатентован фирмой Thermal Wave Imaging (США). Разработан для одностороннего импульсного ТК и включает: 1) полиномиальную аппроксимацию экспериментальных данных в логарифмических осях; 2) восстановление последовательности термограмм; 3) анализ первой и второй производной от температуры по времени
Реконструкция термографического сигнала (thermographic signal reconstruction – TSR)	Метод запатентован фирмой Thermal Wave Imaging (США) и является одним из вариантов <i>Синтетической обработки сигнала</i>
Адаптивная тепловая томография (adaptive thermal tomography)	Послойное (томографическое) представление структуры объекта путем пошагового сближения экспериментальных и теоретических данных
Техника "летающего пятна" ("flying spot" technique)	ТК путем сканирования объекта тепловым стимулирующим пучком при синхронной регистрации температуры в локальной зоне на фиксированном расстоянии от точки нагрева (скорость сканирования относительно высока)
Техника "ползущего пятна" ("crawling-spot" technique)	См. <i>Техника "летающего пятна"</i> (скорость сканирования относительно низка)
Метод термоупругих испытаний (thermoelastic inspection)	Обнаружение скрытых дефектов путем возбуждения 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 текущего 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 изменения сигнала во времени (см. <i>Метод синхронной регистрации</i> )
Двухканальная термография (dual-band IR imaging)	В ТК: 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> )

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
<i>Параметры</i>	
Информативный параметр (significant parameter)	Параметр, используемый для принятия решения о качестве изделия (см. <i>Анализ в пространственной, временной, частотной области</i> )
Температурный сигнал, дифференциальный температурный сигнал (differential 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)
Нормализованный температурный контраст (normalized temperature contrast)	$C^{(n)}(x, y, \tau) = \frac{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T^{(n)}(x, y, \tau^{(n)}) - T_a(x, y)} - \frac{T_{ref}(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T_{ref}^{(n)}(x, y, \tau^{(n)}) - T_a(x, y)}$ ; $T^{(n)}(x, y, \tau^{(n)})$ – температура текущей точки в момент времени $\tau^{(n)}$ , принятая в качестве нормализующего значения (при импульсном ТК момент времени $\tau^{(n)}$ соответствует концу нагрева $\tau_h$ )
Контраст трехмерной фильтрации (3D filtering contrast)	$C^{3D}(x, y, \tau) = \frac{T^{exp}(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)}$ ; $T^{exp}(x, y, \tau)$ – экспериментальная температурная функция; $T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)$ – теоретическая температурная функция, определенная для бездефектного изделия (температуры определены как избыточные относительно начальной температуры)
Дифференцированный контраст (differentiated contrast)	$C^{dif}(x, y, \tau^{(n)}) = T(x, y, \tau) - \sqrt{\frac{\tau^{(n)}}{\tau}} T(x, y, \tau^{(n)})$ ; $\tau^{(n)}$ – момент времени, относительно которого производят нормализацию (термин введен на основе классического решения для адиабатического нагрева полупространства)



Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
Характерное время теплопередачи (heat transit time)	Характерный момент $\tau^*$ во временном развитии температуры, используемый для обнаружения дефекта и дефектометрии (является временным информативным параметром)
Оптимальное время наблюдения (optimum observation time, thermal dwell time)	Момент времени $\tau_m$ , 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 короче оптимального времени наблюдения $\tau_m$ )

## Представление данных

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 (дефектов) в пределах выделенного по глубине слоя
Изображение термоупругих напряжений (thermoelastic stress image)	Распределение термоупругих напряжений, построенное на основе анализа 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
Амплиграмма, модулограмма (ampligram, modulegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение модуля Фурье-образа на определенной частоте

Продолжение табл. 1.1

Термин	Описание
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. ПАССИВНЫЙ И АКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

Различают *пассивный* и *активный*, а также *стационарный* и *нестационарный* (*динамический*) способы (режимы) ТК. При пассивном ТК объект испытаний характеризуется температурным полем, сформировавшимся в процессе его функционирования, в то время как активный способ предусматривает использование *дополнительного источника тепловой стимуляции (нагрузки)* объекта. Соответственно, вводят понятия *активных* и *пассивных* дефектов. Активные дефекты выделяют или поглощают тепловую энергию и поэтому их можно диагностировать (идентифицировать) в пассивном режиме. Дефекты материалов, имеющих перед началом испытаний однородную температуру, как правило, равную температуре окружающей среды, являются пассивными, поскольку они не создают "полезных" температурных сигналов и требуют нагревать или охлаждать весь объект контроля или его часть. Понятие стационарности связано с характером зависимости температуры от времени. Активные дефекты в пассивных процедурах ТК, как

правило, являются стационарными, в то время как пассивные дефекты в активных процедурах создают динамические температурные поля, и результаты испытаний существенно зависят от времени наблюдения. Данная особенность активного ТК является принципиальной, поскольку, в отличие от технической диагностики машин и установок, тепловой НК материалов требует специфических способов нагрева и обработки данных. Динамический характер активного ТК проиллюстрирован на рис. 1.1 графиком изменения разницы температур  $\Delta T$  между дефектным и бездефектным участком теплозащитного покрытия турбинной лопатки при импульсном нагреве. Максимальное значение  $\Delta T = 3,03$  °C над расслоением достигается через 65 мс после начала нагрева, длившегося 10 мс. Через 2 с сигнал от дефекта спадает до 0,0039 °C, т.е. уменьшается в 780 (!) раз по сравнению с максимальным значением, за счет диффузии тепла.

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

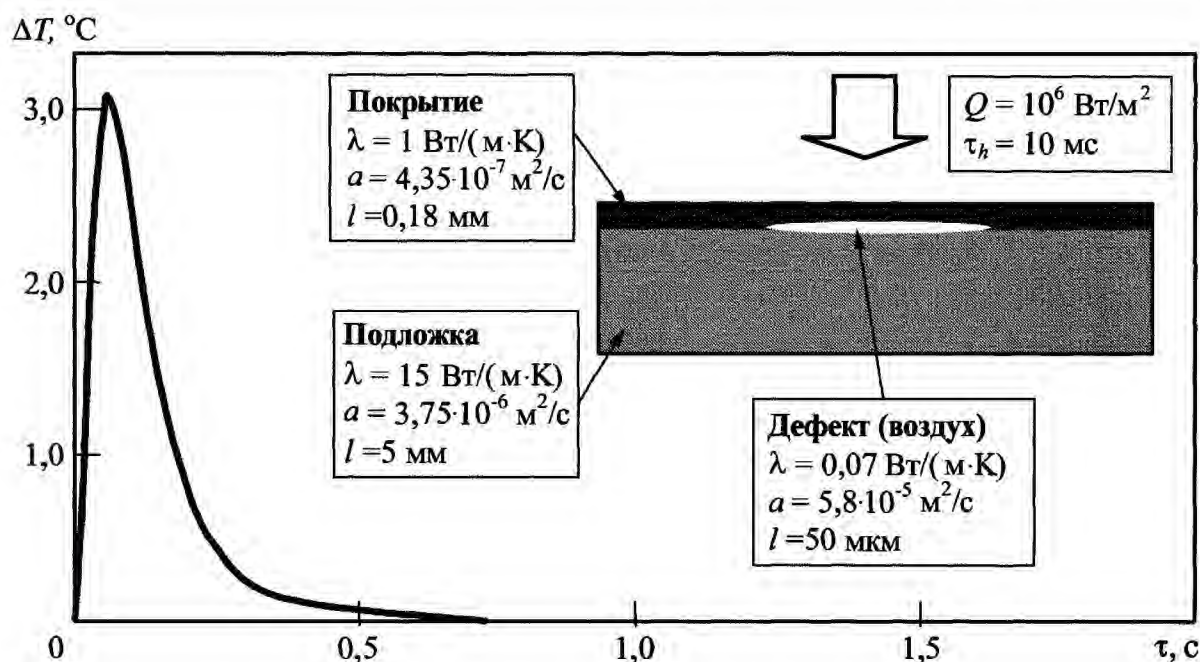


Рис. 1.1. Динамический характер температурного сигнала при выявлении расслоения между теплозащитным покрытием и подложкой турбинной лопатки

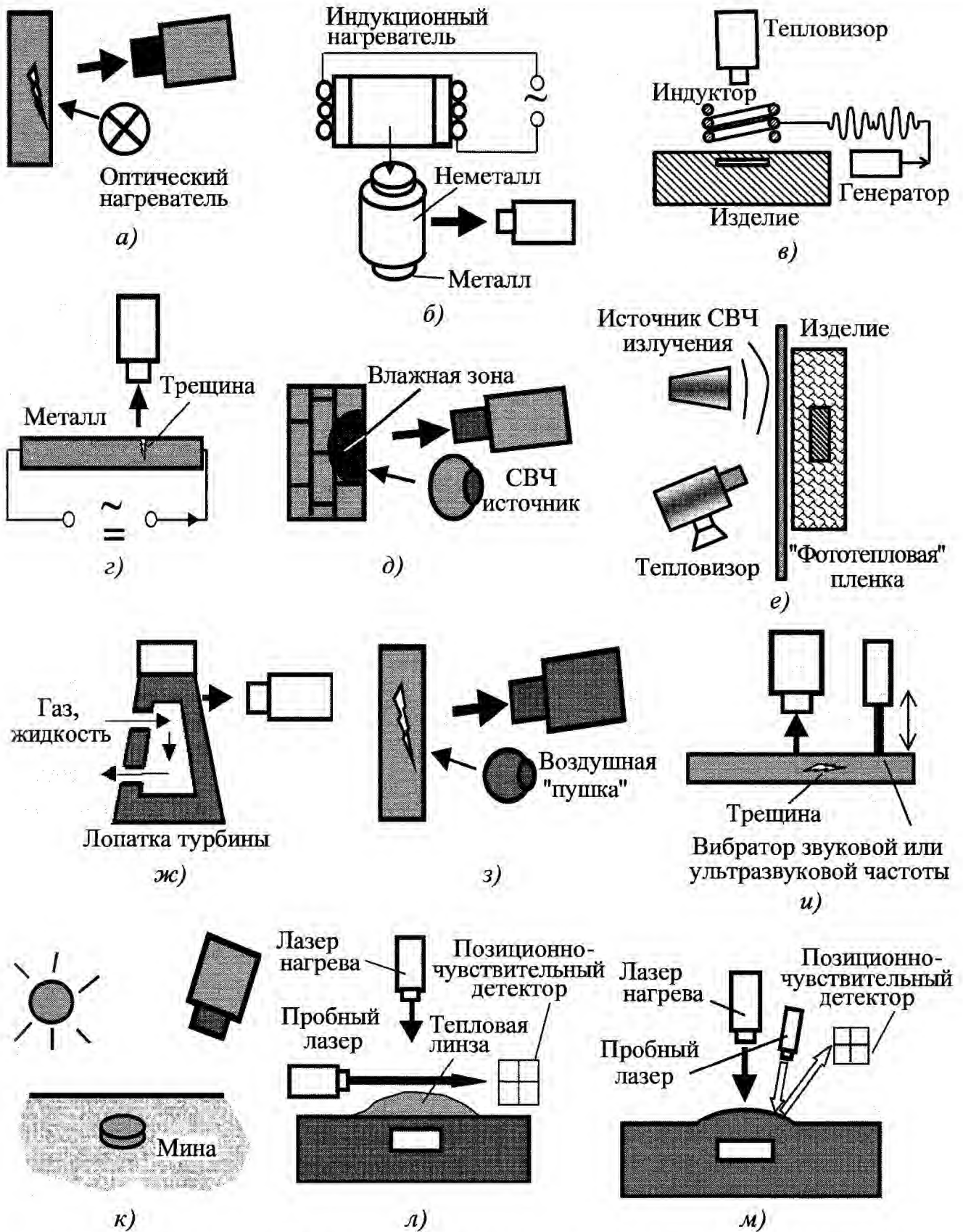
Модели активного ТК можно классифицировать:

- 1) по типу источника тепловой стимуляции (рис. 1.2);
- 2) по взаимному расположению устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры (рис. 1.3);
- 3) по форме и размерам зоны тепловой стимуляции и регистрации температуры (рис. 1.4).

Тепловую стимуляцию объекта контроля можно производить путем нагрева или охлаждения, что с теплофизической точки зрения является равноценным при одинаковой мощности соответствующих тепловых потоков. Однако, учитывая достижимые плотности тепловых потоков, а также фактор технологичности и возможные помехи, практически всегда применяют нагрев в полях излучения или потоках газа и твердых частиц. Наибольшую плотность мощности в зоне стимуляции обеспечивает нагрев оптическим излучением, генерируемым лампами различного типа и лазерами (рис. 1.2, а). Наиболее просто поверхность объекта контроля можно нагреть с помощью электрических ламп накаливания. Достижимая плотность нагрева может составлять до нескольких

кВт/м<sup>2</sup> в зоне диаметром до 1 м при легко регулируемой длительности нагрева. Такие лампы являются гибким и практичным средством "мягкого" нагрева неметаллов. Для стимуляции металлов применяют галогенные (постоянного действия) и ксеноновые (импульсные) лампы, которые создают плотность энергии до 100 кДж/м<sup>2</sup> за время от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

Лазеры способны обеспечить практически любую плотность энергии, однако низкий КПД, большие габариты и высокая стоимость ограничивают их применение в ТК лабораторными исследованиями (в свою очередь, тепловизоры применяют для анализа пространственного распределения энергии в лазерных пучках большой мощности, в частности, используемых при разработке лазерного оружия и устройств резки материалов). Лазеры также используют для локального нагрева изделий быстросканирующим лазерным пучком в так называемой технике "летающего пятна", однако при этом снижается средняя плотность поглощенной энергии; поэтому при контроле металлов наиболее эффективны мощные ксеноновые лампы-вспышки (flash tubes), используемые в



**Рис. 1.2. Процедуры ТК в зависимости от типа источника тепловой стимуляции:**  
*а* – нагрев оптическим излучением; *б* – нагрев вихревыми токами низкой частоты;  
*в* – нагрев вихревыми токами высокой частоты; *г* – нагрев электрическим током;  
*д* – нагрев излучением СВЧ диапазона; *е* – электромагнитная ИК термография;  
*ж* – внутренний нагрев газом или жидкостью; *з* – внешний нагрев воздухом;  
*и* – вибрационный нагрев; *к* – нагрев естественными источниками (Солнцем);  
*л* – техника "миража"; *м* – техника определения "фотодеформаций"

фотографической павильонной съемке. Приемлемые результаты дает линейчатый нагрев сфокусированным лазерным лучом, что в комбинации со строчно-сканирующим ИК радиометром позволяет создавать портативные устройства ТК.

Электропроводные изделия можно нагревать с помощью вихревых токов, возбуждаемых индукторами. В отечественной литературе такой метод ТК назван *вихретоко-тепловым*. Плотность поглощенной мощности при этом ниже, чем в случае оптического нагрева, однако, индукционный нагрев не создает помех за счет отраженного излучения и позволяет нагревать металлы через внешние немагнитные слои (рис. 1.2, б). Разновидность этого метода называется *индукционной (вихретоковой) ИК термографией* (рис. 1.2, в) и предусматривает использование токов относительно высокой частоты (*от сотен кГц до десятков МГц*). Кроме того, вихретоковые датчики могут также использоваться в качестве устройств регистрации температуры.

В ряде случаев возможен нагрев металлов за счет пропускания через них электрического тока (рис. 1.2, г). Этот способ также не создает оптической помехи и эффективен при обнаружении трещин, расположенных перпендикулярно направлению тока, однако при его применении трудно обеспечить хороший электрический контакт при вводе в изделие мощных токов. Явление нагрева дефектов электрическим током используется при пассивной тепловизионной диагностике контактных соединений в электро-распределительных системах.

Нагрев СВЧ излучением рекомендуется при обнаружении зон повышенной влажности в пористых неметаллах (рис. 1.2, д) в сочетании с тепловизионной регистрацией температуры. Другой вариант сочетания СВЧ нагревателя и тепловизора показан на рис. 1.2, е. Метод *электромагнитной ИК термографии* состоит в том, что на специальной тонкой ("фототепловой") мишени, расположенной вблизи объекта контроля,

происходит наложение прямого и отраженного от изделия СВЧ излучения, а тепловизор является средством регистрации температурного поля мишени.

Конвекционный нагрев можно производить с помощью жидкости или газа (рис. 1.2, ж, з). В частности, описан способ контроля внутренних полостей турбинных лопаток путем дозированного пропускания через них горячей (холодной) воды (рис. 1.2, ж). Односторонний нагрев возможен с помощью потока горячего воздуха (рис. 1.2, з), направляемого на изделие с помощью фена ("воздушной пушки"). Оригинальной разновидностью этого способа является быстрое охлаждение поверхности объекта контроля с помощью паров жидкого азота. Нагрев газом в односторонней процедуре ТК во многих случаях не хуже оптического нагрева благодаря низкому уровню помехи, возникающей под действием отраженного излучения.

Преимуществом механической стимуляции 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 эффектах (рис. 1.2, и). Этот способ хорошо зарекомендовал себя при испытаниях углепластиковых изделий, возбуждаемых пьезоэлектрическими и магнитострикционными вибраторами.

Способы тепловой стимуляции, изображенные на рис. 1.2, а – и, 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 естественный нагрев объекта солнечным излучением, плотность мощности которого в средних широтах достигает  $1 \text{ кВт/м}^2$  в безоблачный день (рис. 1.2, к). В принципе, дан-

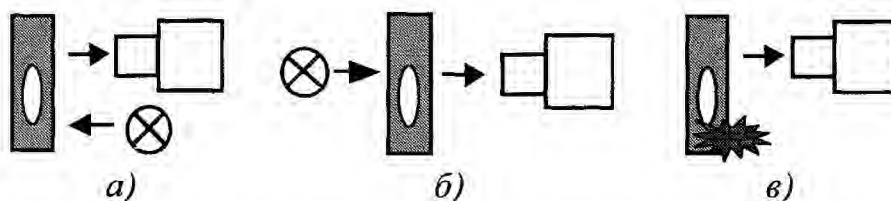
ный способ нагрева идентичен изображенному на рис. 1.2, *а*.

В лабораторных исследованиях иногда используют специфические способы тепловой стимуляции и регистрации температуры. Высоким температурным разрешением обладает техника "миража", которая предусматривает как нагрев, так и регистрацию температуры с помощью лазера (рис. 1.2, *л*). Над дефектом создается область повышенной температуры прилегающего воздуха, при прохождении через которую пробный луч лазера претерпевает отклонения, пропорциональные температуре воздуха и регистрируемые позиционно-чувствительным фотодетектором. Другой пример комбинирования техник НК показан на рис. 1.2, *м*: при нагреве лазером слои материала, расположенные над дефектом, испытывают аномальные деформации, которые фиксируют с помощью луча второго (пробного) лазера и позиционно-чувствительного фотодетектора.

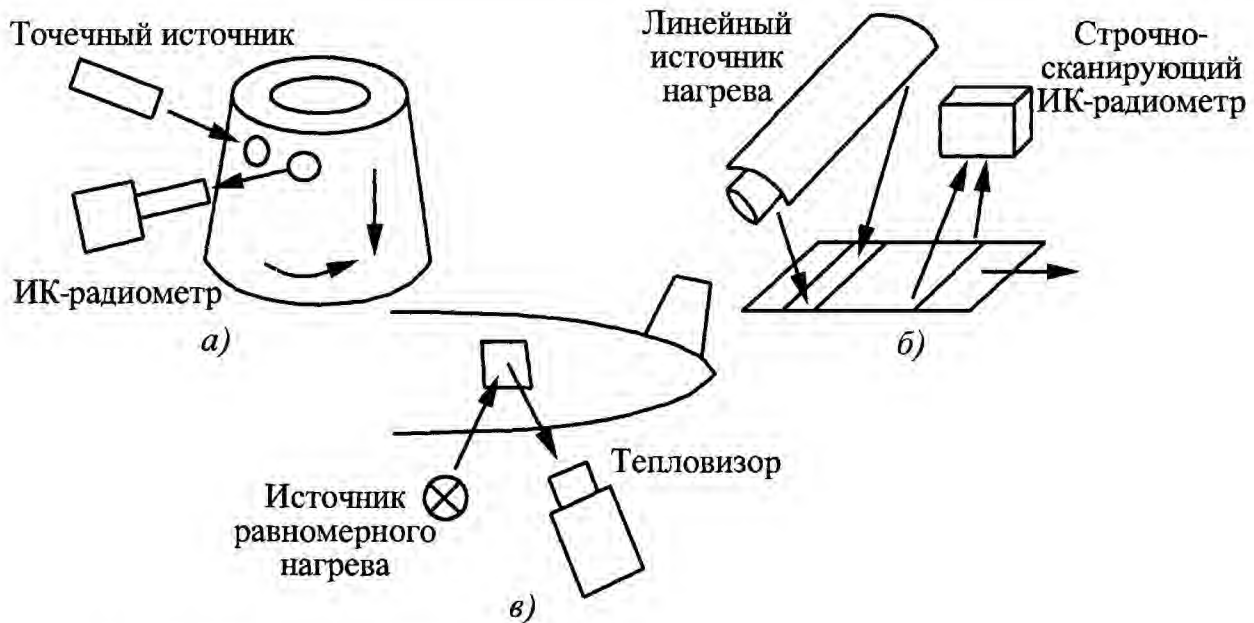
Взаимное расположение источника тепловой стимуляции и устройства регистрации температуры влияет на выявляемость дефектов и важно с точки зрения практической реализации. Преимущества активного ТК наиболее полно проявляются в *односторонней* процедуре (рис. 1.3, *а*). Поскольку ее аналогом является УЗ эхо-метод НК, в англоязычной литературе иногда используют термин "контроль на отражение" (reflection procedure). Двухсторонняя процедура, иногда называемая "контролем на прохождение" (transmission procedure), требует прогрева всего изделия и не может быть применена к

"толстым" образцам (рис. 1.3, *б*). В случае внутреннего нагрева, например, путем пропускания электрического тока через металл, устройство регистрации температуры целесообразно размещать там, где внутренние дефекты создают максимальные температурные контрасты (рис. 1.3, *в*). В медицине аналогом такой схемы контроля является метод *радиотермометрии*, сущность которого состоит в регистрации температуры внутри человеческого организма по тепловому излучению СВЧ диапазона, причем датчик излучения располагается на поверхности тела человека или вблизи нее.

Третий тип классификации моделей активного ТК, представленный на рис. 1.4, 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. 1.4, *а*). На раннем этапе развития активного ТК, по причине малого распространения тепловизоров, этот способ разрабатывался весьма интенсивно. В последние годы он был незаслуженно забыт и затем снова возрожден в виде техники "летающего (ползущего) пятна". Способ поточечного сканирования обеспечивает максимальные температурные контрасты над внутренними дефектами, если речь идет о внешнем нагреве, и пригоден для обнаружения трещин, расположенных перпендикулярно поверхности изделия. Основным недостатком данного способа является низкая производительность испытаний. Компромиссным вариантом между



**Рис. 1.3. Процедуры ТК в зависимости от взаимного расположения устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры:**  
*а* – односторонняя процедура; *б* – двухсторонняя процедура;  
*в* – стимуляция внутренними источниками



**Рис. 1.4. Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева:**  
 а – поточечное сканирование; б – строчное сканирование; в – тепловизионный способ

поточечным сканированием и тепловизионным способом ТК является строчное сканирование: изделие нагревают в узкой длинной полосе, а температуру регистрируют с помощью строчно-сканирующего пирометра (рис. 1.4, б). Проблема равномерности нагрева здесь решается проще, чем при распределенном нагреве, а производительность испытаний выше, чем при поточечном сканировании приблизительно в  $N$  раз, где  $N$  – число элементов на строке сканирования. Ввиду того, что и в этом случае зона нагрева перемещается по поверхности изделия, строчное сканирование пригодно для обнаружения вертикальных трещин. Тепловизионный способ ТК предусматривает распределенный нагрев изделия от одной зоны к другой при регистрации температуры с помощью тепловизора (рис. 1.4, в). В последние годы этот способ является наиболее популярным благодаря появлению на рынке нового поколения тепловизоров, использованию мощных импульсных нагревателей и разработке эффективных алгоритмов обработки тепловых изображений. В рамках этого способа также возможно возбуждение "поперечных" тепловых потоков путем использования соответствующих масок нагрева.

Нагреватели различного типа более подробно описаны в Главе 8.

### 1.3. БАЗОВЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ

В этом параграфе мы рассмотрим наиболее популярные процедуры активного ТК, которые объединяют описанные выше модели (см. также табл. 1.1). Как уже отмечалось ранее, видимое разнообразие процедур активного ТК в значительной степени является субъективным, т.е. связанным скорее с терминологическими предпочтениями отдельных исследовательских групп, нежели с физикой контроля. Многие существующие процедуры могут быть классифицированы как разновидности *импульсного ТК* (pulsed thermal NDT), который предусматривает нагрев изделия импульсом тепловой энергии и регистрацию температуры на передней, задней или боковой поверхности изделия в течение действия импульса, т.е. на стадии нагрева, или после его окончания, т.е. на стадии охлаждения. Другой распространенной разновидностью активного ТК является метод *тепловых волн* (фототермический), при котором нагрев осуществляют гармонически изменяющимся тепловым потоком. При таком определении активного ТК большинство процедур, описанных в табл. 1.1, связано

либо с физической реализацией нагрева, либо с особенностями обработки температурной информации, причем процедуры ТК различаются по тому, как информация о скрытых дефектах извлекается из базовой температурной функции  $T(x, y, \tau)$ , описывающей изменение избыточной температуры объекта контроля во времени для каждой точки поверхности изделия  $(x, y)$  (эту температуру отсчитывают от начальной температуры объекта, которая в случае активного ТК, как правило, равна температуре окружающей среды). В процедурах тепловизионного ТК эта функция определена для последовательности зарегистрированных термограмм (рис. 1.5, а) и привязана к пикселям изображения  $i$  и  $j$ :  $T(i, j, \tau)$ . Следует заметить, что в ряде случаев (в полупрозрачных материалах) удается регистрировать температуру внутри твердого тела, например, с помощью метода радиотермометрии (измерение температуры по оптическому излучению СВЧ диапазона).

Типичный вид функций  $T(i, j, \tau)$  показан на рис. 1.5, б для дефектной ( $d$ ) и бездефектной ( $nd$ ) области. На передней

поверхности в ходе нагрева избыточная температура изделия  $T$  растет от нулевого значения и достигает максимума в конце теплового импульса длительностью  $\tau_h$ . На задней поверхности максимум избыточной температуры сдвигается относительно конца нагрева. Величина этого сдвига зависит от толщины изделия и его теплопроводности. На стадии охлаждения, вследствие теплообмена с окружающей средой, избыточная температура изделия спадает до нуля, т.е. до температуры среды, часто принимаемой за точку отсчета.

Фундаментальным понятием ТК является дифференциальный температурный сигнал, определяемый как разность температур в исследуемой точке и в зоне, принятой за бездефектную:  $\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{nd}(x, y, \tau)$  (в англоязычной литературе для обозначения  $\Delta T$  часто используют некорректный термин "температурный контраст"). При таком определении  $\Delta T > 0$  на нагреваемой (передней) поверхности изделия с дефектами, теплопроводность которых ниже, чем теплопроводность основного материала; на

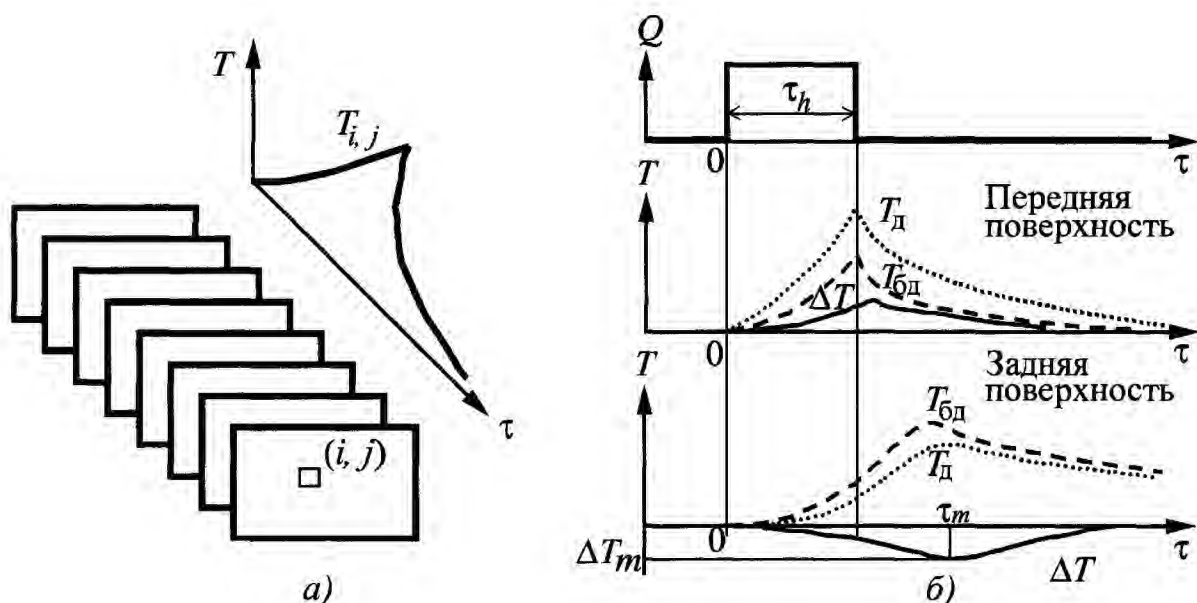


Рис. 1.5. Базовые температурные функции активного теплового контроля:  
 а – формирование последовательности термограмм и функции  $T(i, j, \tau)$ ;  
 б – импульс нагрева и формирование температурного сигнала  $\Delta T$



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. В ряде случаев, вследствие различных теплоемкостей дефектной и бездефектной зон, на стадии охлаждения возможна инверсия знака  $\Delta T$ , однако амплитуда соответствующих сигналов обычно мала для их уверенной регистрации.

В процессе динамического нагрева/охлаждения температурный сигнал от внутреннего дефекта достигает максимального значения  $\Delta T_m$  в момент времени  $\tau_m$  (см. рис. 1.1). С использованием функций  $T(x, y, \tau)$  и  $\Delta T(x, y, \tau)$  ниже идентифицированы некоторые популярные процедуры активного ТК (см. табл. 1.1). Более подробно эти процедуры будут описаны в Главе 6.

Известно, что статистическая достоверность НК тем лучше, чем выше отношение *сигнал/шум*. В динамических испытаниях этому соответствует *оптимальный момент* наблюдения (optimum observation time). В первом приближении будем считать, что  $\tau_m(\Delta T_m)$  и есть оптимальный момент наблюдения, хотя далее мы покажем, что максимум отношения *сигнал/шум* не всегда соответствует максимальному сигналу  $\Delta T_m$ . Из вышеприведенного рассуждения следует, что вместо записи последовательности термограмм можно фиксировать одну термограмму в момент  $\tau_m$ , к чему и сводится большинство процедур активного ТК. При этом нагрев можно осуществлять коротким импульсом (flash, pulse) 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*" (Time-Resolved Infrared Radiometry, TRIR). На первый взгляд парадоксальной является техника так называемого "*раннего обнаружения сигнала*" (early detection), согласно которой температурный сигнал регистрируют на ранних стадиях теплового процесса, т.е. при  $\tau < \tau_m$ . Очевидно, что при этом отношение *сигнал/шум* невелико, и, следовательно, возможно обнаружение лишь сравнительно больших дефектов. Преимуществом метода раннего обнаружения является низкий уровень диффузии тепла в поперечных направлениях, в результате чего обеспечивается весьма высокое качество воспроизведения границ скрытых дефектов, близкое к тому, что имеет место в УЗ НК. Иногда используют *усреднение N* термограмм в течение периода времени, центрированного относительно  $\tau_m$ , в результате чего случайные шумы снижаются в  $\sqrt{N}$  раз (averaging technique).

В последние годы обработку сигналов в амплитудной области (amplitude domain) заменяют или дополняют обработкой во временной, частотной и фазовой областях (time, frequency and phase domain), чем достигаются более высокие значения отношения *сигнал/шум*. Примерами такого подхода являются метод *динамической тепловой томографии* (dynamic thermal tomography), основанный на использовании пары параметров  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$ , а также методы *импульсной фазовой термографии* (pulse phase thermography) с использованием *преобразования Фурье* (Fourier transform) или *вейвлет-функций* (wavelet functions). В коммерческой аппаратуре ТК фирмы Thermal Wave Imaging (США) применена так называемая *синтетическая обработка сигнала* (synthetic signal processing), суть которой сводится к полиномиальной аппроксимации, логарифмическому представлению функции  $T(x, y, \tau)$  и анализу производных.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В БЕЗДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ

2.1. МЕХАНИЗМЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

2.1.1. Теплопроводность, конвекция и излучение

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* (преимущественно, в газообразных средах и вакууме). Плотность теплового потока  $Q$  в твердом теле между точками с различной температурой  $T_1$  и  $T_2$  подчиняется *закону Фурье*:

$Q = -\lambda (T_2 - T_1) / \Delta x$  (в интегральном выражении);

$Q = -\lambda (\partial T / \partial x)$  (в дифференциальном выражении). (2.1)

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

Конвекция означает перемешивание теплых и холодных слоев газа или жидко-

сти. Охлаждение (или нагрев) поверхности тела газом или жидкостью описывается *законом Ньютона*:

$$Q = \alpha_{cv} (T_s - T_a), \quad (2.2)$$

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

Определение  $\alpha_{cv}$  не является столь строгим как в случае  $\lambda$ , так как этот параметр описывает не столько материал, сколько взаимодействие двух разнородных сред, и зависит от их геометрии.

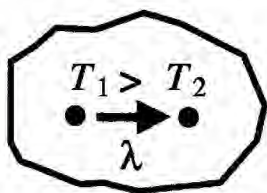
Для вертикально ориентированных поверхностей в помещении коэффициент  $\alpha_{cv}$  можно оценить по следующей формуле:

$$\alpha_{cv} = 1,7 (T_s - T_a)^{1/3}. \quad (2.3)$$

На открытом воздухе, например, при обследованиях зданий, дымовых труб и т.п. объектов, конвективный теплообмен зависит от скорости ветра  $V$  (высоты над уровнем земли  $H$ ). Одной из эмпирических формул, рекомендуемых при теплотехническом расчете дымовых труб, является [22]:

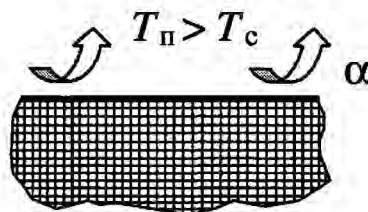
$$\alpha_{cv} = 6,3 (KV)^{0,66}, \quad (2.4)$$

Теплопроводность



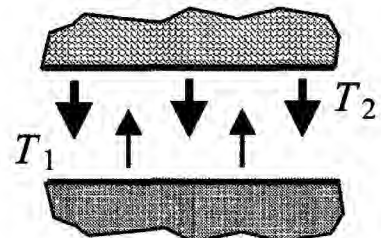
Закон Фурье

Конвекция



Закон Ньютона

Излучение



Закон Стефана–Больцмана

Рис. 2.1. Механизмы теплопередачи

где коэффициент  $K$  определен следующим образом:

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

Излучение есть поток квантов электромагнитного излучения, который испускается всеми физическими телами с температурой выше абсолютного нуля (0 К). В интегральном выражении плотность мощности радиационного излучения  $Q_{rd}$  описывается *законом Стефана-Больцмана*, который для теплообмена между двумя плоскими телами с температурами  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) имеет следующий вид (рис. 2.1):

$$Q_{rd} \approx \varepsilon_{red} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon_{red} = 1 / \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$  – приведенный коэффициент излучения и  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ).

Теплообмен между теплым объектом ( $T_s$ ) и холодной окружающей (газообразной) средой ( $T_a$ ) происходит как путем конвекции, так и излучения:

$$Q = Q_{cv} + Q_{rd} = \alpha_{cv} (T_s - T_a) + \varepsilon_{red} \sigma (T_s^4 - T_a^4). \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_{red} \sigma (T_s^4 - T_a^4) &\approx 4\sigma \left( \frac{T_s - T_a}{2} \right)^3 (T_s - T_a) = \\ &= \alpha_{rd} (T_s - T_a), \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $\alpha_{rd}$  – коэффициент теплообмена, обусловленный излучением.

Выражения (2.2) и (2.6) становятся идентичными, если ввести *комбинированный коэффициент теплообмена* с окружающей средой  $\alpha = \alpha_{cv} + \alpha_{rd}$ . Значение  $\alpha$

## 2.1. Рекомендуемые значения комбинированного коэффициента теплообмена

( $\varepsilon = 0,9$ ;  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{cv}$  определен по формуле (2.3);  $\alpha_{rd}$  – по (2.7))

$T_s - T_a, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_{cv}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha_{rd}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
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

зависит от формы объекта и его ориентации в пространстве, а также от разницы температур  $T_s - T_a$ . Рекомендуемые значения  $\alpha$  для помещений даны в табл. 2.1.

В расчетных задачах ТК материалов часто принимают  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Отсутствие теплообмена на какой-либо поверхности объекта ( $\alpha_{cv} = \alpha_{rd} = 0$ ) соответствует *адиабатическим* граничным условиям. В ТК адиабатические условия возникают при испытаниях металлов и тонких неметаллов, в особенности, при малых временах наблюдения.

### 2.1.2. Граничные условия на поверхности объектов контроля

На нагреваемой поверхности объектов контроля в общем случае имеет место смешанное граничное условие (ГУ) 2-го и 3-го рода, которое включает тепловую стимуляцию объекта внешним источником и конвективно-радиационное охлаждение поверхности средой (рис. 2.2). Запись такого ГУ выражает условие баланса трех потоков на поверхности изделия: потока нагрева  $Q$ , конвективно-радиа-

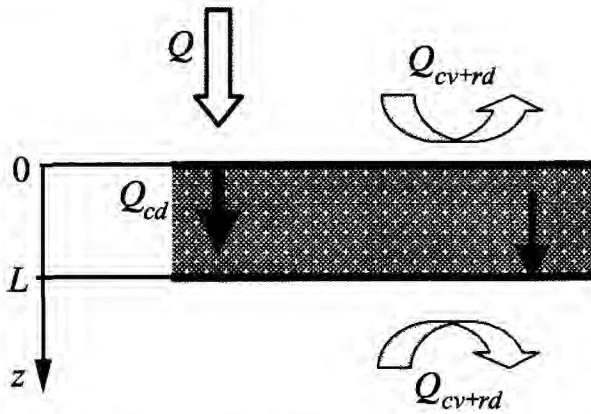


Рис. 2.2. Граничные условия на поверхности объектов контроля

ционного потока  $Q_{cv+rd}$  и потока  $Q_{cd}$ , уходящего в глубь тела за счет теплопроводности:

$$Q = Q_{cv+rd} + Q_{cd} \quad (2.8)$$

При решении краевой задачи теплопроводности типичная запись смешанного ГУ (2.8) имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = Q - \alpha [T(z=0) - T_a], \quad (2.9)$$

где  $z = 0$  обозначает переднюю поверхность объекта контроля. На задней поверхности ( $z = L$ ,  $L$  – толщина изделия) поток нагрева отсутствует, поэтому имеет место баланс двух тепловых потоков:

$$-\lambda \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = \alpha [T(z=L) - T_a], \quad (2.10)$$

где изменение знака конвективно-радиационной составляющей потока обусловлено изменением его направления (рис. 2.2).

*Неадиабатический теплообмен* включает все три механизма, описанные выше. Наиболее трудно поддается оценке конвективная составляющая теплообмена со средой, поэтому решение обратных задач тепловизионной диагностики при значительной конвекции, например, в строительстве, затруднительно, поскольку данные ТК следует интерпретировать при слабоконтролируемых условиях внешней среды. В активных процедурах собствен-

но ТК мощность потока нагрева обычно значительно превышает мощность встречного потока теплоотдачи за счет конвекции и излучения. В этом случае теплообмен становится адиабатическим, и соответствующие решения теории теплопроводности приобретают наиболее простой вид.

### 2.1.3. Теплопередача в дефектах и на границах разнородных слоев

Многие типичные дефекты, являющиеся объектами ТК, могут рассматриваться как "плоские" тонкие газовые промежутки, расположенные перпендикулярно основному тепловому потоку. В таких дефектах теплопередача происходит путем теплопроводности, конвекции и излучения. Составляющие полного теплового потока обусловлены температурным градиентом на поверхностях дефекта  $\Delta T = T_1 - T_2$  и определяются следующими выражениями:

$Q_{cd} = \lambda_d (T_2 - T_1) / d$  (кондуктивная составляющая);

$Q_{cv} = \lambda_d^c (T_2 - T_1) / d$  (конвективная составляющая);

$Q_{rd} \approx \epsilon_{red} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \approx 4\epsilon_{red} \sigma T_{0,5}^3 (T_1 - T_2)$  (радиационная составляющая). (2.11)

Здесь  $\lambda_d^c$  – эффективный коэффициент теплопроводности, обусловленный конвекцией, и  $T_{0,5} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ , К.

Конвективная составляющая эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_d^c$  определяется произведением критериев Грасгофа и Прандтля ( $Gr Pr$ ):

$$\lambda_d^c = (\zeta - 1) \lambda_d \quad (2.12)$$

Если  $10^3 < Gr Pr < 10^6$ :

$$\zeta = 0,105 (Gr Pr)^{0,3}, \quad (2.13)$$

где  $Gr = \frac{gd^3}{\nu^2} \beta (T_1 - T_2)$ ;  $Pr = \nu/a$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m^2/c$ ;  $\nu = \mu/\rho$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $m^2/c$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха,  $H \cdot c/m^2$ ;  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$  – коэффициент *температуропроводности*,  $m^2/c$ ;  $C$  – удельная теплоемкость,  $Дж/(кг \cdot К)$ ;  $\rho$  – плотность,  $кг/m^3$ ;  $\beta = \frac{1}{t_{0,5} + 273}$ ;  $t_{0,5} = (t_1 + t_2)/2$ ,  $^\circ C$ .

Отношение кондуктивной и радиационной составляющих теплового потока в дефекте равно:

$$\frac{Q_{cd}}{Q_{rd}} \approx \frac{\lambda_d}{4d\epsilon_{red}dT^3}. \quad (2.14)$$

Соответственно, отношение кондуктивной и конвекционной составляющих:

$$\frac{Q_{cd}}{Q_{cv}} = \frac{1}{\zeta - 1}. \quad (2.15)$$

Оценим отношения  $Q_{cd}/Q_{rd}$  и  $Q_{cd}/Q_{cv}$  для тонких воздушных дефектов. Пусть максимальная избыточная температура нагрева изделия не превышает  $50^\circ C$ , что характерно для ТК композитов. Следовательно, температурный градиент через дефект не будет превышать это значение; иными словами, примем, что  $t_1 - t_2 = 50^\circ C$ ,  $T_{0,5} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{293 + 343}{2} = 318$  К и  $t_{0,5} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{20 + 50}{2} = 35^\circ C$ . Другие параметры:  $d = 250$  мкм,  $g = 9,8$   $m^2/c$ ,  $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5}$   $m^2/c$ ,  $a = 57,8 \cdot 10^{-6}$   $m^2/c$ . Тогда:

$$\begin{aligned} Q_{cd}/Q_{rd} &= 57,6, \\ Q_{cd}/Q_{cv} &\rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Таким образом, в тонких воздушных прослойках (дефектах) кондуктивный тепловой поток существенно превышает

конвективный и радиационный. Например, в дефектах толщиной до 250 мкм приращение теплопроводности нагреваемого воздушного промежутка не превышает 1,5 % по сравнению со справочным значением для воздуха.

Ситуация изменяется при анализе воздушных промежутков толщиной более 5...20 мм, например, сотовых ячеек. В силу значительной высоты сот, в них может развиваться конвекция (при сохраняющейся низкой мощности излучения). Формулу расчета эффективной теплопроводности таких промежутков можно записать в следующем виде:

$$\lambda_d^{eq} = \lambda_d + (1 - \zeta)\lambda_d + \psi d,$$

$$\psi = \epsilon_{red} \sigma (T_1^4 - T_4^4) / (T_1 - T_4). \quad (2.17)$$

Применяя формулы (2.17) к ТК сотовых изделий толщиной 25 мм, можно показать, что теплопроводность воздуха в сотах возрастает от 0,07 до 0,28 Вт/(м·К).

В рамках модели чистой теплопроводности через дефект существует два типа ГУ на границах раздела слоев, выполненных из различных материалов.

В общем случае на границах слоев  $i$  и  $i+1$  имеют место условия неразрывности теплового потока и температуры в виде:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad T_i = T_{i+1}. \quad (2.18)$$

При использовании условий (2.18) необходимо решать дифференциальное уравнение теплопроводности не только в основном материале, но также и в дефекте, "сшивая" решения на границе дефекта и основного материала. При этом распределение температуры в объекте контроля зависит как от теплопроводности, так и от температуропроводности (теплоемкости) слоя, поэтому такие дефекты иногда называют *емкостными*.

Если теплоемкостью дефектного ( $i+1$ ) слоя можно пренебречь, то его основной *теплофизической характеристикой*

кой (ТФХ) является *тепловое сопротивление*  $R_{i+1} = l_{i+1} / \lambda_{i+1}$ ; соответствующие дефекты называют *резистивными*. На границах резистивных дефектов температура изменяется скачкообразно, а тепловой поток остается неразрывным:

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z};$$

$$T_{i+1} - T_i = R_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}. \quad (2.19)$$

Моделирование дефектов согласно выражениям (2.18) и (2.19) описано в п. 4.1.

## 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 теплопроводности *параболического* типа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w(x, y, z) = C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.20)$$

где  $w(x, y, z)$  – *удельная мощность внутренних источников тепла* (Вт/м<sup>3</sup>),  $C$  и  $\rho$  – введенные выше удельная теплоемкость и плотность материала. Уравнение (2.20) отражает принцип сохранения энергии в среде, где тепло генерируется и распространяется путем диффузии.

Анизотропный характер диффузии тепла в уравнении (2.20) выражен коэффициентами теплопроводности  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ . В случае изотропного материала:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.21)$$

где  $a = \lambda / (C\rho)$  – коэффициент температуропроводности, введенный выше.

В большинстве задач активного ТК внутренние источники тепла отсутствуют ( $w = 0$ ), что приводит к общеизвестной форме уравнения (2.20):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.22)$$

В стационарном режиме при наличии внутренних источников тепла

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = 0. \quad (2.23)$$

Стационарный режим без внутренних источников тепла описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2.24)$$

На поверхности адиабатического (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 оптимальные моменты наблюдения (см. п. 1.2). Поэтому для обнаружения скрытых дефектов в большинстве случаев используют процедуры активного ТК. Соответственно, в теории ТК чаще всего анализируют уравнения типа (2.20 – 2.22).

### 2.2.2. Параболическое уравнение теплопроводности в цилиндрических и сферических координатах

Уравнение (2.22) приведено в декартовой системе координат. Общей формой его записи уравнения является

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.25)$$

В цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (2.26)$$

В сферических координатах  $(r, \Theta, \varphi)$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[ (1 - \mu^2) \frac{\partial T}{\partial \mu} \right] + \frac{1}{r^2 (1 - \mu^2)} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}, \quad (2.27)$$

где  $\mu = \cos \Theta$ .

### 2.2.3. Гиперболическое уравнение теплопроводности в декартовых координатах

Закон Фурье в виде (2.1) исключает причинно-следственную связь между градиентом температуры и обусловленным им тепловым потоком. Иными словами, все уравнения п. 2.2.1, описывающие передачу энергии путем теплопроводности, 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). Очевидно, что для передачи энергии и движения частиц необходимо определенное время. Для описания конечной скорости распространения тепла вводят понятие *времени релаксации теплового потока*  $\tau_r$ , с учетом которого параболическое уравнение (2.25) заменяют *гиперболическим*:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\tau_r}{a} \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2}. \quad (2.28)$$

Скорость распространения теплового потока равна

$$V_t = \sqrt{\lambda / (C \rho \tau_r)}. \quad (2.29)$$

Время релаксации весьма мало; для металлов оно имеет порядок  $\tau_r \sim 10^{-11}$  с, поэтому, например, в алюминии  $V_t \approx 3$  км/с. Область применения гиперболического уравнения (2.28) определяется значением толщины материала [23]:

$$L_{\min} < 2 \pi a / V_t. \quad (2.30)$$

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

Анализ дифференциального уравнения (2.28) представляет главным образом академический интерес при исследовании процессов *фононной* теплопроводности в чистых кристаллах при сверхнизких температурах, а также при анализе процессов взрывного характера. Тем не менее, расширяющееся применение сверхтонких пленок, с одной стороны, и стремительное повышение быстродействия современных ИК камер (в настоящее время коммерчески доступны ИК камеры с частотой кадров до нескольких десятков кГц), с другой стороны, могут перевести интерес к сверхбыстрым тепловым процессам в практическую плоскость.

## 2.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Основными ТФХ материалов являются коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкость  $C$  и плотность  $\rho$  (см. табл. 2.2 и 2.3). Коэффициент теплопроводности определяет величину теплового потока, распространяющегося в теле при стационарном теплообмене.

Динамическими ТФХ являются коэффициент *температуропроводности* (thermal diffusivity)  $a = \lambda / (C \rho)$  и коэффициент *тепловой активности*, или *тепловая инерция* (thermal effusivity)  $e = \sqrt{\lambda C \rho}$ , (Вт·с<sup>1/2</sup> / (м<sup>2</sup>·К)).

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

Материал**	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Тепло- емкость $C$ , Дж/(кг·К)	Теплопро- водность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Температуро- проводность $a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	Тепловая инерция $e$ , Вт·с <sup>1/2</sup> /(м <sup>2</sup> ·К)
Воздух (тонкие промежутки)	1,205	1005	0,070	57,8	9,21
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 (⊥) 1,69 (  )	0,102 (⊥)** 0,121 (  )	445 (⊥) 485 (  )
Эпоксидная смола	1100...1300	800...1200	0,17...0,19	0,15	465
Сосна (параллельно волокон)	550	2512	0,174	0,126	490
Формальдегидная смола	1200	1850	0,2	0,09	666
Стеклопластик*	—	—	0,3 (⊥) 0,38 (  )	0,13 (⊥) 0,17 (  )	832 (⊥) 922 (  )
Фторопласт (тефлон)	2140	1010	0,23	0,106	705,1
Тринитротолуол	—	—	0,23	0,0925	—
Штукатурка	1100	1005	0,233	0,211	507
Воздух в ячейках сот (градиент темпера- туры через ячейку 50 °С при комнатной температуре)	1,205	1005	0,282	232,8	18,48
Вода	1000	4193	0,586	0,140	1570
Песок речной сухой	1520	800	0,34	0,28	643
Капролон-В	—	—	0,37	0,21	—
Углепластик*	1500	1758	0,61 (⊥) 4,5 (  )	0,23 (⊥) 1,71 (  )	888 (⊥) 1260 (  )
Клей на основе эпок- сидной смолы (50 %) и алюминиевого порошка (50 %)*	1985	2461	0,66	13,5	1795
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
Двуокись кремния	2200	745	1,38	0,842	1504
Бетон*	2400	837	1,51	0,752	1740
Почва	—	—	2,6	0,5	—
Никелевый сплав	8300	440	9,5	2,60	5890



Продолжение табл. 2.2

Материал **	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Температуропроводность $a$ , 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	Тепловая инерция $e$ , Вт·с <sup>1/2</sup> / (м <sup>2</sup> ·К)
Борэпоксидный композит *	2000	1000	11 (⊥) 16 (  )	5,5 (⊥) 8,0 (  )	–
Сталь (марки AISI 316)	8240	468	13,4	3,47	7190
Нитрид кремния *	3000	700	15...30	7,14...14,28	5612...7937
Титан	4500	522	21,9	9,32	7170
Цирконий	6570	278	22,7	12,4	6440
Бор	2340	600	27,4	20,0	–
Окись 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
Кремний	2330	800	84...126	45,1...67,6	12 513...15 325
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	19 450	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 волокнам; (||) – параллельно волокнам. В композиционных материалах, например, в углепластике, могут быть определены три компонента теплопроводности, зависящие от взаимного расположения волокон.

Коэффициент температуропроводности является показателем диффузии внутренней энергии в материале; его величина пропорциональна скорости распространения изотермической поверхности. Как правило, более теплопроводные твердые материалы характеризуются большими значениями  $a$ ; газы обладают низкой теплопроводностью, но высокой температуропроводностью. Тепловая инерция характеризует тепловое согласование двух

сред (1 и 2) и определяет, например, коэффициент отражения тепловой волны  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}. \quad (2.31)$$

$\Gamma = 0$  означает отсутствие теплового контакта,  $\Gamma = 1$  соответствует случаю, в котором второй материал является абсолютным проводником тепла, а  $\Gamma = -1$  имеет место, если второй материал является абсолютным теплоизолятором.

**2.3. Теплофизические свойства строительных материалов**

Материал	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Температуропроводность $a$ , 10 <sup>-7</sup> м <sup>2</sup> /с
Железобетон	1,63	2500	837,4	7,78
Бетон с каменным щебнем или гравием	1,45	2300	837,4	7,56
Бетоны ячеистые (газобетон, пенобетон)	0,40	1000	837,4	4,73
Плиты минералватные на битумной связке	0,12	400	753,7	3,86
То же	0,09	300	753,7	4,11
Плиты минералватные на синтетической связке	0,07	200	753,7	4,64
Шлак топливный	0,29	1000	753,7	3,86
Кирпичная кладка из глиняного кирпича на легком растворе	0,76	1700	879,3	5,06
Кирпичная кладка из силикатного кирпича на легком растворе	0,87	1900	837,4	5,48
Воздух в тонких прослойках*	0,07	1,3	928,4	579

\* Тепловое сопротивление вертикальной воздушной прослойки составляет:

- 0,14 (м<sup>2</sup>·К) /Вт при толщине прослойки 1 см;
- 0,15 (м<sup>2</sup>·К) /Вт при толщине прослойки 5 см;
- 0,16 (м<sup>2</sup>·К) /Вт при толщине прослойки 10 см;
- 0,17 (м<sup>2</sup>·К) /Вт при толщине прослойки 15 см и более.

Еще одна динамическая характеристика теплопроводности в твердом теле – *длина тепловой диффузии*  $\mu$  выражается в метрах:

$$\mu = a / (\pi f), \quad (2.32)$$

и связана с частотой гармонического потока нагрева  $f$  (Гц). В теории тепловых волн посредством этого параметра обозначают тот факт, что низкочастотные волны проникают в твердое тело до больших глубин (можно также сказать, что тепловая волна фиксированной частоты проникает глубже в материал с большей температуропроводности). В одностороннем ТК длина тепловой диффузии является оценкой глубины обнаружения дефектов при тепловой стимуляции объекта тепловыми волнами различной частоты.

**2.4. КЛАССИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Исчерпывающий анализ проблем нестационарной теплопроводности содержится в фундаментальной монографии Х. Карслоу и Д. Эгера [16], которая рассматривается многими поколениями исследователей в качестве "библии" теории теплопроводности. В России аналогичную роль выполняет широко известная книга А.В. Лыкова [17]. В этих двух работах можно найти большое количество аналитических решений одномерных задач нагрева (охлаждения) тел, которые используют при расчетах температуры в бездефектных областях. Ряд таких решений, широко используемых на практике, систематизирован в табл. 2.4 и 2.5 соответственно для поверхности полуограниченно-

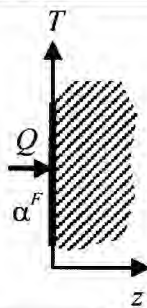
го тела и пластины. Решения приведены в виде:

$$T = Q'\theta, \quad (2.33)$$

где  $T$  – избыточная температура поверхности;  $Q'$  (или  $W'$ ) – комплекс, характеризующий *эффективность нагрева*;  $\theta$  – комплекс, описывающий *нормализованную избыточную* температуру поверхности (в дальнейшем  $\theta$  будет использоваться с соот-

ветствующими индексами, например,  $\theta_{SP}^R$  означает нормализованную температуру на обратной поверхности ( $R$ ) пластины, нагреваемой прямоугольным импульсом (square pulse –  $SP$ ). В табл. 2.5 приведены также выражения для производных от поверхностной температуры по некоторым параметрам решений, что использовано в п. 3.7 при определении *функций чувствительности*.

#### 2.4. Классические решения теории теплопроводности для поверхности полуограниченного тела, нагреваемого равномерно-распределенным тепловым потоком\*

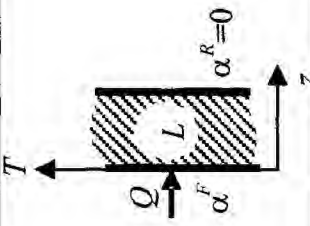



Объект – полубесконечное тело

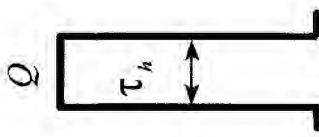
Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Решение для нагреваемой поверхности
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T}{Q/\lambda} = 2 \left( \frac{a\tau}{\pi} \right)^{1/2}$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T}{Q/\alpha} = 1 - e^{H^2 a \tau} \operatorname{erfc}(H \sqrt{a \tau}); \quad H = \alpha / \lambda$
	$\alpha^F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

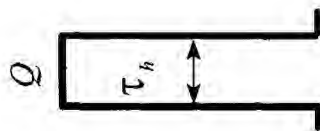
\* Решение для прямоугольного импульса дано для  $\tau \geq \tau_h$ .

2.5. Классические решения теории теплопроводности для поверхности пластины, нагреваемой равномерно-распределенным тепловым потоком

Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Решение для лицевой (нагреваемой) поверхности	Решение для задней поверхности
	<p>Объект – пластина</p> $\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = Fo + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} = \theta_{ST}^F(Fo);$ $Q' = \frac{QL}{\lambda}; \quad \frac{T}{Q'} = \theta_{ST}^F(Fo);$ $\frac{\partial T / Q'}{\partial Fo} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo};$ $\frac{\partial T / T}{\partial Fo / Fo} = Fo \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{\theta_{ST}^F(Fo)}$	$\frac{T}{Q'} = Fo - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} = \theta_{ST}^R(Fo);$ $\frac{\partial T}{\partial Q'} = \theta_{ST}^R(Fo); \quad \frac{\partial T / Q'}{\partial Fo} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo};$ $\frac{\partial T / T}{\partial Fo / Fo} = Fo \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{\theta_{ST}^R(Fo)}$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} = \theta_{ST}^F(Bi, Fo);$ $Q' = Q / \alpha; \quad \frac{\partial T}{\partial Q'} = \theta_{ST}^F(Bi, Fo);$ $\frac{\partial T / Q'}{Bi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi(6Bi+4)}{[Bi(Bi+1) + \mu_n^2]^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$	$\frac{T}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} =$ $= \theta_{ST}^R(Bi, Fo); \quad \frac{\partial T}{\partial Q'} = \theta_{ST}^R(Bi, Fo);$ $\frac{\partial T / Q'}{Bi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{Bi(6Bi+4)}{[Bi(Bi+1) + \mu_n^2]^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$

Продолжение табл. 2.5

Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Решение для лицевой (нагреваемой) поверхности	Решение для задней поверхности
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{\partial T / Q'}{Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n^2 \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$ <p><math>\mu_n</math> положительные корни трансцендентного уравнения: <math>\mu \operatorname{tg} \mu = Bi</math></p>	$\frac{\partial T / Q'}{Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\cos \mu_n} \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}$
	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1);$ $Q' = QL / \lambda;$ $\frac{\partial T}{\partial Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1);$ $\frac{\partial T / T}{\partial Fo_h Fo_h} = \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 (Fo - Fo_h)}}{Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1)};$ $\frac{\partial T / Q'}{\partial Fo} = \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo} - 1)}{Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1)}$	$\frac{T}{Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1);$ $\frac{\partial T}{\partial Q'} = Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1);$ $\frac{\partial T / T}{\partial Fo_h Fo_h} = \frac{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 (Fo - Fo_h)}}{Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1)};$ $\frac{\partial T / Q'}{\partial Fo} = \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo} - 1)}{Fo_h + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 Fo} (e^{n^2 \pi^2 Fo_h} - 1)}$



$$\frac{T}{Q'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1) = \theta_{SP}^R (\text{Bi}, \text{Fo}, \text{Fo}_h);$$

$$Q' = Q/\alpha; \quad \frac{\partial T}{\partial Q'} = \theta_{SP}^R (\text{Bi}, \text{Fo}, \text{Fo}_h);$$

$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Bi}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{\text{Bi}(6\text{Bi}+4)}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1);$$

$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Fo}_h} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\cos \mu_n} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h};$$

$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Fo}} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\cos \mu_n} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1)$$

$$\frac{T}{Q'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1) = \theta_{SP}^F (\text{Bi}, \text{Fo}, \text{Fo}_h);$$

$$Q' = Q/\alpha; \quad \frac{\partial T}{\partial Q'} = \theta_{SP}^F (\text{Bi}, \text{Fo}, \text{Fo}_h);$$

$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Bi}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{Bi}(6\text{Bi}+4)}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1);$$

$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Fo}_h} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\cos \mu_n} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h};$$


$$\frac{\partial T / Q'}{\text{Fo}} =$$

$$= - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\cos \mu_n} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} (e^{\mu_n^2 \text{Fo}_h} - 1)$$

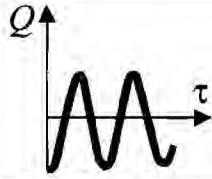
$\alpha^F \neq 0$

$\alpha^R = 0$

Продолжение табл. 2.5

Функция нагрева	Тип теплоотдачи на поверхности	Решение для лицевой (нагреваемой) поверхности	Решение для задней поверхности
$W$ 	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{W'} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} = \theta_D^F; \quad W' = \frac{Wa}{\lambda L};$ $\frac{\partial T}{\partial W'} = \theta_D^F;$ $\frac{\partial T/T}{\partial Fo/Fo} = \frac{-2\pi^2 Fo \sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo}}$	$\frac{T}{W'} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo} = \theta_D^R;$ $\frac{\partial T}{\partial W'} = \theta_D^R;$ $\frac{\partial T/T}{\partial Fo/Fo} = \frac{-2\pi^2 Fo \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n^2 e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo}}$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{W'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} = \theta_D^F(\text{Bi}, \text{Fo});$ $W' = \frac{Wa}{\lambda L}; \quad \frac{\partial T}{\partial W'} = \theta_D^F(\text{Bi}, \text{Fo});$ $\frac{\partial T/W'}{\partial Fo} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^4}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}$	$\frac{T}{W'} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{2\mu_n^2}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo} =$ $= \theta_D^R(\text{Bi}, \text{Fo});$ $\frac{\partial T}{\partial W'} = \theta_D^R(\text{Bi}, \text{Fo});$ $\frac{\partial T/W'}{\partial Fo} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\cos \mu_n} \frac{2\mu_n^4}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 Fo}$

**2.6. Классические решения теории теплопроводности для тепловых волн (равномерно-распределенный тепловой поток)**

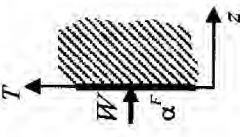
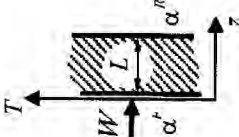


Функция нагрева  $Q = Q_m \cos(\omega\tau)$

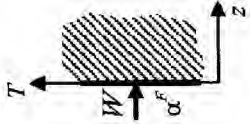
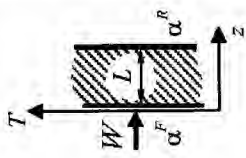
Объект	Тип теплоотдачи на поверхности	Общее решение	Передняя нагреваемая поверхность
	$\alpha^F = 0$	$\frac{T(\tau)}{Q_m} = \frac{1}{\lambda\sqrt{\omega/a}} e^{-z\sqrt{\omega/2a}} \times \cos\left[\omega\tau - \left(z\sqrt{\omega/2a}\right) - \Theta\right]; \Theta = 45^\circ$	$\frac{T(z=0, \tau)}{Q_m}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



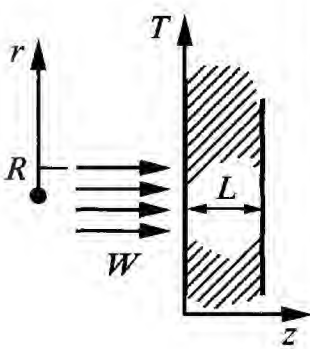
## 2.7. Классические решения теории теплопроводности для неподвижного точечного источника тепла

Объект	Тип тепло-отдачи на поверхности	Общее решение	Передняя нагреваемая поверхность
Полуограниченное тело 	$\alpha^F = 0$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4(\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}};$ $W' = W / \rho C; \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4(\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}};$ $r^2 = x^2 + y^2$
	$\alpha^F \neq 0$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4(\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} -$ $-\frac{H}{4\pi a \tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + H\sqrt{a\tau}\right) e^{Hz + aH^2\tau - r^2/4a\tau};$ $W' = W / \rho C; \quad H = a/\lambda$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4\pi a \tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{a\tau}) e^{aH^2\tau - r^2/4a\tau}$
Пластина 	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4\pi a L \tau} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} \cos(n\pi Z) \right];$ $W' = W / \rho C; \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad Z = z/L; \quad Fo = a\tau/L^2$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{4\pi a L \tau} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo} \right);$ $r^2 = x^2 + y^2$
	$\alpha^F \neq 0$ $\alpha^R \neq 0$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{2\pi a L \tau} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 \cos \mu_n Z + \mu_n \operatorname{Bi} \sin \mu_n Z}{\mu_n^2 + 2\operatorname{Bi} + \operatorname{Bi}^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$ $W' = W / \rho C; \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad \operatorname{Bi} = \alpha L / \lambda; \quad Fo = a\tau / L^2;$ $Z = z / L; \quad \mu_n - \text{корень трансцендентного уравнения:}$ $\operatorname{tg} \mu = 2\mu \operatorname{Bi} / (\mu^2 - \operatorname{Bi}^2)$	$\frac{T}{W'} = \frac{1}{2\pi a L \tau} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \times$ $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2 + 2\operatorname{Bi} + \operatorname{Bi}^2} e^{-\mu_n^2 Fo};$ $r^2 = x^2 + y^2$

2.8. Классические решения теории теплопроводности для неподвижного гауссовского источника тепла

Объект	Тип теплоотдачи на поверхности	Общее решение	Передняя нагреваемая поверхность
<p>Полуограниченное тело</p> 	<p><math>\alpha^F = 0</math></p>	<p> <math display="block">T(r, z, \tau) = \frac{W}{2\pi e \sqrt{\alpha \tau}} \int_0^{+\infty} J_0(\sigma r) e^{-\frac{\sigma^2 R^2}{8}} [I(\sigma, z, \tau) - \Theta(\tau - \tau_h) I(\sigma, z, \tau - \tau_h)] d\sigma; \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2;</math> <math display="block">I(\sigma, z, \tau) = \left[ e^{-z\sigma} \operatorname{erfc}\left(-\sigma\sqrt{\alpha\tau} + \frac{1}{2} \frac{z}{\sqrt{\alpha\tau}}\right) - e^{z\sigma} \operatorname{erfc}\left(\sigma\sqrt{\alpha\tau} + \frac{1}{2} \frac{z}{\sqrt{\alpha\tau}}\right) \right];</math> <p style="text-align: center;"><math>J_0</math> – функция Бесселя;</p> <p>Распределение энергии нагрева в пространстве: <math>e^{-\frac{(x^2+y^2+z^2)}{2R^2}}</math>;</p> <p style="text-align: center;"><math>\Theta(\tau - \tau_h)</math> – ступенчатая функция (Хевисайда)</p> </p>	<p> <math display="block">T(r, z = 0, \tau) = \frac{W}{2\pi e \sqrt{\alpha \tau}} \times</math> <math display="block">\times \int_0^{+\infty} J_0(\sigma r) e^{-\frac{\sigma^2 R^2}{8}} \times</math> <math display="block">\times \left[ \operatorname{erf}\left(\sigma\sqrt{\alpha\tau}\right) - \Theta(\tau - \tau_h) \right] \times</math> <math display="block">\times \operatorname{erf}\left(\sigma\sqrt{\alpha}\sqrt{\tau - \tau_h}\right) d\sigma;</math> <p style="text-align: center;"><math>r^2 = x^2 + y^2</math></p> </p>
<p>Пластина</p> 	<p><math>\alpha^F = 0</math> <math>\alpha^R = 0</math></p>	<p> <math display="block">T(r, z, \tau) = \frac{2W}{\pi \rho C L} \frac{e^{-\frac{2r^2}{R^2+8\alpha\tau}}}{(R^2+8\alpha\tau)} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \alpha \tau}{L^2}} \cos(n\pi z) \right];</math> <p style="text-align: center;"><math>r^2 = x^2 + y^2 + z^2;</math></p> <p>Распределение энергии нагрева в пространстве: <math>e^{-\frac{(x^2+y^2+z^2)}{2R^2}}</math>;</p> <p style="text-align: center;"><math>e = \sqrt{\rho C \lambda}</math></p> </p>	<p> <math display="block">T(r, z = 0, \tau) = \frac{2W}{\pi \rho C L} \times</math> <math display="block">\times \frac{e^{-\frac{2r^2}{R^2+8\alpha\tau}}}{(R^2+8\alpha\tau)} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \alpha \tau}{L^2}} \right);</math> <p style="text-align: center;"><math>r^2 = x^2 + y^2</math></p> </p>

### 2.9. Решения задачи теплопроводности для неподвижного кругового источника тепла с равномерным распределением энергии нагрева\*

Объект	Тип теплоотдачи на поверхности	Общее решение
<p>Пластина</p> 	$\alpha^F = 0$ $\alpha^R = 0$	$T(r, z, \tau) = \frac{W}{\rho CL} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2 a \tau}{L^2}} \cos(n\pi Z) \right] \times$ $\times \left\{ 1 - e^{-\frac{R^2}{4a\tau}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k!)^2} \left( \frac{r^2}{4a\tau} \right)^k \times \right.$ $\left. \times \left[ \left( -\frac{R^2}{4a\tau} \right)^k e^{-\frac{R^2}{4a\tau}} - k \int_0^{-R^2/4a\tau} \mu^{k-1} e^{\mu} d\mu \right] \right\};$ <p><math>Z = z/L</math>; <math>R</math> – радиус пучка нагрева</p>

\* См. работу [24].

Заметим, что приближенные расчеты нагрева тел цилиндрической и сферической формы во многих случаях могут быть выполнены в плоской геометрии, т.е. используя решения, представленные в табл. 2.4 и 2.5. 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. 2.6.

Решения задач нагрева тел неподвижным точечным источником тепла, гауссовским, а также круговым источником, приведены в табл. 2.7–2.9. Эти решения вводят в рассмотрение все три пространственные координаты и часто используются в теории измерения ТФХ.

В табл. 2.10 содержатся решения трехмерных задач нагрева полуограниченного тела точечным и гауссовским движущимся источником тепла. Решения такого рода разработаны для моделирования процесса сварки материалов. В ТК время от времени возобновляется интерес к обнаружению скрытых дефектов путем

сканирования поверхности изделий локализованными источниками тепла (*Техника "летающего пятна"* и *Техника "ползущего пятна"*, табл. 1.1), поскольку, как будет показано ниже, наилучшая чувствительность ТК достигается при нагреве изделий тепловыми потоками, которые описываются функцией Дирака, как в пространстве, так и во времени. Кроме того, метод движущегося пятна наиболее пригоден для обнаружения дефектов (трещин), расположенных перпендикулярно основным поверхностям изделия.

В 2002 г. опубликована монография Д. Мелье и др. (Франция), в которой обобщен метод "теплового четырехполюсника" применительно к решениям одно- и двухмерных задач нагрева многослойных тел. Книга снабжена большим количеством примеров, непосредственно относящихся к проблематике ТК, и содержит соответствующие программы расчета температурных полей с использованием пакета MatLab [26].

С математической точки зрения метод "теплового четырехполюсника" при-

надлежит 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. Решения уравнения теплопроводности выражаются в виде линейных матричных связей между трансформированными векторами температуры и тепловых потоков на границах многослойной системы. Это позволяет получать решения, структура которых не зависит от граничных условий (ГУ).

Решение дифференциальных уравнений с помощью интегральных преобразований известно достаточно давно [16, 17], однако в настоящее время этот традиционный 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.

Кратко говоря, метод "теплового четырехполюсника" позволяет получать *алгебраические* решения задач нагрева многослойных тел в области Лапласа, и поэтому анализ искомым зависимостей, например, между параметрами дефекта и "Лапласовской температурой" можно выполнять в пространстве Лапласа, а в случае необходимости возвращаться к реальным температурам, используя численные методы.

Для многослойных задач ТК данный метод представляет особый интерес.

## 2.5. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ

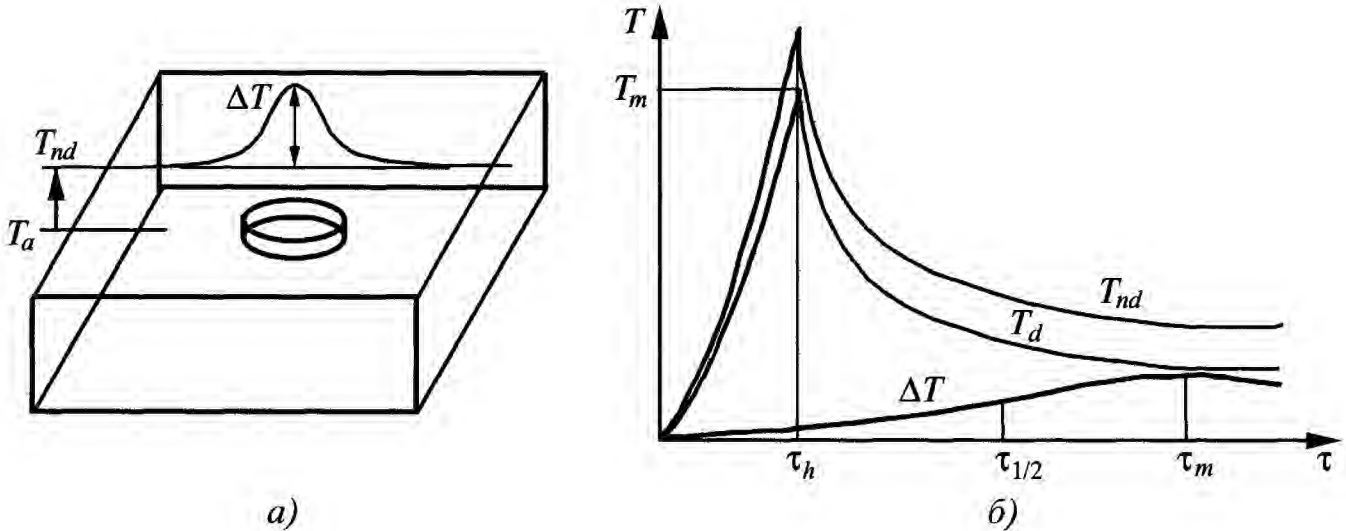
Под *информативными параметрами* ТК будем понимать *количественные* характеристики процесса динамической теплопередачи в дефектных структурах, которые используются для принятия ре-

шения о качестве изделий (табл. 1.1). При анализе поверхностной температурной функции  $T(x, y, \tau)$  различают *амплитудные* и *временные* информативные параметры. При использовании одномерного преобразования Фурье  $F[T(x, y, \tau)]$  по времени информативными параметрами служат *мощностные* и *фазовые* характеристики, которые являются функцией частоты. Соответствующие параметры имеют место при других преобразованиях сигнала, например, при использовании *вейвлет-функций* (wavelet functions). Те информативные параметры, которые определяются либо аппаратурой ТК, либо соответствующими компьютерными программами обработки данных, мы будем также называть *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 можно рассмотреть некоторое эталонное значение температуры  $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau) = T_{nd}(\tau)$ , принятое в качестве бездефектного. В активном ТК, как правило, оперируют с избыточными значениями температуры, т.е. учитывают только превышения температуры над начальной температурой, которая обычно равна температуре окружающей среды  $T_a$ . В зоне дефекта регулярный характер температурного поля нарушается, и возникают дифференциальные температурные сигналы:

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_d(x, y, \tau) - T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau). \quad (2.34)$$



**Рис. 2.3. Пространственный и временной профили  $\Delta T(x, y, \tau)$  при импульсном ТК:**  
 а – пространственный профиль температуры в дефектной области;  
 б – изменение температуры во времени

При одностороннем ТК форма пространственного профиля сигнала  $\Delta T(x, y, \tau)$  над малыми дефектами близка к гауссоиду (рис. 2.3, а). При этом под температурным сигналом обычно понимают максимальное значение  $\Delta T_m(x, y, \tau) = \Delta T_m(\tau)$ . Следует подчеркнуть, что параметры, выражаемые в единицах температуры, т.е. избыточные температуры  $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau)$ ,  $T_d(x, y, \tau)$ , а также сигналы  $\Delta T(x, y, \tau)$ , 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)

$$C^{run}(x, y, \tau) = \Delta T(x, y, \tau) / T_{nd}(\tau), \quad (2.35)$$

который служит естественной характеристикой конкретной процедуры обнаружения.

Текущий контраст температуры вводят, если имеет место нагрев изделий, как в дефектной, так и в бездефектной зонах, например, при оптическом поверхностном нагреве. Если избыточная бездефектная

температура равна нулю, например, при ультразвуковой стимуляции однородного материала, данный информативный параметр теряет смысл.

Заметим, что нормировка на поглощенную энергию в виде (2.35) эффективна, 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  $\Delta T(x, y, \tau)$ , изображенные на рис. 2.3, б.

В течение времени нагрева  $\tau_h$  температура возрастает от начального (условно-нулевого) уровня до максимального значения  $T_m(\tau_h)$ , после чего спадает, причем разность температур между дефектной и бездефектной областями достигает максимального значения  $\Delta T_m$  в некоторый момент времени  $\tau_m$ . 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, если не учитывать ряд тонких эффектов. Наличие дефекта изменяет вид температурного распределения, что позволяет ввести в рассмотрение сигнал  $\Delta T(x_i, y_i, \tau)$ . *Нормализованный температурный контраст* определяют следующим образом:

$$C^{norm} = \frac{T(x_i, y_i, \tau)}{T_m(x_i, y_i, \tau_h)} - \frac{T(x_{nd}, y_{nd}, \tau)}{T_m(x_{nd}, y_{nd}, \tau_h)}. \quad (2.36)$$

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

Основным недостатком использования информативных параметров (2.34 – 2.36) является необходимость выбора бездефектной точки  $(x_{nd}, y_{nd})$ , что относительно легко осуществляет оператор, но затруднительно в автоматических устройствах контроля. Основываясь на том факте, что внутренние дефекты начинают влиять на поверхностную температуру, начиная с некоторого момента времени, до которого соответствующий участок изделия ведет себя как бездефектный, К. Малдаг и др. ввели понятие *дифференцированного температурного контраста* (differentiated contrast) в виде:

$$C^{dif}(x, y, \tau^{(n)}) = T(x, y, \tau) - \sqrt{\frac{\tau^{(n)}}{\tau}} T(x, y, \tau^{(n)}), \quad (2.37)$$

где  $\tau^{(n)}$  – момент времени, соответствующий "бездефектному" поведению анализируемой точки (заметим, что величина  $C^{dif}$  имеет размерность температуры, поэтому использование термина "контраст" некорректно). Выражение (2.37) получено из решения задачи нагрева адиабатического полуограниченного тела импульсом Дирака и означает, что каждая точка нормализуется сама на себя.

Заметим, что определение контрастов в виде (2.35 – 2.37) можно рассматривать как *одномерную фильтрацию* сигнала, поскольку они не учитывают диффузию тепла в "поперечных" направлениях. 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 В.П. Вавилов разработал алгоритм *трехмерной фильтрации* (3D filtering), сущность которого состоит в том, что экспериментальную температурную функцию  $T^{exp}$  нормализуют на эталонную температурную функцию  $T_{nd}^{theor}$ , которую получают из решения соответствующей трехмерной задачи теплового контроля:

$$C^{3D} = \frac{T^{exp}(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)} = \frac{T_{nd}^{exp}(x, y, \tau) + \Delta T(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)}. \quad (2.38)$$

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

$$C^{3D} = 1 + \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T_{nd}^{theor}(x, y, \tau)}, \quad (2.39)$$

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

Введение временных информативных критериев связано с тем, что, при прочих равных условиях, во временной области можно обеспечить более высокое значение отношения *сигнал/шум*, чем в области амплитуд. Это положение иллюстрируется графиком  $\Delta T(\tau)$  на рис. 2.3, б: величину оптимального времени контроля  $\tau_m$  можно измерить с большей точностью, нежели саму величину максимального температурного сигнала  $\Delta T_m$ . Таким образом, величина  $\tau_m$  служит временным информативным параметром. Далее мы увидим, что в односторонней процедуре ТК более глубокие дефекты характеризуются большими значениями  $\tau_m$ . Отсюда прямо вытекает принцип динамической тепловой томографии, согласно которому, дефекты, создающие близкие значения  $\tau_m$ , должны находиться в пределах некоторого локализованного слоя внутри объекта контроля. Помимо параметра  $\tau_m$ , в ТК используют время  $\tau_{1/2}$ , когда сигнал  $\Delta T(\tau)$  достигает половины своего максимального значения  $\Delta T_m / 2$  (см. рис. 2.3, 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  $\tau_{early}$ , 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 па-

раметров, в то время как разброс разности температур бездефектных точек может быть весьма существенным, достигая максимума в конце нагрева. Следует отметить, что наличие шумов и теплоотдача в окружающую среду приводят 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 (Томский НИИ интроскопии) термины "*максиграмма*" и "*таймограмма*" (см. табл. 1.1). Максиграмма есть искусственное (синтезированное) изображение, которое получают путем такой обработки последовательности термограмм  $T(i, j, \tau)$ , в результате которой в каждом пикселе формируется величина максимального температурного сигнала  $\Delta T_m(i, j)$  относительно выбранной эталонной точки (подчеркнем, что в максиграмме значения  $\Delta T_m(i, j)$  соответствуют *различным* моментам теплового процесса). В свою очередь, таймограмма есть изображение, каждый пиксель которого содержит соответствующее значение  $\tau_m(i, j)$ .

### 2.5.2. Мощностные и фазовые информативные параметры

Если к "нормальной" температурной функции  $T(x, y, \tau)$  применить некоторое интегральное преобразование, в частности, преобразование Фурье по времени, амплитудные информативные характеристики перейдут в мощностные, а временные – в частотные или фазовые. Для функций  $T_{nd}$  и  $T_d$ , изображенных на рис. 2.3, б, амплитудный спектры преобразования Фурье (модули преобразования  $M$ ) показаны на рис. 2.4, а, а спектры фаз  $\Phi$  приведены на рис. 2.4, б. Параметры преобразования Фурье анализируют на некоторой частоте  $f_i$ .

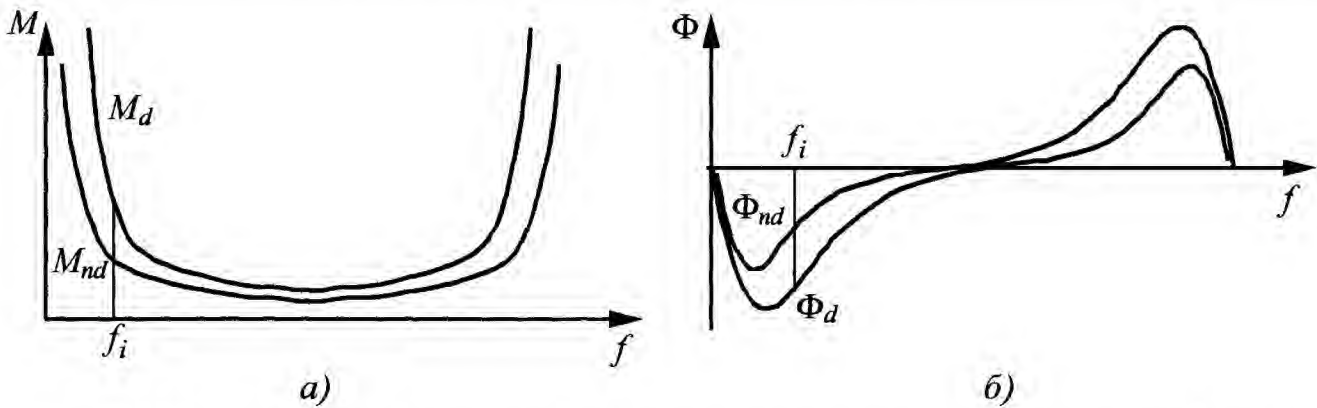


Рис. 2.4. Мощностные и фазовые информативные параметры (преобразование Фурье) при импульсном ТК:  
 а – спектр модуля; б – спектр фаз

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, и поэтому анализ высокочастотной части спектра обеспечивает информацию о поверхностном и приповерхностном слое, тогда как низкочастотная часть спектра ответственна за температурные отклики от глубоких дефектов. В последние годы стала популярной процедура *импульсной фазовой термографии*, в которой дефектные области обнаруживают по "аномальным" значениям фазы. При этом основная идея аналогична использованию временных информативных параметров: на данной частоте  $f_i$  бездефектные зоны характеризуются постоянным значением фазы, которое изменяется в местах внутренних дефектов.

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

## 2.6. ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Теоретический анализ задач НК и ТД с использованием любого физического метода связан с решением так называемых *прямых* и *обратных* задач математической физики, причем прямые задачи соответствуют моделированию, а обратные задачи – обработке экспериментальных данных. Анализ прямых и обратных задач можно трактовать в широком смысле как решение уравнений, описывающих процесс какого-либо испытания, относительно выбранных неизвестных функций. В математике эта терминология относится к решению соответствующих дифференциальных уравнений, причем обратные задачи противопоставляются прямым, поскольку обратные задачи не имеют строгого решения и являются некорректно поставленными (ill-posed). В отличие от прямых задач, решения обратных задач являются приближенными, и среди множества возможных решений следует выбирать оптимальное.

Рассмотрим общую схему ТК (рис. 2.5): 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).



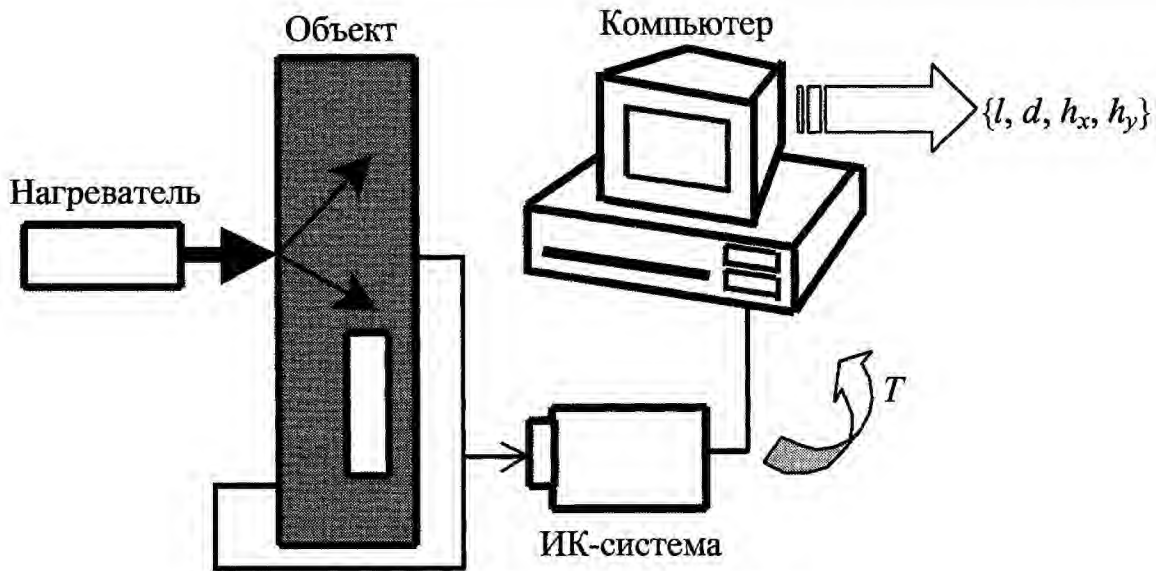


Рис. 2.5. Схема активного ТК

В функциональном виде выходной сигнал устройства контроля можно записать как

$$U(x, y, \tau) = E(x, y, \tau)T(\tau, [L], [D], [Q]) + N_s(x, y, \tau) + N_d, \quad (2.40)$$

где  $E(x, y, \tau)$  – функционал, характеризующий излучательно-поглощательные (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 отражения потока оптического излучения источника 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 устройств, можно пренебречь, тогда уравнение (2.40) выражает тот известный факт, что поток излучения, регистрируемый ИК устройством, складывается из собственного излучения объекта контроля и отраженного излучения посторонних объектов. Струк-

тура выражения (2.40) иллюстрирует многопараметрический характер ТК, при котором чисто температурный сигнал, несущий информацию о дефектах, сопровождается излучательно-поглощательными помехами независимо от механизма теплопередачи.

Параметры внутренних дефектов определяют в результате решения обратной задачи, т.е. путем *инверсии* уравнения (2.40):

$$\{D\} = \{l, d, h_x, h_y\} = \{U(x, y, \tau)\}^{-1}, \quad (2.41)$$

где  $l$  – глубина залегания дефекта;  $d$  – толщина дефекта;  $h_x, h_y$  – поперечные размеры дефекта.

Таким образом, величина температурного сигнала как функция координат и времени служит в качестве входной информации для решения обратных задач ТК дефектов в материалах. Точность определения выходных параметров зависит от точности измерения входных параметров, причем малый разброс входных данных может приводить к большим разбросам в выходных данных, в том числе и к полному "краху" используемого алгорит-

ма; например, некоторая комбинация входных параметров может привести к глубине дефекта, превышающей толщину самого изделия. Простейшей иллюстрацией решения обратной задачи может служить определение толщины дефекта по величине сигнала  $\Delta T$  (рис. 2.6). Допустим, что чувствительность температурных измерений ограничена только разрешением аппаратуры  $\Delta T_{res} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из расчетного графика зависимости  $\Delta T(d)$  видно, что в области малых толщин дефектов точность определения  $d$  достигает 30 мкм, ухудшаясь при больших толщинах до 100 мкм. Факт насыщения зависимости  $\Delta T(d)$  подсказывает, что дефекты значительной толщины не могут быть оценены с достаточной точностью.

Выше отмечалось, что, поскольку время измеряют с большей точностью,

нежели температуру, в ТК часто используют временные (фазовые) информативные критерии.

В отличие от обратных задач, связанных с интерпретацией экспериментальных данных, с помощью прямых задач моделируют процедуры НК. С ростом возможностей компьютерной техники популярность математического моделирования возрастает. Его 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. 2.11.

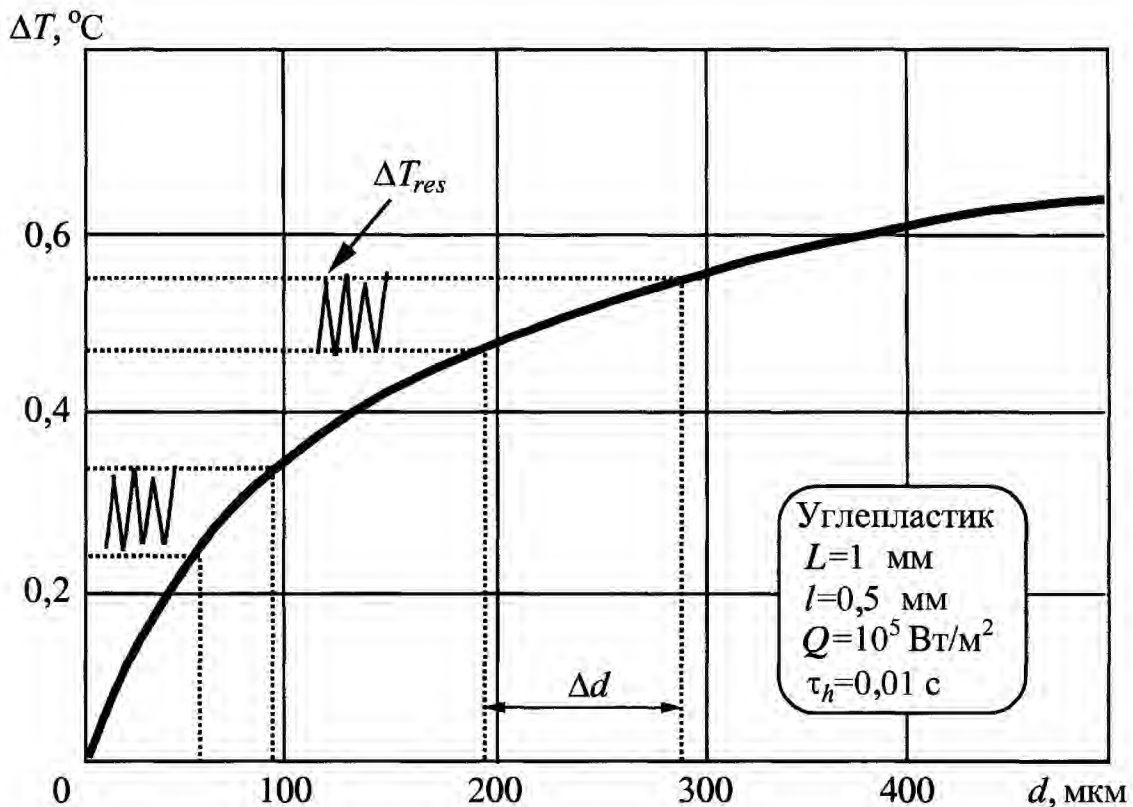


Рис. 2.6. Обратная задача ТК: определение толщины дефекта

## 2.11. Сравнительная характеристика прямых и обратных задач ТК

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

## 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*, вышеуказанные параметры могут быть объединены в *безразмерные критерии* и *числа подобия*, что позволяет анализировать решения в обобщенном критериальном виде. Распространенными безразмерными критериями являются:

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

- число подобия Фурье  $Fo = \frac{a\tau}{L^2}$ ,

характеризующее обобщенное время;

- критерий Предводителя

$Pd = \frac{\omega L}{a}$  ( $\omega$  – циклическая частота тепловых волн), характеризующий распространение тепловых волн.

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

Введение в рассмотрение скрытых дефектов осложняет обобщенный анализ. В качестве соответствующих безразмерных параметров дефектов предложены следующие (см. п. 3.5 и 4.1):

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

размер прямоугольного дефекта в направлении координаты  $x$ ) – обобщенный размер дефекта в анизотропном изделии в направлении координаты  $x$ ;

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

ловое сопротивление дефекта;

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

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

При экспериментальном определении параметров ТК (решении обратной задачи) следует 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 идентификация невозможна;

3) многопараметрические задачи идентификации решают путем минимизации функционала, который формируют как разность между совокупностью экспериментальных данных, развивающихся во времени, и соответствующими теоретическими решениями; в такой процедуре 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 с точки зрения ТК основным отличием многомерных задач от одномерных является возможность учитывать диффузию тепла в материале объекта контроля вокруг дефектов конечных размеров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

3.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ КООРДИНАТАХ

Тепловой НК имеет дело с нестационарной поверхностной температурой  $T(\tau)$ , которая в тепловизионном варианте метода описывается *пиксельной* функцией  $T(i, j, \tau)$ . На рис. 3.1, а показано изменение температуры на поверхности стальной пластины при нагреве импульсом Дирака, а также импульсом длительностью 0,01 с. Кривые обоих процессов практически совпадают, подтверждая, что в дан-

ном случае длительностью нагрева можно пренебречь.

Функцию  $T(i, j, \tau)$  часто представляют в модифицированных координатах, что позволяет:

- 1) снизить динамический диапазон сигнала;
- 2) выявить характерные точки (максимума, перегиба и т.п.), которые целесообразно использовать для решения обратных задач;
- 3) облегчить применение ряда алгоритмов обработки данных, например, методом полиномиальной аппроксимации.

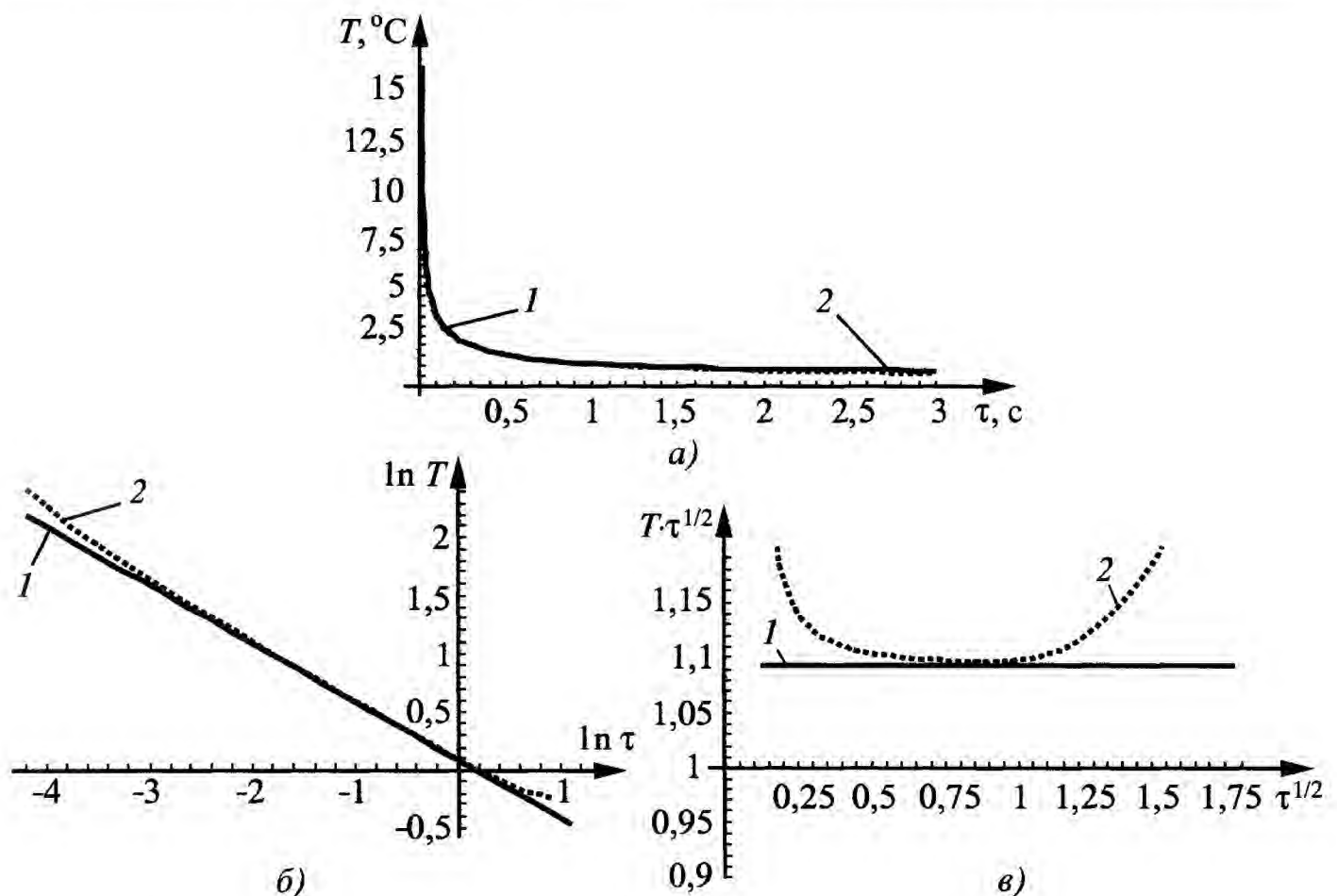


Рис. 3.1. Математическая модель адиабатического нагрева образца из стали AISI-304 ( $a = 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) импульсом Дирака ( $W = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{м}^2$ , кривая 1) и прямоугольным импульсом ( $Q = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,  $\tau_h = 0,01 \text{ с}$ , кривая 2):  
 а – изменение температуры во времени (кривая  $T-\tau$ ); б –  $\ln(T) - \ln(\tau)$ ; в –  $T\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau}$

Различие в динамике температуры становится заметным в логарифмических координатах  $\ln(T) - \ln(\tau)$  на рис. 3.1, б, введение которых подсказано решением задачи адиабатического нагрева полупространства импульсом Дирака (см. п. 3.2). В случае полуограниченного адиабатического тела соответствующая зависимость выражается строго прямой линией с наклоном  $-0,5$ . Конечная длительность импульса приводит к отклонению от прямой в начале процесса, между тем как в конце процесса начинает сказываться конечная толщина пластины.

Более резкое различие между двумя процессами наблюдается в координатах  $T\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau}$  (рис. 3.1, в). Еще один вариант представления температурной функции в координатах  $T\tau^{1/3} - \tau$  будет описан в п. 3.7.6.

На рис. 3.2 логарифмическое представление функции  $T(\tau)$  помогает интерпретировать результаты ТК теплозащитного покрытия турбинной лопатки. Видно, что в логарифмических координатах расслоение между покрытием и лопаткой приводит к особенно заметному различию в развитии дефектной и бездефектной температуры.

Использование полиномиальной аппроксимации "бездефектной" кривой рис. 3.2 проиллюстрировано на рис. 3.3.

На исходную температурную функцию  $T(\tau)$  наложен случайный температурный шум (рис. 3.3, а), после чего произведено преобразование системы координат (рис. 3.3, б). В логарифмических координатах целесообразно аппроксимировать зашумленную кривую полиномом некоторой степени, причем в бездефектной зоне достаточно линейной аппроксимации, поскольку кривая незначительно отклоняется от прямой. Наличие дефектов приводит к появлению значимых полиномиальных коэффициентов при нелинейных членах (в частности, на рис. 3.3, б показано представление двумя полиномиальными членами). Более подробно полиномиальная аппроксимация изложена в п. 6.10.1.

Подход к дискриминации дефектных и бездефектных участков объектов контроля по наклону температурных кривых в логарифмическом пространстве достаточно широко используется в ТК, даже если это требует импульсного нагрева и относительно коротких времен наблюдения. Для идентификации пикселей, характеризующихся прямыми линиями, можно использовать преобразование Хью (Hough transform), хорошо известное в теории распознавания образов. С помощью данного метода возможна идентификация параметрических кривых, таких как прямая линия, окружность и т.п.

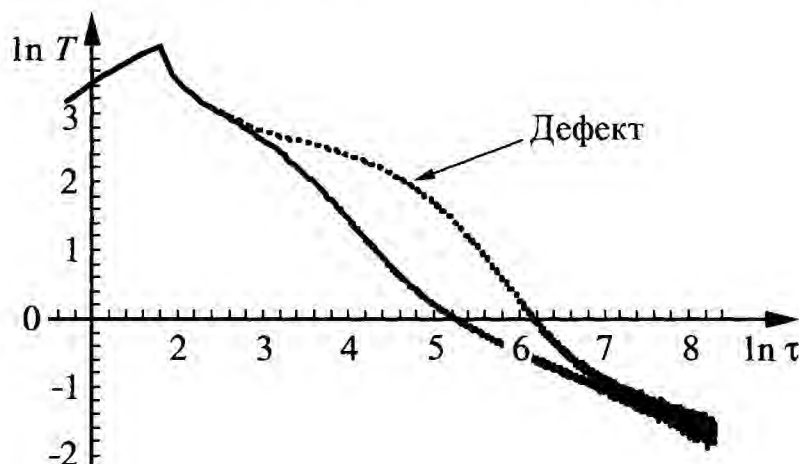


Рис. 3.2. Математическая модель адиабатического нагрева теплозащитного покрытия турбинной лопатки (импульс 5 мс, толщина покрытия 150 мкм, толщина расслоения 20 мкм)

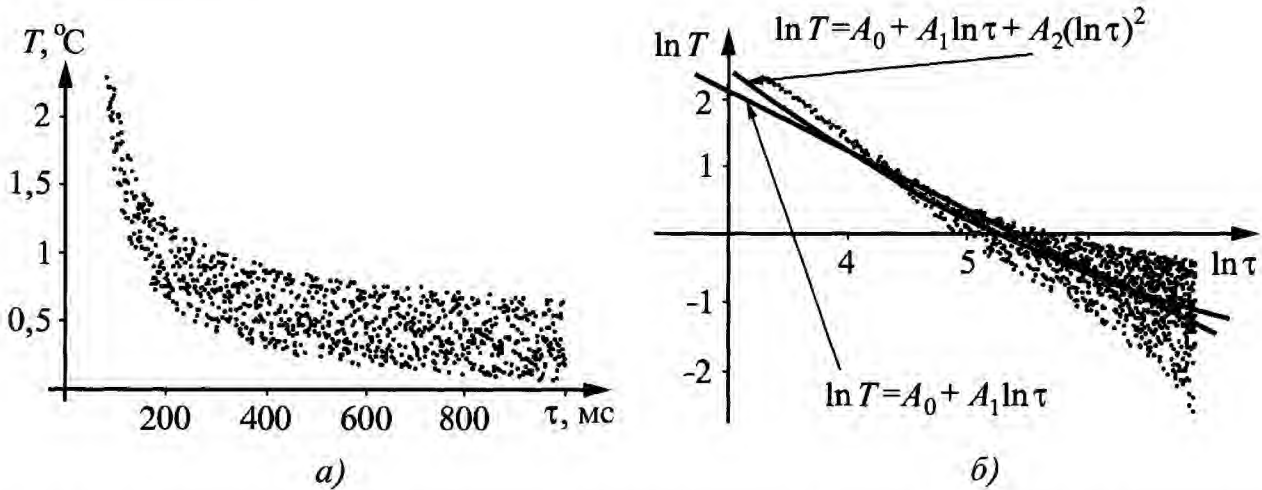


Рис. 3.3. Полиномиальная аппроксимация температурных функций (нагрев теплозащитного покрытия Рис. 3.2, дефект отсутствует, наложен белый шум амплитудой от  $-0,3$  до  $+0,3$  °C):  
 а –  $T-\tau$ ; б –  $\ln(T) - \ln(\tau)$

**3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ МАТЕРИАЛА (передняя поверхность полуограниченного тела, нагреваемого импульсом Дирака)**

Решение задачи нагрева полуограниченного тела импульсом Дирака имеет следующий вид (см. табл. 2.4)

$$T = \frac{W}{e\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \tag{3.1}$$

Уравнение (3.1) часто строят в координатах  $\ln(T) - \ln(\tau)$ , где оно выражается прямой линией (см. п. 3.1). В идеальном случае для любого момента времени  $\tau^*$  тепловую инерцию тела можно определить по поверхностной температуре тела и измеренной поглощенной энергии

$$e = \frac{W}{T(\tau^*)} \frac{1}{\sqrt{\pi\tau^*}} \tag{3.2}$$

Данный пример иллюстрирует тот факт, что, используя решение для полупространства, можно определить тепловую инерцию твердого тела в виде комплекса трех параметров ( $e = \sqrt{C\rho\lambda}$ ), но нельзя 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

$$\frac{e}{e_{ref}} = \frac{T_{ref}(\tau^*)}{T(\tau^*)} \tag{3.3}$$

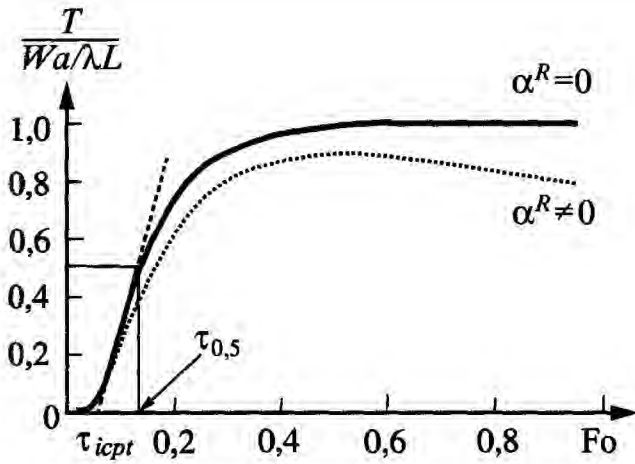
где индекс *ref* относится к эталону.

Далее мы покажем, как метод эталона применяют для обнаружения и оценки параметров подповерхностных дефектов.

**3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ (задняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака)**

В классической работе У. Паркера и соавторов [27] предложено измерять ряд ТФХ, прежде всего, температуропроводность, используя решение для нестационарной температуры на задней поверхности адиабатической пластины, нагреваемой на передней поверхности коротким тепловым импульсом (импульсом Дирака), см. табл. 2.5

$$\frac{T^R}{(Wa/\lambda L)} = \theta_D^R = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo} \tag{3.4}$$



**Рис. 3.4.** Изменение температуры на задней поверхности пластины, нагреваемой импульсом Дирака

График функции  $\theta_D^R$ , показанный на рис. 3.4, 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. пунктирную линию на рис. 3.4). Нарастающий фронт температурного отклика позволяет выделить ряд характерных точек, каждой из которых соответствует *характеристическое время* теплопередачи  $\tau^*$ , в частности:

- время достижения половины максимального значения  $\tau_{1/2}$ ;
- время максимума первой производной  $\tau_{m.d}$ ;
- время  $\tau_{icpt}$ , соответствующее точке пересечения прямой линии, проведенной через прямой участок кривой, с осью времени.

Для любого экспериментально измеренного времени  $\tau^*$  значение коэффициента температуропроводности можно определить из очевидного соотношения

$$a = Fo \frac{L^2}{\tau^*}, \quad (3.5)$$

где коэффициент  $Fo^*$  определяется из уравнения (3.4). Например:

$$\begin{aligned} Fo^* &= 0,1388 \text{ для } \tau_{1/2}; \\ Fo^* &= 0,0918 \text{ для } \tau_{m.d}; \\ Fo^* &= 0,04863 \text{ для } \tau_{icpt}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Преимуществом использования характеристического времени  $\tau_{m.d}$  является возможность определения температуропроводности в режиме реального времени, т.е. не дожидаясь момента наступления максимума температурной кривой, необходимого для вычисления  $\tau_{1/2}$ , а также более слабая зависимость  $\tau_{m.d}$  от интенсивности теплообмена с окружающей средой. Однако необходимость вычисления производной  $\partial T/\partial \tau$  для зашумленного сигнала влечет существенный рост высокочастотных шумов, что снижает эффективность метода по параметру  $\tau_{m.d}$ . Поэтому обычно применяют "классический" метод Паркера с использованием  $\tau_{1/2}$ .

*Метод Паркера*, или *импульсный метод* (Parker's method, flash method), обладает высокой точностью, благодаря чему он является доминирующим в зарубежных исследованиях по определению температуропроводности твердых тел. Существуют различные модификации метода, в которых точность измерений повышают за счет:

- 1) учета теплоотдачи на поверхностях объекта контроля;
- 2) более строгого обоснования выбора времени  $\tau^*$ ;
- 3) учета конечных размеров объекта контроля и т.п.

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



### 3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ (передняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака)

Для *передней* (нагреваемой) поверхности адиабатической пластины структура соответствующего импульсного решения (см. табл. 2.5) такова, что характерные точки на температурной кривой отсутствуют и определение ТФХ сложнее, чем при использовании решения для обратной поверхности. Кроме того, чувствительность этого решения, например, к изменениям теплопроводности, ниже, чем на задней поверхности. Более строгое сравнение обоих решений будет приведено в п. 3.7. В данном разделе рассмотрим применение метода *минимизации функционала*, называемого также методом *нелинейной подгонки* (см. п. 3.7.5 и главу 5), для снижения уровня экспериментальных шумов и оценки теплопроводности.

Общий подход к определению теплопроводности в односторонней процедуре описан в [28]. Сущность метода состоит в подгонке параметров одномерной теоретической модели под однопиксельные температурные функции  $T^F(i, j, \tau)$ , полученные в результате эксперимента (можно использовать соответствующую опцию программы MatLab). Принятая модель выражается следующими соотношениями:

$$T^F(\tau) = T_\infty \frac{1 + 2 \exp\left[\frac{-L^2}{a(\tau - \tau_{shift})}\right]}{\sqrt{\frac{\pi a(\tau - \tau_{shift})}{L^2}}}$$

$$\text{для } \tau \leq 0,62 \frac{L^2}{a};$$

$$T^F(\tau) = T_\infty \left[ 1 + \exp\left(-\frac{a\pi^2(\tau - \tau_{shift})}{L^2}\right) \right]$$

$$\text{для } \tau > 0,62 \frac{L^2}{a}, \quad (3.7)$$

где параметрами подгонки являются температура в конце процесса  $T_\infty$  и  $a/L^2$ , а параметр  $\tau_{shift}$  учитывает конечную длительность импульса (в принципе, его значение также может оцениваться в результате подгонки). Для известной толщины образца  $L$  можно оценить величину теплопроводности  $a$ .

Для случая нагрева импульсом Дирака теми же авторами предложена более простая модель [29]:

$$T^F = W \sqrt{a} \left( \frac{1 + 2e^{-L^2/(a\tau)}}{\lambda \sqrt{\pi\tau}} \right)$$

$$\text{для } \tau < 0,062 \frac{L^2}{a};$$

$$T^F = \frac{W}{CpL} \left( 1 + 2e^{-a\pi^2\tau/L^2} \right)$$

$$\text{для } \tau > 0,062 \frac{L^2}{a}. \quad (3.8)$$

Нелинейную подгонку производят по параметрам  $p_1 = a/L^2$  и  $T_\infty = W/(CpL)$ , используя запись уравнений (3.8) в виде:

$$T = T_\infty \left( \frac{1 + 2e^{-1/(p_1\tau)}}{\sqrt{\pi\tau p_1}} \right);$$

$$T = T_\infty \left( 1 + 2e^{-p_1\pi^2\tau} \right). \quad (3.9)$$

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЯ И СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ (передняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака)

В последние годы проявился интерес к определению остаточной толщины изделия, например, при оценке степени коррозии, путем анализа температурного отклика на передней поверхности.

При оценке коррозии представляет интерес не столько абсолютное значение

$L$ , сколько степень коррозии, выражаемая в относительном уносе материала  $\Delta L/L$ . Простая 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

$$\Delta T = T_d - T_{nd} = \frac{Wa}{\lambda l} - \frac{Wa}{\lambda L}, \quad (3.10)$$

откуда унос материала  $\Delta L = L - l$  можно оценить по простому соотношению

$$\frac{\Delta L}{L} = 1 - \frac{T_{nd}}{T_d}. \quad (3.11)$$

Для определения остаточной толщины пластины можно также применить метод нелинейной подгонки с использованием выражения (3.7). В этом случае температуропроводность материала считается известной и параметром подгонки является величина  $a/l^2$ .

Ниже будет описан подход, позволяющий уточнить формулу (3.11) с учетом диффузии тепла вокруг дефектов конечных размеров.

### 3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ (полуограниченное тело, нагреваемое импульсом Дирака)

Температуру полуограниченного адиабатического тела на глубине  $z$  определяют из соответствующего общего решения (см. табл. 2.4)

$$\frac{T}{Wa/\lambda z} = \frac{1}{\sqrt{\pi Fo_z}} e^{-1/4 Fo_z}, \quad (3.12)$$

где  $Fo_z = a\tau/z^2$ .

Феноменологически можно считать, что дефект в виде нарушения сплошности, расположенный на глубине  $z = l$ , будет обнаружен, если "сгусток" тепловой энергии, высвободившейся на поверхности, достигнет точки  $z$ , отразится от поверхности дефекта и вернется на поверхность. Анализируя производную  $\partial T/\partial \tau$  в формуле (3.12), можно увидеть, что максимальная температура на глубине  $l$  имеет место при  $\tau_l = l^2/2a$ . Тогда простой оценкой оптимального времени обнаружения подповерхностного дефекта является

$$\tau_m = 2\tau_l = l^2/a. \quad (3.13)$$

Границы применимости оценочной формулы (3.13), которая рекомендуется многими авторами, показаны ниже.

### 3.7. ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Функции чувствительности, получаемые на основе классических решений табл. 2.4 и 2.5, являются эффективным инструментом оценки возможности определения тех или иных параметров решений.

Введем функцию чувствительности в виде безразмерного параметра

$$S_p = \frac{\partial T/T}{\partial p_i/p_i}, \quad (3.14)$$

где  $p_i$  – некоторый параметр решения соответствующей теплофизической задачи, например, коэффициент температуропроводности  $a$  или толщина образца  $L$ .

Заметим, что время  $\tau$  также рассматривается как специфический параметр модели, который измеряют в ходе эксперимента, например, при определении температуропроводности по методу Паркера. Связь между любыми двумя параметрами

решения может быть получена, комбинируя соответствующие функции чувствительности. Например, связь погрешности определения времени процесса и изменения температуропроводности, дается выражением

$$\frac{\partial \tau / \tau}{\partial \alpha / \alpha} = S_{\alpha} / S_{\tau}. \quad (3.15)$$

Функцию чувствительности можно определить как для физических параметров  $\{\tau, \tau_h, Q(W), \alpha, \lambda, a\}$  – для полуограниченного тела и  $\{\tau, \tau_h, Q(W), \alpha, \lambda, a, L\}$  – для пластины), так и для комплексов  $\{Q'(W'), \theta\}$ .

Для любой функции чувствительности справедливо следующее выражение

$$S_p = \frac{\partial T / T}{\partial Q' / Q'} \frac{\partial Q' / Q'}{\partial p_i / p_i} + \frac{\partial T / T}{\partial \theta / \theta} \frac{\partial \theta / \theta}{\partial p_i / p_i}. \quad (3.16)$$

Использование комплексов  $Q'(W')$  и  $\theta$  позволяет анализировать тепловые процессы в обобщенном виде, однако на практике необходимо оценивать возможности определения конкретных физических параметров. Оба подхода будут проиллюстрированы ниже.

### 3.7.1. Полуограниченное тело

В табл. 2.5 содержатся 12 решений задач нагрева полуограниченного адиабатического и неадиабатического тела для ступенчатой, прямоугольной и импульсной функций нагрева. Для семи параметров этих решений  $\{\tau, \tau_h, Q(W), \alpha, \lambda, a\}$ , можно ввести 36 функций чувствительности, которые кратко описаны в табл. П1.1 Приложения 1. Таблица наглядно иллюстрирует преимущества адиабатических решений, которые характеризуются постоянными значениями функций чувствительности при ступенчатом и импульсном нагреве. При нагреве прямоугольным импульсом, только две функции чувствительности ( $S_{\tau}$  и  $S_{\tau_h}$ ) изменяются во вре-

мени, поэтому выводы о точности решения соответствующих обратных задач наиболее просты в случае адиабатического нагрева.

Функции чувствительности для полуограниченного неадиабатического тела приведены в явном виде в табл. П1.2, а соответствующие графики показаны на рис. П1.1. Номера графиков соответствуют номерам решений в табл. П1.1 и П1.2. Начальные точки графиков соответствуют адиабатическому случаю ( $\alpha^F = 0$ ).

### 3.7.2. Пластина

Решения для пластины дополнительно включают параметр толщины  $L$ . В данном случае ограничимся обобщенными производными, приведенными в табл. 2.5 вместе с исходными решениями. Графики обобщенных функций чувствительности приведены на рис. П1.2.

### 3.7.3. Определение степени коррозии

В п. 3.5 формула (3.11) оценки уноса материала стенки ( $\Delta L / L$ ) получена для квазистационарного режима. Влияние времени наблюдения температуры на эффективность оценки  $\Delta L / L$  можно проиллюстрировать с помощью соответствующей функции чувствительности, которая для адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака, имеет вид

$$\frac{\partial T / T}{\partial L / L} = -1 - 2 \frac{\partial T / T}{\partial Fo / Fo}. \quad (3.17)$$

График данной функции представлен на рис. 3.5. Видно, что вплоть до некоторого момента времени  $Fo^{(0)}$  процедура одностороннего ТК нечувствительна к изменению толщины пластины ( $Fo^{(0)} = 0,1238$  для 1 %-го порога); максимум чувствительности наступает в конце теплового процесса ( $Fo \approx 1$ ), т.е. в квазистационарном режиме, где справедлива формула инверсии (3.11). Как показано в [30], эта формула дает приемлемые результаты в



Рис. 3.5. Чувствительность температуры на передней поверхности адиабатической пластины к изменению толщины пластины

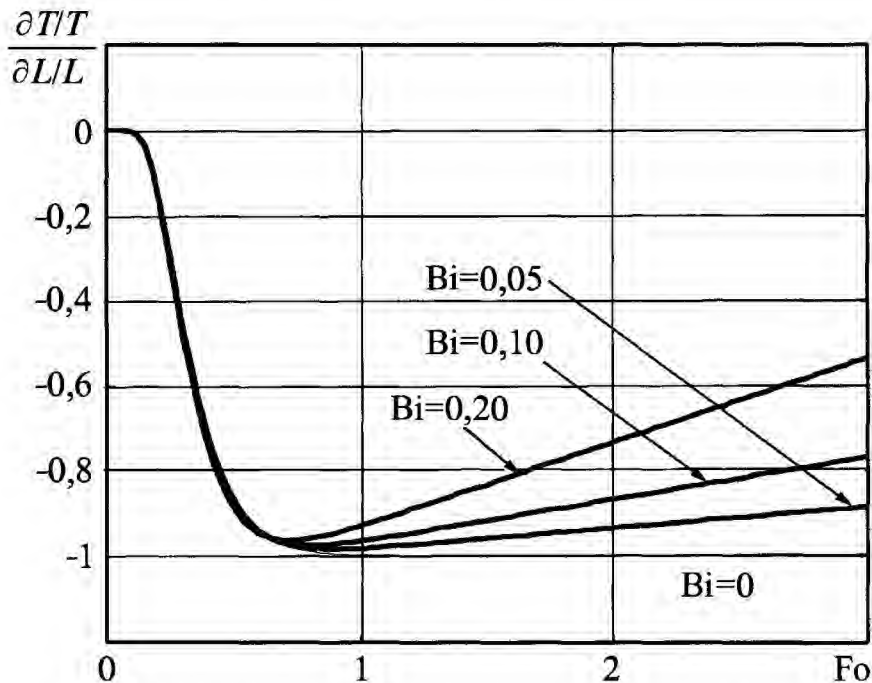


Рис. 3.6. Чувствительность температуры на передней поверхности неадиабатической пластины к изменению толщины пластины

квазиадиабатических случаях, например при контроле металлов, если время наблюдения находится в интервале  $Fo = 0,7...1$ . Если теплообменом на поверхности объекта контроля пренебрегать нельзя, точность оценок по формуле (3.11) снижается, что можно проиллюстрировать, используя "неадиабатические" функции чувствительности, графики которых показаны на рис. 3.6 для различных значений критерия Био  $Bi = \alpha L / \lambda$  (использовано соответствующее решение из табл. 2.5). Видно, что наилучшая точность оценки

толщины пластины имеет место при  $Fo \approx 1$ ; при больших временах наблюдения величина  $(\partial T / T) / (\partial L / L)$  уменьшается тем быстрее, чем больше  $Bi$ .

С. Маринетти и другие предложили учитывать эффект трехмерной диффузии тепла для коррозионных пятен диаметром  $D_d$  путем введения коэффициента  $k$ , представленного на рис. 3.7 в зависимости от  $D_d / L$  [31]. В диапазоне значений  $D_d / L = 1...6$  данный поправочный коэффициент выражается аналитически в виде:

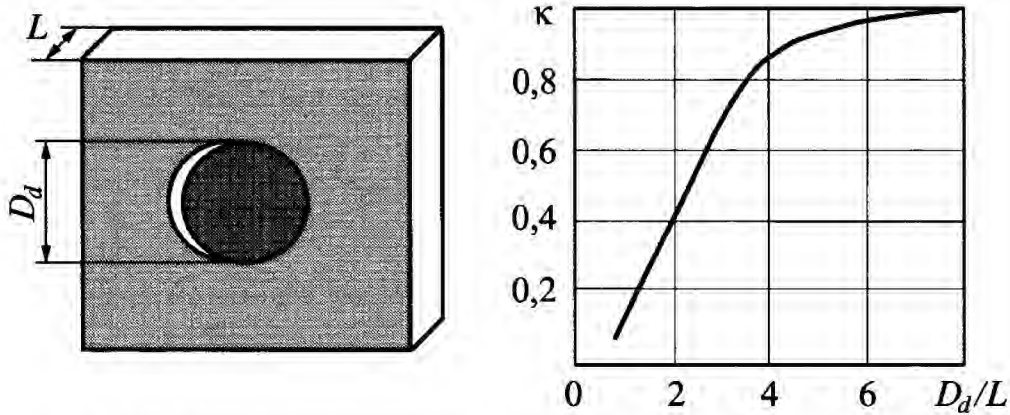


Рис. 3.7. Учет трехмерной диффузии тепла при оценке коррозии

$$k(D/L) = 0,8871 + 14,573e^{-0,4D/L} - 35,149e^{-0,5D/L} + 19,690e^{-0,6D/L} \quad (3.18)$$

Поскольку  $k$  был введен для фиксированного времени ( $Fo = 0,68$ ), то соответствующее выражение для оценки степени коррозии имеет вид

$$\Delta L/L = [1 - T_{nd}(Fo = 0,68)] / T_d(Fo = 0,68) / k(D/L) \quad (3.19)$$

Более строгий подход к оценке влияния диффузии тепла в поперечных направлениях на оценку коррозии будет представлен в Главе 4.

### 3.7.4. Определение температуропроводности

В п. 3.3 изложены основы импульсного метода определения температуропроводности по температурному отклику на задней поверхности пластины. Односторонняя процедура менее пригодна для этой цели в силу ряда факторов:

- 1) более слабой чувствительности температурного отклика на передней поверхности к изменениям температуропроводности;
- 2) отсутствия легко интерпретируемых характеристических точек;
- 3) большего влияния теплоотдачи в окружающую среду;
- 4) наличия отраженного от поверхности изделия излучения нагревателя,

создающего помехи при точных температурных измерениях.

Проиллюстрируем первое положение, сравнив соответствующие функции чувствительности для передней и задней поверхностей адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака:

$$S_a^F = 1 - \frac{2\pi^2 Fo \sum_{n=1}^{\infty} n^2 e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo}};$$

$$S_a^R = 1 - \frac{2\pi^2 Fo \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n^2 e^{-n^2 \pi^2 Fo}}{1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo}} \quad (3.20)$$

Изменение отношения  $S_a^R/S_a^F$  во времени показано на рис. 3.8. Видно, что в течение интересующего нас периода времени (до  $Fo \approx 0,6$ ) температурный отклик на задней поверхности пластины более чувствителен к изменениям температуропроводности, чем на передней поверхности, в частности, при  $Fo = 0,139$   $S_a^R/S_a^F = 4,5$ . Выравнивание значений  $S_a^R/S_a^F$  в конце теплового процесса объясняется прогревом всей массы пластины до температуры  $T \approx (Wa)/(\lambda L)$ .

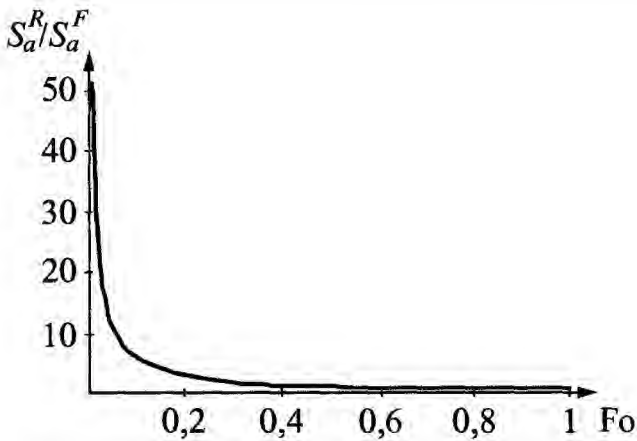


Рис. 3.8. Функции чувствительности при определении теплопроводности (адиабатическая пластина, нагреваемая импульсом Дирака)

При нагреве *прямоугольным* импульсом характеристические точки, например  $\tau_{1/2}$ , могут быть размещены и на кривой температурного отклика на передней поверхности. В качестве конкретного примера рассмотрим нагрев импульсом длительностью  $Fo_h = 0,05$  (рис. 3.9). На передней поверхности время достижения половины максимального значения  $\tau_{1/2}$  может быть определено как внутри им-

пульса нагрева ( $Fo^* = 0,0125$ ), так и на стадии охлаждения ( $Fo^* = 0,1048$ ), в то время как на задней поверхности температурный отклик характеризуется единственным значением  $\tau_{1/2}$  ( $Fo^* = 0,1646$ ). Функции чувствительности характеризуются следующими значениями:

$$\left(\frac{\partial T/T}{\partial a/a}\right)^F = 0,5 \text{ при } Fo^* = 0,0125;$$

$$\left(\frac{\partial T/T}{\partial a/a}\right)^F = -0,691 \text{ при } Fo^* = 0,1048;$$

$$\left(\frac{\partial T/T}{\partial a/a}\right)^R = 1,5325 \text{ при } Fo^* = 0,1646.$$

(3.21)

Примеры выше доказывают, что, помимо чисто практических трудностей, двухсторонний способ определения теплопроводности обеспечивает, по крайней мере, вдвое более высокую чувствительность по сравнению с односторонним.

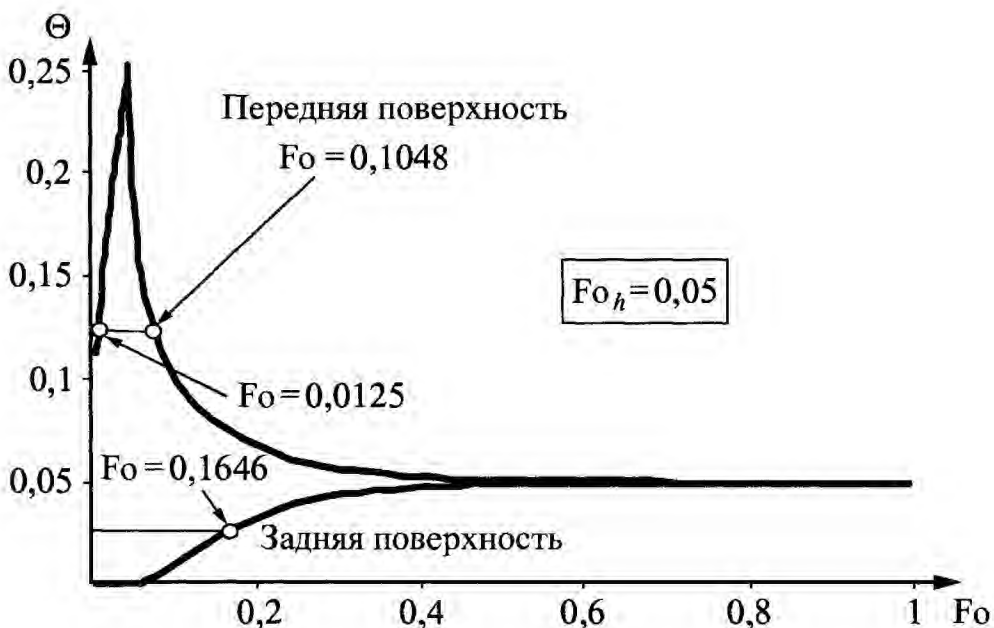


Рис. 3.9. Температурный отклик на поверхности адиабатической пластины (прямоугольный импульс,  $Fo_h = 0,05$ )

### 3.7.5. Разделение информации о температуропроводности и коэффициенте теплоотдачи

В односторонних процедурах определения ТФХ материалов коэффициент теплоотдачи на передней поверхности  $\alpha$  является шумовым фактором, причем точность его независимой оценки обычно низка. Например, оценивая температуропроводность по методу Паркера, мы фактически имеем дело с тремя неизвестными величинами, входящими в решение задачи нагрева пластины известной толщины  $L$  импульсом Дирака:  $W'$ ,  $a$  и  $\alpha$  (см. решение в табл. 2.5). Задачи математической физики такого типа, как правило, решают путем минимизации функционала (нелинейной подгонки) вида

$$\chi^2(p) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{T_n^{exp} - T_n^{theor}}{\sigma_n} \right)^2, \quad (3.22)$$

образованного квадратами разностей между экспериментальными (индекс "exp") и теоретическими (индекс "theor") значениями температуры в каждый  $n^{th}$  момент времени (всего  $N$  точек). Величина  $p$  в формуле (3.22) описывает набор искоемых функций  $\{W', a, \alpha\}$ . Примеры использования этого подхода в ТК, описанного также в главе 5, можно найти в [32, 33].

Решение задачи (3.22) методом наименьших квадратов сводится к отысканию такого набора  $p$ , который соответствует минимуму функции  $\chi^2$  в гиперпространстве признаков  $W', a, \alpha$ . Доверительные интервалы оценки  $p$  можно получить, аппроксимируя  $\chi^2$  параболической функцией и рассчитывая матрицу кривизны  $A$ , элементы которой определены следующим образом

$$A_{k,l} = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sigma_n} \left[ \frac{\partial T(\tau_n, p)}{\partial p_k} \frac{\partial T(\tau_n, p)}{\partial p_l} \right]. \quad (3.23)$$

Ковариационная матрица  $Cov$  аппроксимирующей функции имеет вид

$$Cov = A^{-1}, \quad (3.24)$$

где диагональные элементы представляют вариации (квадратические отклонения) искоемых параметров  $p$ .

Корреляционная матрица может быть найдена по формуле

$$Corr(i, j) = \frac{Cov(i, j)}{\sqrt{Cov(i, j) Cov(j, i)}}. \quad (3.25)$$

Рассмотрим измерение температуропроводности неадиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака. Величину  $a$  определяют путем наилучшей аппроксимации (non-linear best fitting) температурных функций на передней или задней поверхности. Будем считать, что основным шумовым фактором является интенсивность теплоотдачи на нагреваемой поверхности (на задней поверхности  $\alpha^R = 0$ ). Примем, что стандартное отклонение шума  $\sigma_n = 3\%$  от максимальной избыточной температуры на задней поверхности, причем шум воздействует одинаковым образом на значения температуры в любой момент времени, что, строго говоря, не всегда верно.

На рис. 3.10 показано поведение коэффициента корреляции между параметрами  $a$  и  $Bi = (\alpha L)/\lambda$  во времени, рассчи-

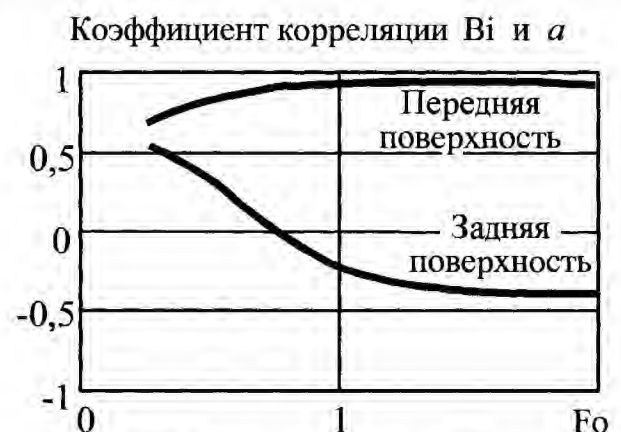


Рис. 3.10. Корреляция между  $Bi(\alpha)$  и  $a$  для неадиабатической пластины ( $Bi = 0,0025$ ;  $\sigma_n = 3\%$ ; с разрешения С. Маринетти)

танное по формуле (3.25) для  $Bi = 0,0025$ . Видно, что на передней поверхности коэффициент корреляции близок к единице, что означает практическую невозможность разделения информации об  $a$  и  $\alpha$ , за исключением начального момента времени, когда поверхностная теплоотдача незначительна. Для задней поверхности, процедура измерения теплопроводности, например, методом Дирака, слабо зависит от теплоотдачи на передней поверхности. Более того, существует определенный момент времени, когда измерение  $\alpha$  наиболее целесообразно (точка пересечения с нулевой осью).

### 3.7.6. Манипуляции с функцией температурного отклика на передней поверхности пластины

Выше упоминалось, что одной из трудностей анализа температурного отклика передней поверхности пластины на стимуляцию импульсом Дирака является отсутствие в нем характеристических точек. Тем не менее, такие точки можно создать искусственно, т.е. путем соответствующего преобразования температурного сигнала. Более того, в Главе 4, посвященной тепловой дефектометрии, мы увидим, что в функции температурного отклика передней поверхности изделия имеются характерные точки, обусловленные границами раздела сред между различными материалами, в частности, границами дефектов. Путем формирования некоторых комплексных параметров, можно подчеркнуть характерные точки, а их положение во времени использовать для определения глубины залегания границы раздела.

В настоящем разделе в качестве примера рассмотрим искусственную функцию, образованную произведением кубического корня из времени на основную функцию температуры

$$\Theta' = Fo^{1/3} \Theta_D^F, \quad (3.26)$$

которая характеризуется минимумом при  $Fo^* = 0,2656$  (см. рис. 3.11). Очевидно,

что, находя этот минимум путем соответствующей обработки экспериментальных данных, можно определить теплопроводность.

В качестве другого примера рассмотрим безразмерный параметр

$$K = \frac{T(\tau)}{\tau [\partial T / \partial \tau]}, \quad (3.27)$$

названный О.Ю. Троицким *показателем тепловой однородности образца* [34]. Физический смысл этого параметра связан с использованием регулярного режима нагрева, в ходе которого темп нагрева однородного изделия и, следовательно, производная от температуры по времени, остаются постоянными.

В работе [35] проанализировано поведение показателя тепловой однородности для следующих случаев адиабатического нагрева полуограниченного тела.

Нагрев импульсом Дирака с энергией  $W$

$$T = \frac{W}{e\sqrt{\pi\tau}}. \quad (3.28)$$

Нагрев прямоугольным импульсом:

$$T = \frac{W}{\tau_h e\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau}, \text{ если } \tau \leq \tau_h, \text{ и}$$

$$T = \frac{W}{\tau_h e\sqrt{\pi}} (\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau - \tau_h}), \text{ если } \tau > \tau_h. \quad (3.29)$$

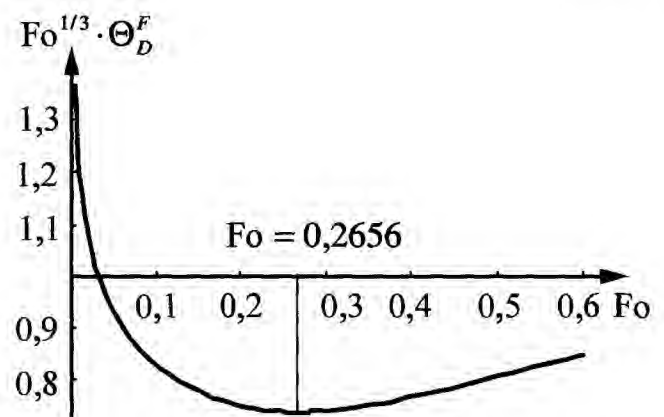
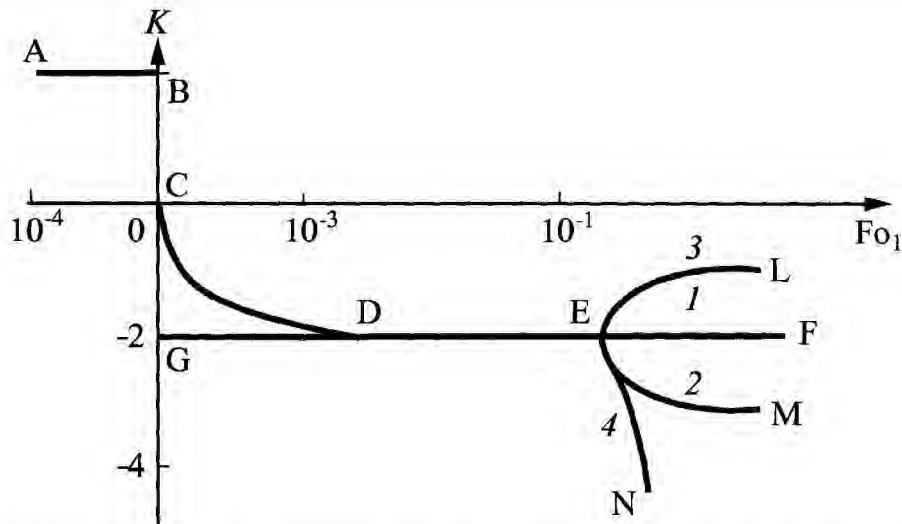


Рис. 3.11. Изменение функции  $Fo^{1/3} \Theta_D^F$  на передней поверхности пластины, нагреваемой импульсом Дирака





**Рис. 3.12.** Изменение показателя тепловой однородности во времени для образца сталь-алюминий, нагреваемого импульсом 90 мкс (адаптировано из [24]):  
 кривая 1 GDEF – полубесконечное тело из стали, импульс Дирака;  
 кривая ABCDEF – полубесконечное тело из стали, прямоугольный импульс;  
 кривая АВ – внутри "прямоугольного" импульса; кривая CD – влияние заднего фронта прямоугольного импульса; кривая 2 GDEM – тепловая инерция 1-го слоя выше, чем 2-го (импульс Дирака); кривая 3 GDEL – тепловая инерция 1-го слоя ниже, чем 2-го (импульс Дирака); кривая 4 GDEN – 1-й слой – адиабатический (импульс Дирака)

Нагрев импульсом Дирака покрытия на полуограниченном теле

$$T = \frac{W}{e\sqrt{\pi\tau}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^n \exp\left(-n^2 \frac{L_1^2}{a_1\tau}\right) \right]. \quad (3.30)$$

Выражения (3.28–3.29) напрямую следуют из табл. 2.4, а выражение (3.30) будет прокомментировано в п. 4.2.4;  $\Gamma = (e_1 - e_2)/(e_1 + e_2)$  – коэффициент отражения импульсной тепловой волны от границы двух слоев, индекс "1" относится к первому слою;  $L_1$  – толщина 1-го слоя.

Качественное поведение  $K$  с использованием формул (3.28 – 3.30) показано на рис. 3.12 для стальной пластины толщиной  $L_1 = 3$  мм, находящейся в идеальном тепловом контакте с основанием из алюминия, толщина которого принята бесконечно большой (начало координат соответствует окончанию импульса, длительность нагрева 90 мкс и  $Fo_1 = a_1\tau / L_1^2$ ).

В качестве ориентира для анализа выбрана точка перегиба E ( $Fo_1 = 0,13$ ), однако более корректен выбор момента

времени  $Fo_1 = 0,16$ , соответствующего началу регулярного режима, при котором температуру можно описать первым членом бесконечного ряда

$$T = \frac{W}{C_1\rho_1 L_1} \left[ 1 + 2A_1 \exp(-\pi^2 Fo_1) \right]. \quad (3.31)$$

Коэффициент  $A_1$  в выражении (3.31) можно исключить путем соответствующих преобразований, что позволяет определить ТФХ слоев. В течение времени  $Fo_1 < 0,25$  процесс теплопередачи происходит только в первом слое, поэтому, применяя для периода  $0,16 < Fo_1 < 0,25$  технику регрессионного анализа, получены следующие соотношения для определения ТФХ 1-го слоя [35]:

$$a_1 = -\frac{L_1 \ln F}{\Delta\tau\pi^2}; \quad \gamma_1 = C_1\rho_1 = \frac{W(1-F)}{L_1 D}; \quad \lambda_1 = a_1\gamma_1;$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N T_i \sum_{i=1}^N T_{i-1} - N \sum_{i=1}^N T_i T_{i-1}}{\left( \sum_{i=1}^N T_{i-1} \right)^2 - N \sum_{i=1}^N T_{i-1}^2};$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N T_{i-1} \sum_{i=1}^N T_i T_{i-1} - \sum_{i=1}^N T_i \sum_{i=1}^N T_{i-1}^2}{\left(\sum_{i=1}^N T_{i-1}\right)^2 - N \sum_{i=1}^N T_{i-1}^2} \quad (3.32)$$

Начало интервала для анализа данных ( $Fo_1 = 0,16$ ) выбирают на кривой поведения  $K$  как  $\tau = \tau_E + 0,23\tau_E$ , причем временной интервал должен соответствовать условию  $\Delta\tau = 0,7\tau_E / N$ .

Аналогичным образом, анализ температурной динамики при  $Fo_1 > 0,25$  позволяет определить "эффективные" значения ТФХ обоих слоев:  $a_{12}, \gamma_{12}, \lambda_{12}$ , после чего ТФХ 2-го слоя оценивают по выражениям:

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_{12} - (1-m)\gamma_1}{m};$$

$$\lambda_2 = \frac{m}{1/\gamma_{12} - (1-m)/\lambda_1}; a_2 = \frac{\lambda_2}{\gamma_2} \quad (3.33)$$

где  $m = L_2 / (L_1 + L_2)$  и  $L_2$  – толщина второго слоя.

Способность производных подчеркивать особые точки функций использована в методе *синтетической обработки данных*, разработанном фирмой Thermal Wave Imaging (США), см. п. 6.10.3. Установлено, что вторая производная от темпе-

ратурной функции  $T^F(\tau)$  на передней поверхности адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака, характеризуется максимумом  $\tau_{2nd\ der}$ , который отвечает условию (патент США № 6516084):

$$\tau_{2nd\ der} = \frac{L^2}{\pi a} \quad (3.34)$$

Иными словами, максимуму второй производной соответствует число Фурье  $Fo_{2nd\ der} = 1/\pi = 0,31831$ . Графическая иллюстрация этого способа приведена на рис. 3.13.

При экспериментальной реализации описанных выше способов следует иметь в виду, что операции деления и дифференцирования могут существенно ухудшать отношение сигнал/шум, поэтому зашумленные функций  $T(\tau)$  следует сглаживать, например, с помощью полиномов. Заметим, что сделать обобщенный вывод о максимальном числе слоев, "разрешаемых" описанными выше методами, затруднительно.

### 3.7.7. Оценка предельной чувствительности теплового метода при определении ТФХ

Используя концепцию функций чувствительности, легко оценить, какие минимальные изменения ТФХ могут быть

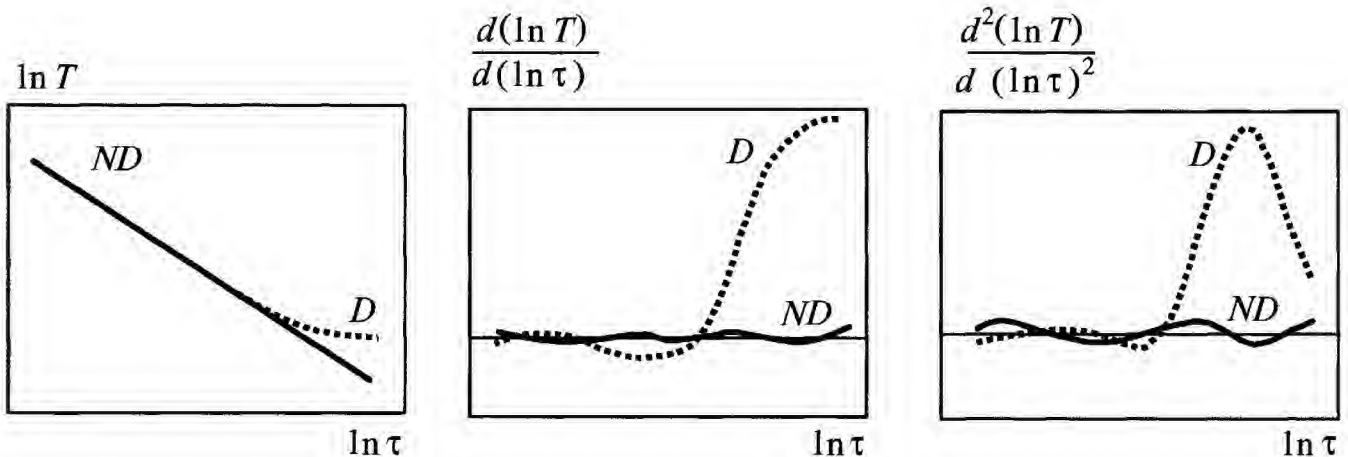


Рис. 3.13. Изменение "логарифмической" температуры и ее производных во времени (адаптировано из [65])

надежно зафиксированы (измерены) с помощью метода ИК термографии. Например, для задней поверхности адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака, значение функции чувствительности по теплопроводности при  $Fo_{1/2} = 0,139$  составляет

$$S_a^R = \frac{\partial T/T}{\partial a/a} (Fo = 0,139) = 2,3. \quad (3.35)$$

Следуя методике, предложенной в [36], предельную чувствительность ТК определяют для отношения сигнал/шум, равного единице. ИК аппаратура, предназначенная для измерения температуры, характеризуется паспортным температурным разрешением  $\Delta T_{res}$ , которое для коммерческих тепловизоров обычно составляет  $0,05 \dots 0,1$  °С. Для исследовательских ИК пирометров  $\Delta T_{res}$  может в принципе достигать  $0,001$  °С, хотя эксперименты с таким уровнем чувствительности требуют термостатирования объекта контроля, поэтому значение  $\Delta T_{res} \sim 0,01$  °С может считаться предельным. Минимальное относительное изменение теплопроводности, которое может быть оценено с использованием вышеуказанной аппаратуры, составляет

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta T_{res} / T}{2,3}, \quad (3.36)$$

где  $T$  – избыточная температура образца в момент времени  $\tau_{1/2}$ , пропорциональная "закачанной" в образец энергии  $W(Q)$  и обратно пропорциональная толщине образца.

Например, при тепловизионном определении ТФХ композиционных материалов, характерные значения вышеуказанных параметров составляют:  $\Delta T_{res} = 0,1$  °С,  $T = 3 \dots 30$  °С. Следовательно, предельная чувствительность равна  $\Delta a/a = 0,14 \dots 1,4$  %. Таким образом, если чувствительность определения ТФХ ограничена только температурным разрешением аппарату-

ры, ее можно повысить, увеличивая мощность нагрева или исследуя более тонкие образцы.

В разделе книги, описывающей шум, мы покажем, что на практике пороговую чувствительность теплового контроля целесообразно характеризовать шумовым значением текущего температурного контраста  $C_n = (\Delta T/T)_{noise}$ . Например, для углепластиковых композитов  $C_n \sim 4$  %, и, следовательно, реалистическая пороговая чувствительность в этом случае будет  $\Delta a/a \sim 1,7$  %.

### 3.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

Температуропроводность материала, как и теплопроводность, является тензорной величиной. На практике чаще всего рассматривают *ортотропные* (orthotropic) материалы, характеризующиеся тремя компонентами этого тензора, один из которых  $a_z$  направлена в глубь материала, а два других  $a_x$  и  $a_y$  являются планарными. Классические процедуры ТК, например, по методу Паркера, обычно связаны с определением  $a_z$ , однако расширяющееся применение анизотропных композиционных материалов требует оценки двух других компонент. Очевидно, что для этого необходимо создавать в материале тепловые потоки, распространяющиеся в поперечных направлениях. Применяют точечный, полосовой и "случайный" нагрев, а расшифровку проводят с использованием аппарата преобразования Фурье. Процедура нагрева линейчатым источником тепла детально исследована Ж. Крапэ и др. [37].

Схема эксперимента представлена на рис. 3.14. Плоское изделие нагревают с помощью импульсной лампы, перед которой размещают щелевую маску, создающую полосовое поле нагрева. Температуру изделия регистрируют на задней поверхности с помощью тепловизора. Постановка неадиабатической краевой

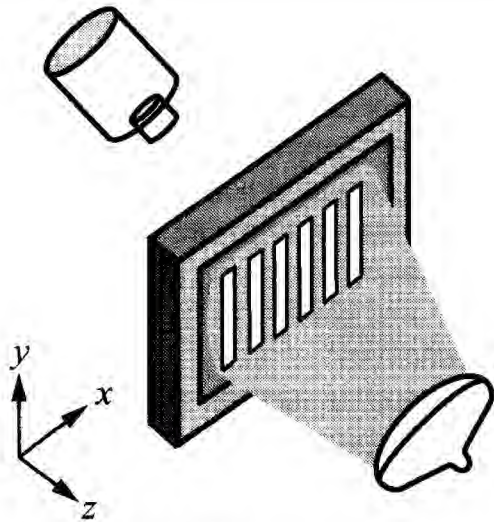


Рис. 3.14. ИК термография с использованием щелевой маски

задачи предполагает разделение функции нагрева на две составляющие  $Q(x, y)Q_z(z)$ :

$$\begin{aligned} \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_z(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right]; \\ T(x, y, z, \tau = 0) &= Q(x, y) Q_z(z) / \rho C; \\ -\lambda_z \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} &= -\alpha^F T(x, y, z=0, \tau); \\ -\lambda_z \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} &= \alpha^R T(x, y, z=L, \tau). \end{aligned} \quad (3.37)$$

Задача решается применением преобразования Лапласа ко времени и преобразования Фурье к поперечным координатам  $x$  и  $y$

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\omega_x, \omega_y, z, p) &= \int_{\tau'=0}^{\tau'=\infty} \int_{x'=-\infty}^{x'=\infty} \int_{y'=-\infty}^{y'=\infty} T(x', y', z, \tau) \times \\ &\times e^{i\omega_x x'} e^{i\omega_y y'} e^{-p\tau} d\tau' dy' dx', \end{aligned} \quad (3.38)$$

что приводит к уравнению

$$\begin{aligned} (\rho C p + \lambda_x \omega_x^2 + \lambda_y \omega_y^2) \tilde{T} - \tilde{Q} Q_z(z) &= \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_z(z) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Пусть  $T_z(z, \tau)$  есть решение одномерной задачи равномерного нагрева пластины с теплопроводностью  $\lambda_z(z)$  потоком  $Q_z(z)$ . Используя сдвиговое свойство преобразования Лапласа, получаем

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) &= \tilde{Q}(\omega_x, \omega_y) \times \\ &\times T_z(z, \tau) e^{-a_x \omega_x^2 \tau - a_y \omega_y^2 \tau}. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Из (3.40) следует, что для нулевых пространственных частот  $\omega_x = \omega_y = 0$  и любой координаты  $z$  двойное пространственное преобразование Фурье, включающее пространственные интегралы по  $x$  и  $y$ , характеризуется таким же изменением во времени как температура, обусловленная равномерным нагревом с помощью потока  $Q_z(z)$ . Этот вывод также справедлив и для ограниченной пластины с теплоизолированными краями.

Отметим, что, если  $a_z(z)$  есть величина постоянная, а величина  $Q_z(z)$  описывает импульс Дирака, то к функции  $\tilde{T}(0, 0, \tau)$  на задней поверхности применимы процедуры определения температуропроводности, описанные ранее, например, метод Паркера.

Базовое выражение для определения компонент температуропроводности можно получить из (3.40), исключая  $T_z$

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau) &= \\ = \tilde{Q}(\omega_x, \omega_y) / \tilde{Q}(0, 0) e^{-a_x \omega_x^2 \tau - a_y \omega_y^2 \tau}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Важным свойством уравнения (3.41) является то, что оно справедливо в отсутствие теплоотдачи для любого значения  $z$ , в том числе на передней и задней поверхностях изделия. Более того, его применение не требует нагревать изделие на поверхности, поэтому формулу (3.41) можно применять и для полупрозрачных материалов.

Линейчатый нагрев, изображенный на рис. 3.14, обуславливает периодическое изменение температуры по одной из координат, например, по  $x$ , с периодом  $\Delta$ . Температуру интегрируют вдоль координаты  $y$  в пределах от  $-Y$  до  $+Y$ , а преобразование Фурье применяют по координате  $x$  для целого числа периодов  $n\Delta$  (начало оси координат располагают таким образом, чтобы функция периодического нагрева была четной и имела максимум при  $x = 0$ )

$$\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) = \frac{1}{n\Delta} \frac{2}{2Y} \int_{x'=0}^{x'=n\Delta} \int_{y'=-Y}^{y'=+Y} T(x', y', z, \tau) \times \cos(\omega_x x') dy' dx'. \quad (3.42)$$

Для определения  $a_x$  можно использовать следующее линейное соотношение

$$\ln \left[ \tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau) \right] = \ln \left[ \tilde{Q}(\omega_x, 0) / \tilde{Q}(0, 0) \right] - a_x \omega_x^2 \tau. \quad (3.43)$$

Последнее выражение также справедливо и на задней поверхности изделия ( $z = 0$ ). Кроме того, благодаря периодическому характеру изменения температуры по координате  $x$ , наибольший интерес представляет циклическая частота  $\omega_x = 2\pi / \Delta$ .

Выполняя линейную регрессию функции  $\ln \left[ \tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau) \right]$ , можно по наклону прямой непосредственно определить  $a_x$ . Для определения  $a_y$  необходимо повернуть маску нагрева на  $90^\circ$  и повторить эксперимент.

Установлено, что точность оценки компонент тензора температуропроводности с использованием вышеописанного метода возрастает по мере увеличения так называемого *коэффициента теплового отношения* (thermal aspect ratio)

$$A = \Delta / L \sqrt{a_z / a_x}. \quad (3.44)$$

Целесообразно увеличивать  $A$  до 4...5, после чего повышение точности становится несущественным [37].

И. Филиппи и другие описали случай произвольного нагрева [38], сделав акцент, как и в работе [37], на двухстороннюю процедуру.

П. Бизон и другие модифицировали данный алгоритм, распространив его на одностороннюю процедуру [39]. Решалась следующая задача нагрева неадиабатического полуограниченного тела импульсом Дирака  $\delta(\tau)$  с энергией  $W$  и произвольным пространственным распределением  $f(x, y)$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}; \\ -\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} &= W \delta(\tau) f(x, y) - \alpha T(x, y, z=0); \\ \iint_{surf} f(x, y) dx dy &= 1. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Применяя преобразование Лапласа ко времени и преобразование Фурье к координатам  $x$  и  $y$ , преобразуем задачу к виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial z^2} + \sigma^2 \tilde{T} &= 0; \quad \sigma = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + p/a}; \\ -\lambda \frac{\partial \tilde{T}(z=0)}{\partial z} &= W \Phi(\omega_x, \omega_y) - \alpha \tilde{T}(z=0), \end{aligned} \quad (3.46)$$

где  $\Phi(\omega_x, \omega_y)$  – Фурье-образ функции  $f(x, y)$ .

Решение задачи (3.46) имеет вид

$$\tilde{T} = \frac{W\Phi}{\lambda\sigma + \alpha} e^{-\sigma z}. \quad (3.47)$$

Осуществляя обратный переход из области Лапласа с использованием соот-

ветствующих таблиц, получаем решение для поверхностной Фурье-температуры как функции времени и частот Фурье:

$$\begin{aligned} \overline{T}(\omega_x, \omega_y, z=0, \tau) &= \frac{W\Phi(\omega_x, \omega_y)}{\lambda} e^{-a(\omega_x^2 + \omega_y^2)\tau} \times \\ &\times \left[ \sqrt{\frac{a}{\pi\tau}} - \frac{\alpha a}{\lambda} e^{(\alpha/\lambda)^2 a\tau} \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.48)$$

Решение (3.48) является общим и представляет собой Фурье-образ поверхностной температуры, экспоненциально спадающей с течением времени, увеличением теплопроводности и квадрата Фурье-частоты.

Член решения, зависящий от времени и координаты  $z$ , можно исключить, используя тот же прием, что и при выводе уравнения (3.41), при этом также устраняется влияние поверхностного теплообмена. Тогда для  $z = 0$  имеем

$$\begin{aligned} \frac{\overline{T}(\omega_x, \omega_y, z=0, \tau)}{\overline{T}(\omega_x=0, \omega_y=0, z=0, \tau)} &= \\ &= \frac{\Phi(\omega_x, \omega_y)}{\Phi(\omega_x=0, \omega_y=0)} e^{-a(\omega_x^2 + \omega_y^2)\tau}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Процедура идентификации анизотропной теплопроводности начинается с интегрирования температуры по координате, ортогональной исследуемому направлению. В частности, при определении  $a_x$  в каждый момент времени суммируют все температуры по координате  $y$ , в результате чего получают изменение во времени профиля температуры по координате  $x$ .

Приводя решение (3.49) к логарифмическому виду, экспериментальную функцию, находящуюся в левой части уравнения (3.49), аппроксимируют прямой линией, наклон которой и выражает искомую компоненту теплопроводности, умноженную на квадрат вы-

бранной Фурье-частоты. Значение Фурье-частоты определяют, зная истинный размер пикселя.

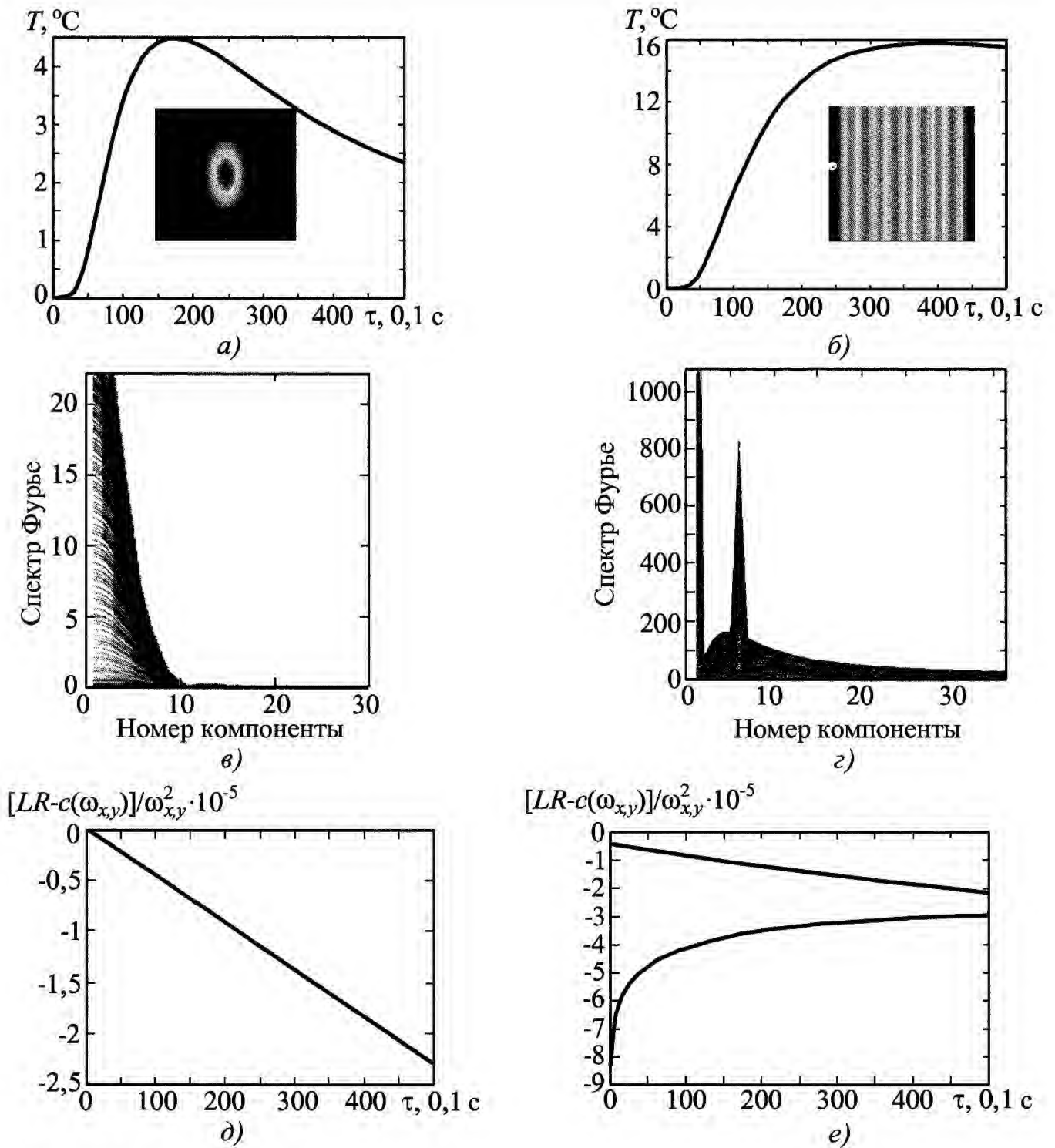
Таким образом, процедура идентификации  $a_x$  выражается формулой

$$\begin{aligned} \ln \left[ \frac{\overline{T}(\omega_n, \tau)}{\overline{T}(0, \tau)} \right] &= c(\omega_n) - a\omega_n^2 \tau; \\ \omega_n &= \frac{2\pi n}{N\Delta x}; \quad n = 0 \dots N-1, \end{aligned} \quad (3.50)$$

где  $N$  – число пикселей вдоль выбранной строки;  $\Delta x$  – размер пикселя;  $c$  – константа, независимая от времени.

Графическая иллюстрация описываемого способа показана на рис. 3.15. Нагрев через квадратную маску размером  $10 \times 10$  мм углепластика толщиной 5 мм с мононаправленным расположением волокон приводит к температурному распределению на стороне, противоположной нагреву, согласно рис. 3.15, а. Изменение температуры во времени показано на рис. 3.15, б в виде графика температуры в центральной точке и вдоль строки. Следует отметить, что анализируется начальная стадия процесса, поскольку температура задней поверхности не достигла максимума.

Расширение температурного профиля во времени вследствие диффузии тепла иллюстрируется рис. 3.15, в. Поведение температуры в логарифмических координатах является вполне классическим (рис. 3.15, г). Спектр Фурье, изображенный на рис. 3.15, д, обнаруживает нулевую компоненту на 11-й частоте (1-я частота – нулевая), поэтому определенное по логарифмическим кривым типа рис. 3.15, г значение теплопроводности является постоянным за исключением 11-й частоты (рис. 3.15, е), на которой восстановленное значение  $a$  существенно отличается от истинного.



**Рис. 3.15.** Определение "поперечных" компонент теплопроводности углепластика (образец 100×100 мм, задняя поверхность, нагрев импульсом 0,1 с):

*a, в, д* – квадратная маска 10×10 мм heating; *б, г, e* – щелевая маска, 5 щелей;  
*a, б* – температурное распределение и изменение температуры центральной точки во времени;  
*в, г* – спектр Фурье; *д, e* – изменение "логарифмической" температуры во времени

### 3.9. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ НАГРЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН

В рамках аналитического подхода оптимальными для решения задач нестационарного ТК являются многослойные

модели. Моделью структуры из двух материалов, соединенных связующим материалом, может служить трехслойная пластина, в которой средний слой поочередно представляет либо связующий материал, либо дефект. При этом величину темпера-

турного сигнала от дефекта рассчитывают как разность двух решений, первое из которых соответствует бездефектной области, а второе – дефектной.

**3.9.1. Трехслойная неадиабатическая пластина с идеальным контактом слоев**

Модель описывает емкостные дефекты (рис. 3.16). Ее математическая постановка одинакова для бездефектной и дефектной областей:

$$a_i \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad i = 1 \dots 3;$$

$$z = 0 \dots L; \quad \tau > 0; \quad (3.51a)$$

$$T(z, \tau = 0) = 0; \quad (3.51б)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(z=0, \tau)}{\partial z} = Q(\tau) - \alpha^F T_1(z=0, \tau); \quad (3.51в)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(z=L, \tau)}{\partial z} = \alpha^R T_3(z=L, \tau); \quad (3.51г)$$

$$\lambda_j \frac{\partial T_j(z=l_j, \tau)}{\partial z} = \lambda_{j+1} \frac{\partial T_{j+1}(z=l_j, \tau)}{\partial z}; \quad j = 1-2; \quad (3.51д)$$

$$T_j(z=l_j, \tau) = T_{j+1}(z=l_j, \tau); \quad j = 1-2. \quad (3.51е)$$

$$(3.51)$$

Здесь: уравнение (3.51а) – одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа; (3.51б) – начальное условие (НУ); (3.51в) – ГУ на передней (нагреваемой) поверхности; (3.51г) – ГУ на задней поверхности; (3.51д) и (3.51е) – 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  $T_{sf}$  позволяет получить решения для нагрева импульсом Дирака ( $T_D$ ) и прямоугольным импульсом ( $T_{sp}$ ):

$$T_D(\tau) = \frac{\partial T_{sf}(\tau)}{\partial \tau};$$

$$T_{sp}(\tau, \tau_h) = T_{sf}(\tau) - T_{sf}(\tau - \tau_h). \quad (3.52)$$

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

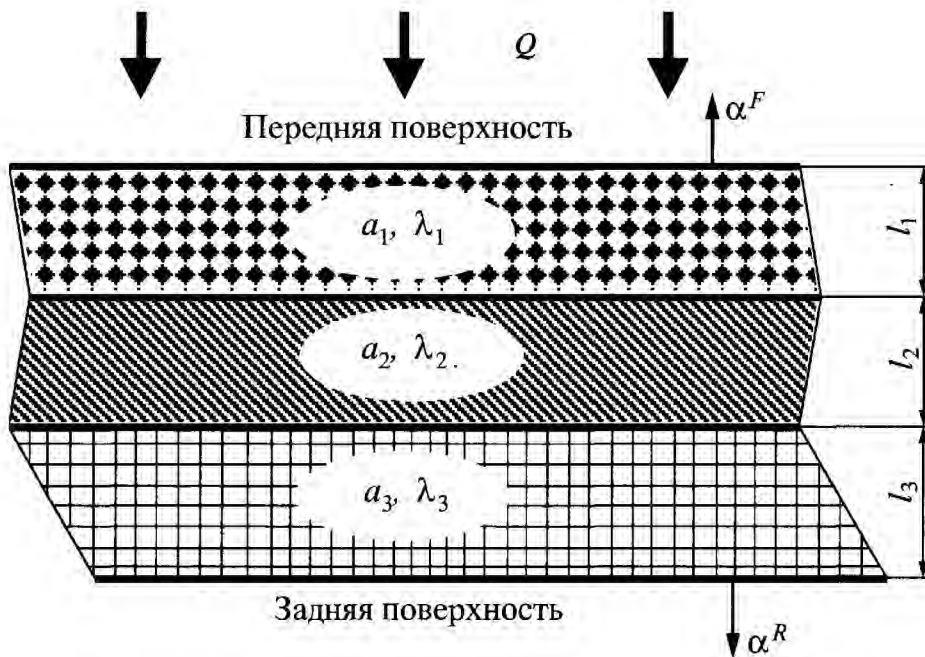


Рис. 3.16. Трехслойная модель ТК (емкостные дефекты)



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

причем

$$\int_0^{\infty} \varphi(\tau') d\tau' = 1. \quad (3.53)$$

На практике часто используют решение для нагрева прямоугольным импульсом, которое легко трансформируется в случай нагрева мгновенным импульсом, а также в случай непрерывного нагрева.

Трехслойная модель (3.51) является весьма общей, 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  $\Delta T(\tau)$  всех параметров процесса, за исключением поперечных размеров дефектов. Одномерная модель вида (3.51) непригодна для моделирования нагрева тел локализованным (сканирующим или неподвижным) источником тепла, хотя при наличии пучка нагрева достаточно большого диаметра (по сравнению с толщиной изделия) реалистические оценки могут быть получены и в этом случае.

Решения многослойных задач в явном виде требуют трудоемких вычислений, из которых достаточно нетривиальной является необходимость вычислять корни сложных трансцендентных уравнений. Поскольку для этого используют компьютеры, преимущества подобных аналитических решений становятся мало значимыми по сравнению с весьма 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-х в аналитическом виде теоретически возможен, но практически весьма труден из-за громоздкости получающихся выражений. В этих случаях тем более рекомендуется применять численные методы. В то же время сле-

дует отметить, что при наличии в теле нескольких тепловых барьеров, т.е. зон контакта различных материалов, односторонним методом удастся исследовать только 2...3 барьера, наиболее близко расположенных к передней поверхности. Для выявления глубоколежащих дефектов следует применять двухстороннюю процедуру ТК.

Решение задач нагрева многослойных адиабатических пластин удобно выполнять с помощью метода "теплого четырехполюсника", теория которого и соответствующие компьютерные программы описаны в [26]. При этом часто ограничиваются анализом решений в области Лапласа без перехода в область оригиналов. Применение этого метода для решения задач тепловой дефектометрии будет описано в п. 5.5.

Для иллюстрации громоздкости "многослойных решений" приведем точное решение трехслойной задачи в постановке (3.51) для функции нагрева в виде прямоугольной ступеньки (рис. 3.16):

$$T(z=0, \tau) = A_0 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 a_1 \tau / l_1^2};$$

$$T(z=L, \tau) = D_0 - \sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{-\mu_n^2 a_1 \tau / l_1^2};$$

$$A_0 = \Theta \frac{R}{R_1}; \quad D_0 = \frac{\Theta}{R_1};$$

$$R = 1 + \alpha^R \left( \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right); \quad R_1 = R + \frac{\alpha^R}{\alpha^F};$$

$$\Theta = \frac{Q}{\alpha^F}; \quad \Theta_s = \Theta \gamma_1;$$

$$A_n = D_n \left\{ B_1 \left[ \cos(\mu_n \eta_1) + \frac{\gamma_2}{\mu_n} \sin(\mu_n \eta_1) \right] + \right. \\ + B_2 \left[ \cos(\mu_n \eta_2) + \frac{\gamma_2}{\mu_n} \sin(\mu_n \eta_2) \right] + \\ + B_3 \left[ \cos(\mu_n \eta_3) + \frac{\gamma_2}{\mu_n} \sin(\mu_n \eta_3) \right] + \\ \left. + B_4 \left[ \cos(\mu_n \eta_4) + \frac{\gamma_2}{\mu_n} \sin(\mu_n \eta_4) \right] \right\};$$

$$D_n = \frac{2\Theta_s}{\mu_n \{ C_1 [(1 + \mu_0 + \zeta_1 \eta_1) \sin(\mu_n \eta_1) + \mu_n \eta_1 \times \rightarrow \\ \rightarrow \times (1 - \mu_0) \cos(\mu_n \eta_1) + C_2 [(1 - \mu_0 - \zeta_1 \eta_2) \times \\ \rightarrow \times \sin(\mu_n \eta_2) + \mu_n \eta_2 (1 + \mu_0) \cos(\mu_n \eta_2) - \\ \rightarrow - C_3 [(1 - \mu_0 - \zeta_3 \eta_3) \sin(\mu_n \eta_3) + \mu_n \eta_3 \times \\ \rightarrow \times (1 + \mu_0) \cos(\mu_n \eta_3) - C_4 [(1 + \mu_0 + \zeta_4 \eta_4) \times \\ \rightarrow \times \sin(\mu_n \eta_4) + \mu_n \eta_4 (1 - \mu_0) \cos(\mu_n \eta_4)] \}}; \quad (3.54)$$

$\mu_n$  – корень трансцендентного уравнения:

$$C_1 [\mu (1 - \mu_0) \sin(\mu \eta_1) - \zeta_1 \cos(\mu \eta_1)] + \\ + C_2 [\mu (1 + \mu_0) \sin(\mu \eta_2) + \zeta_2 \cos(\mu \eta_2)] - \\ - C_3 [\mu (1 + \mu_0) \sin(\mu \eta_3) + \zeta_2 \cos(\mu \eta_3)] - \\ - C_4 [\mu (1 - \mu_0) \sin(\mu \eta_4) - \zeta_1 \cos(\mu \eta_4)] = 0;$$

$$p_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}; \quad p_2 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_3}};$$

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_R l_1}{\lambda_1}; \quad \gamma_2 = \frac{\alpha_R l_1}{\lambda_3} \sqrt{\frac{a_3}{a_1}};$$

$$\zeta_1 = \gamma_1 + \gamma_2; \quad \zeta_2 = \gamma_2 - \gamma_1; \quad \mu_0 = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\mu^2};$$

$$C_1 = B_1 = \frac{(1 + p_1)(1 + p_2)}{4};$$

$$C_2 = B_2 = \frac{(1 - p_1)(1 + p_2)}{4};$$

$$-C_3 = B_3 = \frac{(1 + p_1)(1 - p_2)}{4};$$

$$-C_4 = B_4 = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{4};$$

$$\eta_1 = \frac{l_1 + l_2 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} + l_3 \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}}{l_1};$$

$$\eta_2 = \frac{l_1 - l_2 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} - l_3 \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}}{l_1};$$

$$\eta_3 = \frac{l_1 + l_2 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} - l_3 \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}}{l_1};$$

$$\eta_4 = \frac{l_1 - l_2 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} + l_3 \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}}{l_1};$$

$Q$  – плотность мощности нагрева, Вт/м<sup>2</sup>.

Решение (3.54), полученное операционным методом, использовано в программе Multilayer-3 ("Инновация", Россия). С его помощью были протестированы двух- и трехмерные численные решения, получаемые с помощью программ ThermoCalc-2D и ThermoCalc-3D ("Инновация").

### 3.9.2. 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.

Приведем решение для передней поверхности адиабатической трехслойной пластины, нагреваемой импульсом Дирака, полученное Д. Балажа и др. [18] (модель рис. 3.16 при  $\alpha^F = \alpha^R = 0$ ):

$$\frac{T_D(\tau, z = 0)}{T_m} = 1 + 2 \frac{\sum_{i=1}^4 \chi_i v_i}{\sum_{i=1}^4 \chi_i} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sum_{i=1}^4 \chi_i \cos(v_i \gamma_n)}{\sum_{i=1}^4 \chi_i v_i \cos(v_i \gamma_n)} e^{-\gamma_n^2 \tau / \eta_3^2}, \quad (3.55)$$

где  $\gamma_n$  – корень трансцендентного уравнения;

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

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

$$\chi_2 = e_{13} - e_{12} + e_{23} - 1; \quad \omega_2 = \eta_{13} + \eta_{23} - 1;$$

$$\chi_3 = e_{13} + e_{12} - e_{23} + 1; \quad \omega_3 = \eta_{13} - \eta_{23} + 1;$$

$$\chi_4 = e_{13} + e_{12} - e_{23} - 1; \quad \omega_4 = \eta_{13} - \eta_{23} - 1;$$

$$e_{ij} = e_i / e_j; \quad e_i = \sqrt{\lambda_i C_i \rho_i};$$

$$\eta_{ij} = \eta_i / \eta_j; \quad \eta_i = l_i / \sqrt{a_i};$$

$W$  – плотность энергии нагрева, Дж/м<sup>2</sup>.

### 3.9.3. Двухслойная адиабатическая пластина с контактными сопротивлением между слоями (нагрев прямоугольным импульсом)

Более простое решение, нежели решения (3.54, 3.55), можно получить для задачи нагрева двух адиабатических пластин толщиной соответственно  $l_1$  и  $l_2$ , разделенных резистивным слоем с тепловым сопротивлением  $R_d = d / \lambda_d$  (рис. 3.17).

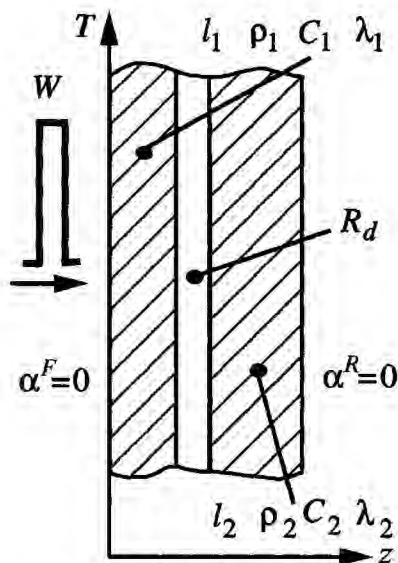


Рис. 3.17. Двухслойная модель ТК (резистивные дефекты)

Температуру передней поверхности после воздействия прямоугольного импульса длительностью  $\tau_h$  определяют по выражению, полученному Ф. Делпешем и др. [40]:

$$T^F(\tau > \tau_h) = \sum_{n=1}^{\infty} T_{\infty} \frac{4L\mu_n}{D(\mu_n)} \frac{\exp(a\mu_n\tau_h) - 1}{a\mu_n\tau_h} \times \exp[-a\mu_n\tau]; \quad (3.56)$$

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

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

где  $T_{\infty}$  – однородная температура адиабатического образца ( $\alpha = 0$ ) при больших временах,  $\mu_n$  – корни трансцендентного уравнения

$$\frac{\lambda\mu}{1/R_d} = \operatorname{ctg} \left[ \mu l_1 - \operatorname{arctg} \left( \frac{\alpha}{\lambda\mu} \right) \right] + \operatorname{ctg} \left[ \mu l_2 - \operatorname{arctg} \left( \frac{\alpha}{\lambda\mu} \right) \right], \quad (3.57)$$

которые находят одним из известных способов.

**3.9.4. Двухслойная адиабатическая пластина с контактными сопротивлением между слоями (нагрев импульсом Дирака)**

Еще более простое решение получено Д. Балажа и др. для случая нагрева импульсом Дирака двухслойной адиабатической пластины с контактными сопротивлениями между слоями [18] (рис. 3.17):

$$\begin{aligned} \frac{T_D(z=0, \tau)}{T_m} &= 1 + 2 \frac{\sum_{i=1}^2 \chi_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^2 \chi_i} \times \\ &\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sum_{i=1}^2 \chi_i \cos(\gamma_i v_k) + (-1)^i \times}{\sum_{i=1}^2 \chi_i \gamma_i \cos(\gamma_i v_k) - (-1)^i R^* \cos(\gamma_i v_k) +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times R^* v_k \sin(\gamma_i v_k)}{+ (-1)^i R^* \gamma_i v_k \sin(\gamma_i v_k)} e^{-v_k^2 \tau / \eta_2^2}; \end{aligned} \quad (3.58)$$

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

$$\gamma_i = \eta_{12} - (-1)^i; \quad i = 1, 2; \quad \eta_{12} = \eta_1 / \eta_2;$$

$$R^* = e_1 R_d / \eta_2; \quad e_i = \sqrt{C_i \rho_i \lambda_i};$$

$$e_{12} = e_1 / e_2; \quad \eta_i = l_i / \sqrt{a_i};$$

$v_k$  –  $k$ -й положительный корень трансцендентного уравнения:

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

Заметим, что величина  $R^*$  является безразмерным тепловым сопротивлением дефекта, зависящим от ТФХ обоих слоев.

В рамках одномерного приближения решение (3.58) можно с успехом использовать при анализе изделий из металлов и композиционных материалов с дефектами в виде расслоений и непроклеев.

**3.10. ОДНОМЕРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ**

Как отмечалось выше, тепловые волны возникают в результате инжекции в исследуемый объект модулированной тепловой энергии. Концепция тепловых волн и их проникновения в глубь твердых тел восходит к ранним работам Ж. Фурье [41] и М. Ангстрема [42].

**3.10.1. Полуограниченное адиабатическое тело**

Здесь мы рассмотрим некоторые общие черты гармонических температурных волн, распространяющихся в адиабатическом полуограниченном твердом теле в результате стимуляции поверхности тела тепловым потоком, который описывается выражением

$$Q(\tau) = Q_0 [1 + \cos(\omega \tau)], \quad (3.59)$$

где  $\omega$  – циклическая частота.

Адиабатическое граничное условие при  $z = 0$  имеет вид

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_0 [1 + \cos(\omega \tau)] = \\ &= \text{Re} \{ Q_0 [1 + \exp(j\omega \tau)] \}, \end{aligned} \quad (3.60)$$

где  $\text{Re}$  означает действительную часть комплексного выражения. Функция нагрева включает два члена: постоянный  $Q_0/2$  и осциллирующий  $\exp(j\omega \tau)$  (постоянная составляющая нагрева в дальнейшем будет опущена). Решение одномерного дифференциального уравнения (2.12) для осциллирующей составляющей имеет вид:

$$\begin{aligned} T(z, \tau) &= \frac{Q_0}{\lambda \sigma} \exp(-\sigma x + j\omega \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{C\rho\lambda\omega}} \times \\ &\times \exp\left(-z\sqrt{\frac{\omega}{2a}}\right) \exp\left[j\left(\omega \tau - z\sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \frac{\pi}{4}\right)\right], \end{aligned} \quad (3.61)$$

где  $\sigma = (1 + j)\sqrt{\omega/(2a)}$ .

Выражение (3.61) аналогично выражению для амплитуды электромагнитной волны в скин-слое электропроводных материалов (металлов). Аналогия с оптическим излучением позволяет рассмотреть 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  $\mu$  – *длина тепловой диффузии*. С учетом  $\mu$  выражение (3.61) принимает вид

$$T(z, \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{C\rho\lambda\omega}} \exp(-z/\mu) \times \exp\left[j\left(\omega\tau - z/\mu - \frac{\pi}{4}\right)\right]. \quad (3.62)$$

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 возрастает с ростом температуропроводности 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). Очевидно, что наиболее глубоко (до 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 противопехотных мин (см. п. 4.10.2).

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

$$v = \omega\mu = \sqrt{2a\omega}. \quad (3.63)$$

Сдвиг фазы между *стимулирующей* тепловой волной и *поверхностной* волной

( $z = 0$ ) равен  $-45^\circ$ . С ростом глубины сдвиг фазы возрастает на величину, определяемую соотношением  $\varphi = -z/\mu - \pi/4$ .

Тепловая волна характеризуется *импедансом*

$$Z = \frac{1}{\lambda\sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega C\rho\lambda}}, \quad (3.64)$$

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. Парадоксальными свойствами обладает воздух, который, благодаря своей низкой плотности, имеет коэффициент температуропроводности, близкий к металлам, но характеризуется очень низким коэффициентом тепловой активности.

### 3.10.2. Полуограниченное неадиабатическое тело

Решение задачи нагрева полуограниченного неадиабатического тела гармоническим тепловым потоком, приведенное в табл. 2.6, является более общим, нежели решение (3.62), однако оно не содержит параметра толщины изделия. Более детальный анализ амплитуды и фазы температурных волн проведем для неадиабатической пластины [43].

### 3.10.3. Неадиабатическая пластина

Для пластины с интенсивностью теплообмена  $\alpha$  на передней поверхности и адиабатической задней поверхностью решение имеет вид [17]:

$$\frac{T(Z, \tau)}{Q_m/\alpha} = A \cos(PdFo - \Psi); \quad Z = z/L;$$

$$A = (N_i N_{-i})^{1/2}; \quad \psi = \arctg \left( i \frac{N_i - N_{-i}}{N_i + N_{-i}} \right);$$

$$N_i = \frac{\text{ch}\sqrt{iPd} (1-Z)}{\text{ch}\sqrt{iPd} + (1/Bi)\sqrt{iPd} \text{sh}\sqrt{iPd}};$$

$$N_{-i} = \frac{\text{ch}\sqrt{-iPd} (1-Z)}{\text{ch}\sqrt{-iPd} + (1/Bi)\sqrt{-iPd} \text{sh}\sqrt{-iPd}};$$

$$Bi = \alpha L / \lambda; \quad Pd = \omega L^2 / a. \quad (3.65)$$

где  $z$  – координата, направленная в глубину изделия;  $Q_m$  – максимальная плотность мощности поглощенного теплового потока;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена на нагреваемой (передней) поверхности;  $A$  – амплитуда тепловой волны;  $\Psi$  – фаза тепловой волны;  $L$  – толщина пластины;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Bi$  и  $Pd$  – критерии Био и Предводителя.

При асимптотическом анализе, используя соотношения (3.65), можно показать, что амплитуда и фаза на поверхности пластины при  $L \rightarrow \infty$  будут идентичны найденным из соответствующих выражений для полуграниченного 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 используем решение (3.65), согласно которому поверхностная температура есть функция трех переменных:  $\{\tau, Bi, Pd\}$ . Амплитуда и фаза температурной волны зависят от двух параметров:  $\{Bi, Pd\}$ . Графики этих функций изображены на рис. 3.18 для значений  $Bi$  и  $Pd$ , соответствующих композиционным материалам, которые являются типичными объектами ТК. 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, характеризующихся большой тепловой инерцией.

### 3.10.4. Температурные волны на границе раздела двух сред

Рассмотрим явления отражения и преломления (пропускания) тепловых волн на границе раздела двух сред (рис. 3.19). Коэффициенты отражения  $\Gamma$  и пропускания  $T$  равны [44]:

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

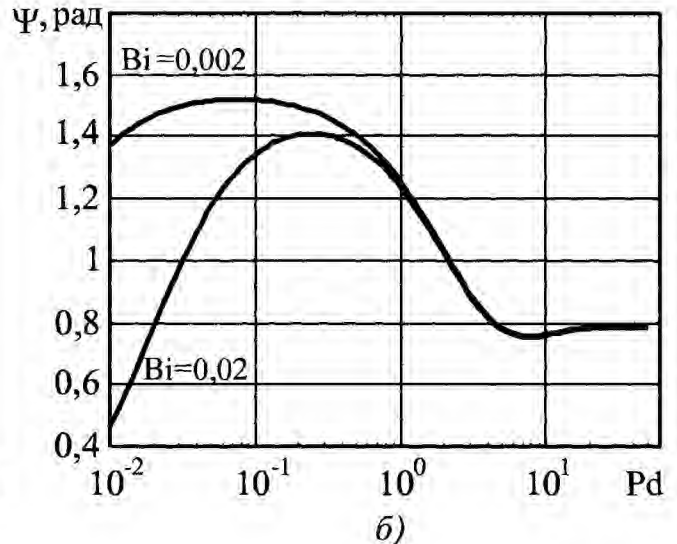
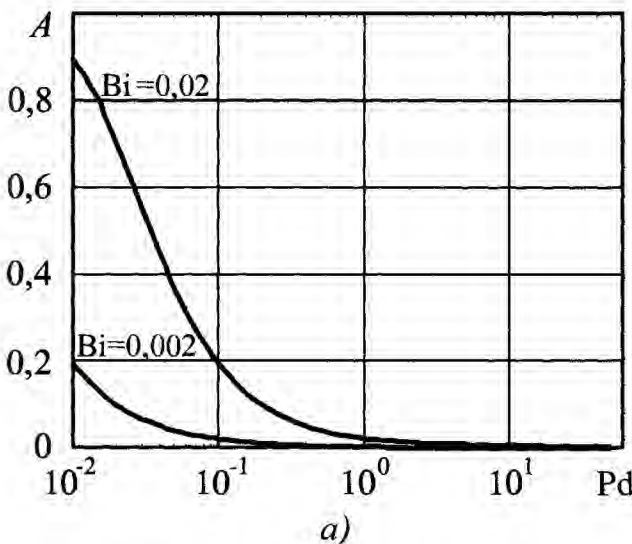


Рис. 3.18. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловых волн, рассчитанные по уравнению (3.65)

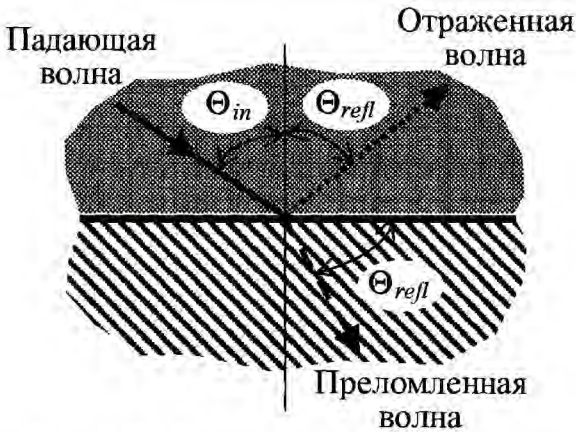


Рис. 3.19. Отражение и преломление тепловых волн на границе двух сред

$$T = \frac{2 \cos(\Theta_{in})}{\cos(\Theta_{in}) + b \cos(\Theta_{refr})}, \quad (3.66)$$

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:

$$\Gamma = \frac{1-b}{1+b}; \quad T = \frac{2}{1+b}. \quad (3.67)$$

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 весьма низкой тепловой активности воздуха. Тем не менее, в случае тонкого воздушного дефекта ситуация становится более сложной из-за возникновения интерференции тепловых волн в воздушном промежутке, при этом решающую роль начинает играть толщина дефекта (см. п. 4.2.3).

### 3.11. 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 ре-

шения находятся во временной области (time-domain). Как известно, связь таких решений осуществляется путем преобразования Лапласа. Решение во временной области  $T(\tau)$  может быть получено с помощью ряда Фурье, используя решение в частотной области

$$T(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A(\omega_n) T(z, \omega_n, \tau), \quad (3.68)$$

где  $T(z, \omega_n, \tau)$  – плоская тепловая волна циклической частоты  $\omega_n$ , распространяющаяся в направлении координаты  $z$  (см., например, формулы (3.62) и (3.65)) 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 интегральной функцией.

Рассмотрим в качестве примера нагрев 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  $\tau$  может быть получен путем суммирования амплитуд всех тепловых волн при  $(z, \tau)$ , для чего используем выражение (3.62)

$$T(z, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_0}{\lambda \sigma_n} \exp(-\sigma_n z) \exp(j\omega_n \tau). \quad (3.69)$$

Здесь  $Q_0$  выражено в Вт/м<sup>2</sup>. Заменяя ряд интегралом и обозначая  $j\omega = p$ , получим

$$T(z, \tau) = \frac{1}{\pi j} \int_0^{\infty} \frac{Q_0}{\lambda \sigma(p)} \exp[-\sigma(p)z] \times \\ \times \exp(p\tau) dp = W_0 L^{-1} \left[ \frac{\exp(-\sigma z)}{\lambda \sigma} \right], \quad (3.70)$$

где  $L^{-1}$  – обратное преобразование Лапласа;  $W_0$  – полная энергия исходного импульса, Дж/м<sup>2</sup>.

Используя таблицы обратного преобразования Лапласа и учитывая, что  $\sigma = \sqrt{p/a}$ , получим решение в окончательном виде

$$T(z, \tau) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau}} \exp(-z^2/4a\tau), \quad (3.71)$$

которое идентично соответствующему решению в табл. 2.4.

### 3.12. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Настоящая книга посвящена преимущественно активному ТК, поэтому все рассмотренные выше задачи относятся к нестационарной теплопроводности. В данном и следующем параграфах в порядке исключения мы рассмотрим стационарную теплопередачу через плоскую стенку, поскольку соответствующие задачи возникают при тепловизионной диагностике ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также дымовых труб. В частности, это относится к определению *термического сопротивления* стенки и *сопротивления теплопередаче* ограждающей конструкции.

Рассмотрим плоскую стенку, разделяющую две среды с различной температурой  $T_{in}^a$  и  $T_{out}^a$  (рис. 3.20). Теплообмен на поверхностях пластины характеризуется коэффициентами  $\alpha_{in}$  и  $\alpha_{out}$ . Однослойная пластина обладает термическим сопро-

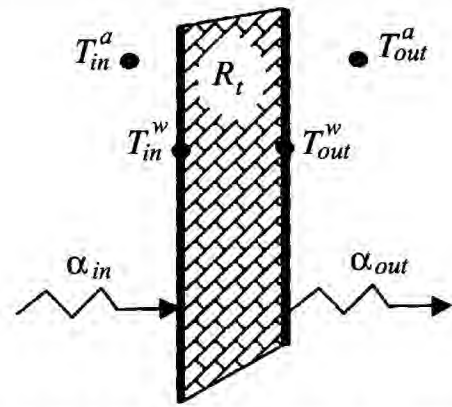


Рис. 3.20. Стационарная теплопередача через плоскую стенку

тивлением  $R_t = L/\lambda$ , многослойная –

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

стенку равен:

$$Q = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{R_t} \text{ или } Q = \frac{T_{in}^a - T_{out}^a}{R}, \quad (3.72)$$

где  $R = 1/\alpha_{in} + R_t + 1/\alpha_{out}$  – сопротивление теплопередаче стенки с учетом сопротивлений пограничных слоев, зависящих от соответствующих коэффициентов теплообмена.

В строительстве величины  $R_t$ ,  $\alpha_{in}$ ,  $\alpha_{out}$  определяют, измеряя тепловой поток через стенку и температуры среды и поверхностей стенки:

$$R_t = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{Q}; \quad \alpha_{in} = \frac{Q}{T_{in}^a - T_{in}^w}; \\ \alpha_{out} = \frac{Q}{T_{out}^w - T_{out}^a}. \quad (3.73)$$

Схеме рис. 3.20 соответствует тепловизионная диагностика качества теплоизоляции ограждающих конструкций строительных сооружений и дымовых труб. При этом с помощью тепловизора измеряют температурное поле на наружной поверхности ствола стены здания (ствола трубы)  $T_{out}^w$  и по его амплитуде или текстуре судят о наличии скрытых дефектов и оценивают их параметры (см. Главу 11).



Выражение для поверхностной температуры можно записать в виде

$$T_{out}^w = \frac{T_{in}^a + \alpha_{out} T_{out}^a \left( \frac{1}{\alpha_{in}} + R_t \right)}{1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t}. \quad (3.74)$$

Определение термического сопротивления стенки представляет собой типичную обратную задачу технической диагностики. Гипотетически можно рассмотреть два подхода к ее решению:

1) измерение температуры на обеих поверхностях объекта, например, с помощью тепловизора с одновременным измерением теплового потока через стенку с помощью датчика теплового потока;

2) измерение температуры только на одной поверхности с одновременным измерением температуры окружающей среды.

Первый подход предусмотрен в строительной практике согласно требованиям ГОСТ 26254–84 [45]. Ввиду наличия естественной нестационарности температурного поля ограждающей конструкции, измерения проводят в течение длительного времени (до 15 суток), после чего выбирают квазистационарный участок (длительностью от 1 до 3 суток в зависимости от теплоинерционности ограждающей конструкции) и рассчитывают термическое сопротивление стенки по формулам (3.73).

Второй подход требует использования расчетных значений коэффициентов теплообмена согласно следующей формуле

$$R_t = \frac{T_{in}^a - \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} (T_{out}^w - T_{out}^a) - T_{out}^w}{\alpha_{out} (T_{out}^w - T_{in}^a)}. \quad (3.75)$$

Проиллюстрируем неустойчивость обратного решения по формуле (3.75) для типичной ограждающей конструкции. Пусть  $T_{out}^a = -20$  °С и  $T_{in}^a = +20$  °С. Примем рекомендуемые строительными нормами и правилами значения  $R_t = 2$  Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К;

$\alpha_{in} = 7,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{out} = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Согласно "прямой" формуле (3.74), температура наружной стены должна быть равной  $T_{out}^w = -19,19$  °С. Теперь допустим, что температуру стены и наружного воздуха измеряют с помощью тепловизора. При этом возникают неизбежные ошибки, обусловленные неточно определяемым коэффициентом излучения материала стены, отраженным солнечным излучением, температурной предысторией и другими факторами.

Пусть измеряемые значения находятся в следующих интервалах:  $T_{out}^a = -19 \dots -21$  °С и  $T_{out}^w = -19,5 \dots -20,5$  °С. График функции  $R_t(T_{out}^a, T_{out}^w)$  изображен на рис. 3.21 согласно формуле (3.75). Видно, что многим комбинациям входных параметров могут соответствовать нереальные, в том числе отрицательные, значения термического сопротивления, которое фактически равно  $R_t = 2$  Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К. Провал на графике рис. 3.21 является простой графической иллюстрацией неустойчивости решения обратной задачи в виде (3.75).

В строительной практике термическое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций всегда определяют путем прямых измерений теплового потока и температур на внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции по формуле (3.73), а не путем решения обратной задачи (3.75). При этом основной практической проблемой является учет нестационарного характера теплообмена ограждающей конструкции со средой.

Согласно российскому ГОСТ 26254–84 эту проблему решают выбором соответствующего периода измерений. Международный стандарт ISO 9869–1994 рекомендует измерять сопротивление теплопередаче в естественных условиях, используя методы усреднения (averaging) и "черного ящика" (black box). Более подробно учет нестационарности рассмотрен в Главе 11.

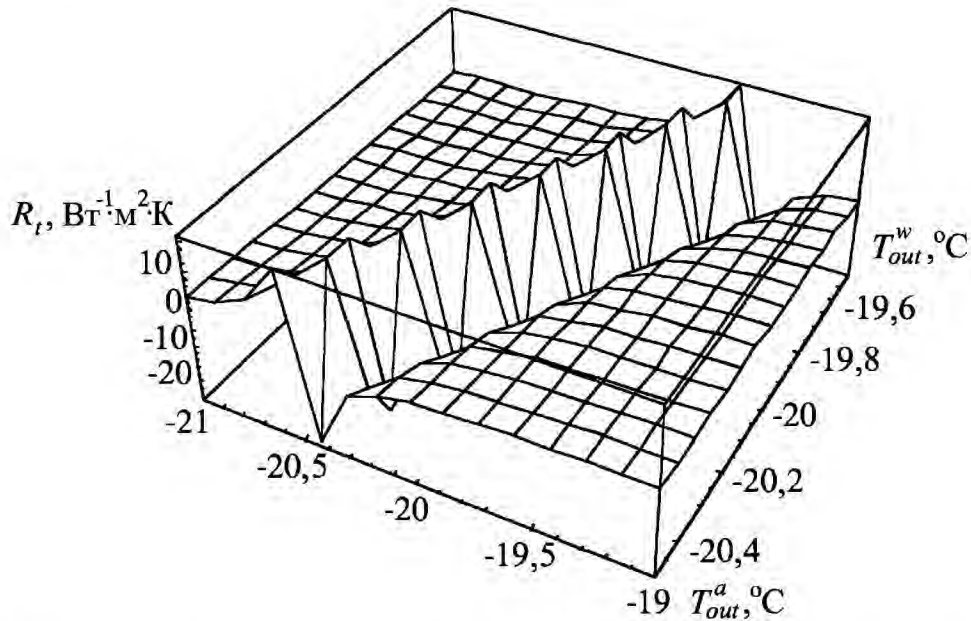


Рис. 3.21. Определяя термическое сопротивление стенки согласно уравнению (3.73).

Истинное значение  $R_t = 2 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$  при  $T_{out}^a = -20 \text{ °С}$  и  $T_{out}^w = -19,19 \text{ °С}$

В работе [46] 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. Действительно, если на наружной поверхности измерить с помощью тепловизора величину поверхностного температурного градиента  $\Delta T_{out}^w$  в зоне предполагаемого дефекта, то соответствующее ему изменение термического сопротивления можно найти по формуле

$$\Delta R_t = \Delta T_{out}^w \left/ \frac{\partial T_{out}^w}{\partial R_t} \right. = \frac{\left( 1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t \right)^2}{\alpha_{out} (T_{out}^a - T_{in}^a)} \Delta T_{out}^w. \quad (3.76)$$

Например, для типичной дымовой трубы ( $R_t = 1,37 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ) неточное определение входных параметров, входящих в формулу (3.75), приводит к основной погрешности определения термического сопротивления, равной  $\Delta R_t = 0,26 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ , что составляет 19 % от полного термиче-

ского сопротивления. При этом не реализуется относительно высокое температурное разрешение тепловизора; более того, такие большие флуктуации  $R_t$  могут иметь место, например, только при полном разрушении футеровочного слоя ствола трубы. Если значение  $R_t$  априорно известно, например, из технической документации, чувствительность тепловизионной диагностики к изменениям  $R_t$  согласно формуле (3.76) может достигать  $\Delta R_t = 0,032 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ , или 2,3 % от полного термического сопротивления.

### 3.13. ОЦЕНКА ОБЪЕМА ПРОТЕЧЕК ВОЗДУХА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В этом параграфе мы покажем, как данные о температурных градиентах на поверхности ограждающей конструкции могут быть использовано для приближенной оценки протечек воздуха (из помещения наружу или обратно в зависимости от градиента давления).

Представим, что протечка воздуха происходит через тонкую длинную трещину в стене здания (как это часто проис-

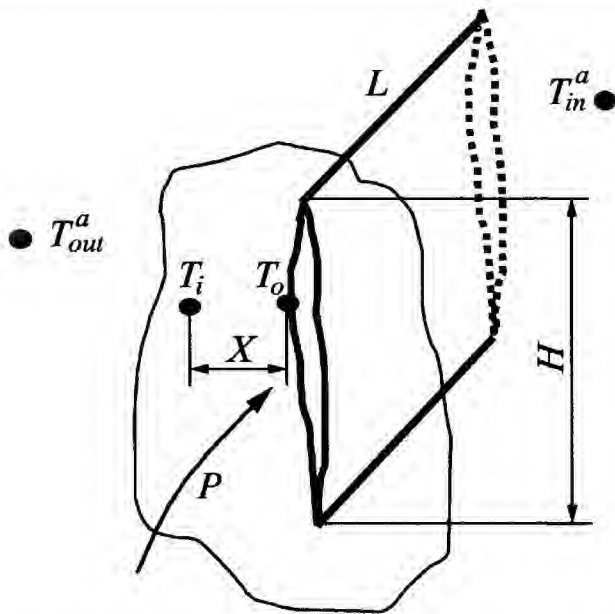


Рис. 3.22. Моделируя протечку воздуха локальным стоком тепла

ходит в температурных и межпанельных швах зданий). Длина трещины –  $H$ , толщина стенки –  $L$  (см. рис. 3.22).

Если давление внутри помещения ниже, чем снаружи, холодный атмосферный воздух натекает в здание через сквозную трещину, перенося энергию

$$q = C^{air} \rho^{air} P (T_{in}^a - T_{out}^a), \text{ Вт}, \quad (3.77)$$

где  $C^{air}$ ,  $\rho^{air}$  – теплоемкость и плотность воздуха;  $P$  – объем протечки в  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При этом на ИК термограмме сам дефект и окружающие участки выглядят холоднее, чем основная стена. В некотором приближении можно считать, что в

стене действует сквозной источник (сток) тепла мощностью  $q$ . На каждой стороне дефекта возникает температурный градиент, направленный согласно закону Фурье из объема стены в сторону трещины

$$T_i - T_o = \frac{q}{2HL} \frac{X}{\lambda}, \quad (3.78)$$

где  $T_o$  – температура на краю трещины;  $T_i$  – температура на расстоянии  $X$  от трещины;  $\lambda$  – теплопроводность материала стенки. Объем протечки определяется как

$$P = \frac{2HL\lambda(T_i - T_o)}{C_p X (T_{in}^a - T_{out}^a)}. \quad (3.79)$$

Например, если на поверхности дымовой трубы на расстоянии  $X = 1,2$  м от большой видимой трещины длиной до 2,5 м температурный градиент составляет  $T_i - T_o = 1,8$  °С, то объем протечки атмосферного воздуха равен 43 л/ч [46].

Очевидно, что модель (3.79) не учитывает теплообмен на поверхности стенки и ее возможную неоднородность, а сам метод тепловизионной оценки протечек воздуха является косвенным и, за исключением его наглядности, высокой оперативности и дистанционности, вряд ли сможет конкурировать с более точными традиционными методами.

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУРАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ

### 4.1. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТК

В Главах 2 и 3 мы рассмотрели ряд классических задач теории теплопроводности, методы, решения которых хорошо известны [16, 17]. Одномерные, в том числе многослойные, задачи решают аналитически с использованием *операционного метода* или *метода функций Грина*, тогда как для анализа многомерных моделей наиболее пригодны *численные методы*. В данной главе мы рассмотрим некоторые особенности применения аналитических и численных методов при исследовании теплопередачи в твердых телах, содержащих скрытые дефекты.

#### 4.1.1. Теплофизическое описание дефектов

Структурные неоднородности любого типа, часть которых, не отвечающая нормам, является дефектами, искажают "эталонное" протекание 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  $\Delta T(x, y, z = 0, z = L, \tau)$ .

Классические модели ТК рассматривают внутренние дефекты в качестве материалов (слоев), в которых теплопередача осуществляется путем чистой теплопроводности; при этом справедливы условия (2.15) или (2.16):

$$\lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_{nd} = T_d, \quad (4.1)$$

или

$$\lambda_{nd} \frac{\partial T_{nd}}{\partial z} = \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \quad T_d - T_{nd} = R_d \frac{\partial T_d}{\partial z}. \quad (4.2)$$

При использовании условий (4.1) необходимо решать дифференциальное уравнение теплопроводности, как в основном материале, так и в дефектах, поэтому распределение температуры в объекте контроля будет зависеть от теплопроводности и температуропроводности (теплоемкости) дефекта.

Если теплоемкость дефекта сопоставима с теплоемкостью объекта контроля (при двухсторонней процедуре ТК) или слоя материала над дефектом (при односторонней процедуре), то она может существенно влиять на величину температурного сигнала и его временное развитие в ходе нагрева/охлаждения (выше такие дефекты были названы емкостными). Примером емкостного "дефекта" являются противопехотные мины, размещаемые в почву на глубину до 10 см, а также вода в сотовых конструкциях и пористых материалах. Влияние теплоемкости дефекта также заметно в случае обширных неглубоких расслоений в композиционных материалах.

Емкостной характер дефекта может быть ответственным за так называемую *инверсию температурного сигнала*, когда дефектная область над слаботеплопроводным (газонаполненным) дефектом в односторонней процедуре ТК становится холоднее бездефектных областей, т.е.  $\Delta T(\tau) < 0$  (см. также п. 4.8.1).

Если теплоемкостью дефекта можно пренебречь, то его основной теплофизической характеристикой является тепловое сопротивление  $R_d = d/\lambda_d$ , и дефект называется резистивным (граничные условия (4.2)). При этом дифференциальное уравнение теплопроводности внутри дефектов не решается.

В случае контакта двух шероховатых материалов используют термин "контактное тепловое сопротивление". Резистивные дефекты характерны для сварных соединений и тонких покрытий. При диффузионной сварке возможны дефекты на границе свариваемых материалов, при которых осуществляется поверхностный 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.

#### 4.1.2. Преобразование Лапласа и метод "теплого 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

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-p\tau} d\tau = L[f(\tau)]. \quad (4.3)$$

Обратное преобразование осуществляют по формуле обращения

$$f(\tau) = L^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(p) e^{p\tau} dp, \quad (4.4)$$

где интегрирование проводят в комплексной плоскости вдоль прямой  $\sigma = \text{const.}$ , параллельной мнимой оси. Другая форма записи (4.4)

$$f(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[ \frac{(-1)^n}{n!} \left( \frac{n}{\tau} \right)^{n+1} F^{(n)} \left( \frac{n}{\tau} \right) \right]. \quad (4.5)$$

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

$$F(p) = \frac{\varphi(p)}{\eta(p)} = \frac{A_0 + A_1 p + A_2 p^2 + \dots}{B_1 p + B_2 p^2 + \dots}, \quad (4.6)$$

то по теореме разложения

$$f(\tau) = L^{-1} \left[ \frac{\varphi(p)}{\eta(p)} \right] = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi'(p_n)}{\eta'(p_n)} e^{p_n \tau}, \quad (4.7)$$

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

$$f(\tau) = L^{-1} \left[ \frac{\varphi(p)}{\eta(p)} \right] = \sum_m \frac{1}{(k-1)!} \times \\ \times \lim_{p \rightarrow p_m} \left\{ \frac{d^{k-1}}{dp^{k-1}} \left[ \frac{\varphi(p)(p-p_m)^k}{\eta(p)} e^{p\tau} \right] \right\}, \quad (4.8)$$

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

В простых случаях оригинал изображения можно найти в соответствующих таблицах, однако в ТК часто используют численные алгоритмы вычисления оригиналов, в частности, алгоритм Штефеста (Stefest). Важные выводы о влиянии внутренних слоев материала (дефектов) на поверхностные температурные сигналы можно сделать, анализируя решения в пространстве Лапласа, где соответствующие выражения являются алгебраическими.

Одной из основных целей теоретического анализа задач ТК, помимо выяснения механизма образования температурных сигналов в дефектных зонах, является разработка алгоритмов решения обратных задач с целью определения параметров

скрытых дефектов по результатам экспериментальных наблюдений. К сожалению, аналитические решения, полученные классическими методами, настолько громоздки, что их *обращение (инвертирование)*, как правило, невозможно. В 1987 г. группой А. Деджиованни (Франция) был предложен метод анализа многослойных одномерных задач теплопроводности, названный методом "теплового четырехполюсника" (thermal quadrupole) [26]. В последующие годы этот метод был с успехом применен для получения относительно простых решений прямых и обратных задач ТК, в основе которых лежал анализ операционных решений в области преобразования Лапласа [26, 47].

Ввиду перспективности данного метода, изложим его принципы более подробно [26].

Рассмотрим задачу нагрева протяженной однородной пластины толщиной  $L$  тепловым потоком  $Q$ . Одномерное распределение 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

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (4.9)$$

причем  $T(\tau = 0) = 0$ .

Плотность теплового потока внутри пластины определена законом Фурье

$$Q(z, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z}. \quad (4.10)$$

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

$$\begin{aligned} \Theta(z, p) &= \int_0^{\infty} T(z, \tau) e^{-p\tau} d\tau; \\ \Phi(z, p) &= \int_0^{\infty} Q(z, \tau) e^{-p\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Метод "теплового четырехполюсника" особенно наглядно реализуется, если рассматривать лапласовские образы температуры и тепловых потоков только на передней ( $F$  – front) и задней ( $R$  – rear) поверхности пластины:  $\Theta^F, \Theta^R, \Phi^F, \Phi^R$ . Вышеуказанные четыре величины связаны между собой простым матричным уравнением:

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

$$A = D = \cosh(kL); \quad B = \frac{1}{\lambda k} \sinh(kL);$$

$$C = \lambda k \sinh(kL); \quad k = \sqrt{p/a}. \quad (4.12)$$

Коэффициенты  $A, B, C, D$  зависят от параметра преобразования Лапласа  $p$ , толщины пластины  $L$  и ТФХ материала пластины. Важно отметить, что уравнение (4.12) справедливо для любого типа ГУ.

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 (см. графическое представление на рис. 4.1).

Удобство представления решения в виде (4.12) состоит в том, что в случае многослойной пластины нужно перемножить матрицы  $M_i$ , определенные для каждого слоя.

Рассмотрим нагрев многослойной пластины импульсом Дирака. Наглядные

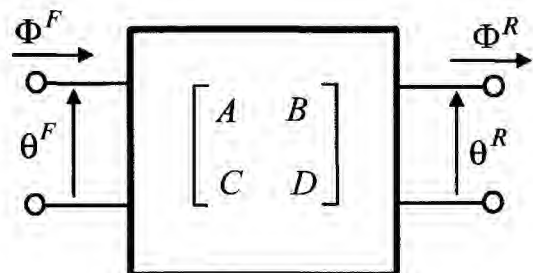


Рис. 4.1. Матричное представление задачи нагрева однослойной пластины

результаты получаются для двухслойной пластины, в которой между слоями толщиной  $l_1$  и  $l_2$ , выполненными из одного и того же материала, имеется резистивный слой, который имитирует дефект с тепловым сопротивлением  $R_d = d/\lambda_d$ .

Задача решается в матричной форме

$$\left| \frac{\theta^F}{W} \right| = M_1 M_d M_3 \left| \frac{\theta^R}{0} \right|, \quad (4.13)$$

где  $\theta^F(z, p)$ ,  $\theta^R(z, p)$  – лапласовские образы температуры на передней и задней поверхностях пластины;  $M_1$ ,  $M_2$  – матрицы, характеризующие слои изделия (кроме дефекта)

$$M = \left| \begin{array}{cc} A & B \\ E & D \end{array} \right|, \quad (4.14)$$

где

$$\begin{aligned} A &= D = \operatorname{ch}(kl); \quad E = \lambda k \operatorname{sh}(kl); \\ B &= \operatorname{sh}(kl)/(\lambda k); \quad k = \sqrt{p/a}; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$l$  – толщина слоя.

Соответственно, для матрицы  $M_d$ , описывающей "дефектный" слой:

$$A_d = D_d = 1; \quad B_d = R_d; \quad E_d = 0. \quad (4.16)$$

Решения данной задачи для передней и задней поверхностей в области Лапласа имеют алгебраический вид, что позволяет эффективно их использовать для идентификации глубины залегания  $l_1$  и теплового сопротивления  $R_d = d/\lambda_d$  дефектного слоя. Приведем эти решения в виде, полученном У. Уинфри и Дж. Заламеда [48]:

$$\begin{aligned} \theta^F(p) &= \frac{W \operatorname{sh}(kl_1) + \operatorname{sh}(kl_2) + \operatorname{ch}(kl_1) \times}{\lambda k \operatorname{ch}(kl_2) \operatorname{sh}(kl_1) + [\operatorname{ch}(kl_1) +} \\ &\rightarrow \frac{\times [\operatorname{ch}(kl_2) + k\lambda R_d \operatorname{sh}(kl_2)]}{+ k\lambda R_d \operatorname{sh}(kl_1)] \operatorname{sh}(kl_2)}; \\ \theta^R(p) &= \frac{W [\operatorname{ch}^2(kl_1) - \operatorname{sh}^2(kl_1)] \times}{\lambda k \operatorname{ch}(kl_2) \operatorname{sh}(kl_1) + [\operatorname{ch}(kl_1) +} \\ &\rightarrow \frac{\times [\operatorname{ch}^2(kl_2) - \operatorname{sh}^2(kl_2)]}{+ k\lambda R_d \operatorname{sh}(kl_1)] \operatorname{sh}(kl_2)}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где  $W$  – плотность поглощенной энергии, Дж/м<sup>2</sup>;  $l_1 + l_2 = L$  – полная толщина пластины.

При отсутствии резистивного слоя ( $R_d = 0$ ) уравнения (4.17) переходят в решение для однородной пластины толщиной  $L$ .

Важным свойством решения для задней поверхности  $\theta^R$  является то, что оно симметрично по отношению к середине пластины, т.е. решения для  $l_1 = x$  и  $l_2 = L - x$  идентичны. Это объясняет, почему в двусторонней процедуре ТК невозможно идентифицировать глубину залегания дефектов.

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):

$$\begin{aligned} \Delta\Theta^F &= \frac{R^* \sinh^2[\alpha(1-x^*)]}{\sinh(\alpha) \{ \sinh(\alpha) + R^* \alpha \sinh(\alpha x^*) \times} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{\times \sinh[\alpha(1-x^*)]}; \\ \Delta\Theta^R &= \frac{R^* \sinh(\alpha x^*) \sinh^2[\alpha(1-x^*)]}{\sinh(\alpha) \{ \sinh(\alpha) + R^* \alpha \sinh(\alpha x^*) \times} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{\times \sinh[\alpha(1-x^*)]}, \end{aligned} \quad (4.18)$$

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

Используя формулы (4.17–4.18), можно получить ряд важных свойств решений задач ТК на передней и задней по-

верхности изделия, включая алгоритм определения термического сопротивления дефекта  $R_d$  и глубины его залегания дефекта  $l$  (см. п. 5.5).

Важной частью метода "теплого четырехполюсника" является численный алгоритм Штефеста для перехода из области изображений Лапласа  $F(p)$  в область оригиналов  $f(\tau)$ :

$$f(\tau) \cong \frac{\ln(2)}{\tau} \sum_{i=1}^n v_i F [i \ln(2)/\tau], \quad (4.19)$$

Напомним, что в явном виде решение рассмотренной выше задачи было приведено в п. 3.9.4.

### 4.1.3. Численные методы

Как отмечалось выше, аналитические решения наглядны, но малоэффективны во многих случаях, представляющих практический интерес, в частности, при моделировании дефектов конечного размера в анизотропных материалах и изделиях сложной конфигурации.

Численные методы становятся все более распространенными, чему способствует экспоненциальный рост возможностей современных компьютеров. Например, трехмерные задачи ТК, которые в 70-е годы прошлого века решали на больших вычислительных машинах в течение многих часов, теперь рассчитывают на современных персональных компьютерах в течение несколько минут.

Различают *метод конечных элементов* и *метод конечных разностей*. Метод конечных элементов возник в 50-е годы XX-го века в строительной механике и теории упругости в связи с космическими исследованиями. В настоящее время это общий метод численного (сеточного) решения дифференциальных уравнений с использованием так называемых *взвешенных невязок*. В его основе лежит подбор функционала, удовлетворяющего дифференциальному уравнению (системе уравнений) и граничным условиям. Примене-

ние данного метода наиболее целесообразно при анализе изделий сложной формы.

В настоящем разделе будет рассмотрен более простой метод конечных разностей, который хорошо поддается программированию и позволяет получать наглядные решения задач ТК.

В зависимости от геометрии анализируемой задачи, уравнение нестационарной теплопроводности (2.18) может быть записано в декартовых, цилиндрических или сферических координатах в виде

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^N L_i T, \quad (4.20)$$

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 (4.20) является

$$\frac{1}{a} \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta \tau} = \Theta (\Lambda T)^{p+1} + (1 - \Theta) (\Lambda T)^p, \quad (4.21)$$

где  $\Theta$  – постоянная конечно-разностной схемы;  $\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i$  ( $\Lambda_i$  – конечно-разностный аналог  $L_i$ ). Производные выражают в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial q_i^2} &\approx \frac{1}{(\Delta h)^2} (T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &\approx \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta \tau}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Здесь индекс "i" обозначает узлы пространственной сетки, а индекс "p" обозначает временные шаги;  $\Delta h$  – 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  $\Theta = 1$  – *неявная схема*.



Для одномерного уравнения теплопроводности явная схема имеет вид

$$T_i^{p+1} = \frac{a \Delta \tau}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^p + T_{i-1}^p) + \left[ 1 - 2 \frac{a \Delta \tau}{(\Delta x)^2} \right] T_i^p. \quad (4.23)$$

Схема (4.23) позволяет рассчитать температуру  $i$ -го узла  $T_i$  в момент времени  $\tau + \Delta \tau$ , если известны температуры соседних узлов в предыдущий момент времени  $\tau$ . Аналогичные 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. 4.2. Очевидно, что время расчета таких задач пропорционально числу узлов пространственно-временной сетки. Например, расчет практических задач ТК с помощью программы ThermoCalc-6L ("Инновация") требует нескольких минут машинного времени при объеме сетки в несколько миллионов узлов. При использовании метода конечных элементов, например, в программе Comsol Multiphysics, объем сетки значительно меньше при сопоставимом времени счета.

Явная схема устойчива, если  $(\Delta x)^2 / (a \Delta \tau) \geq 2$  (одномерный случай). Условие устойчивости ограничивает вы-

бор временного шага при фиксированных пространственных шагах. При решении многомерных задач это может привести к длительным вычислениям из-за большого числа временных шагов. Явные решения наглядны и легко программируются, однако на практике чаще используют  *неявные*  схемы, которые свободны от вышеупомянутого недостатка [17].

Эффективна неявная  *локально-одномерная*  схема, которую рассчитывают методом  *переменных направлений* , для чего каждый временной шаг разбивают на три под-шага и расчет выполняют для каждого под-шага вдоль каждой из координат. Пример локально-одномерной схемы для анализа двухмерной цилиндрической модели ТК описан в книге [1]. В практических расчетах трехмерных задач могут использоваться пространственные сетки с несколькими миллионами узлов.

Как пространственная, так и временная сетки могут быть неравномерными: как правило, пространственная сетка должна сгущаться в районе дефекта, а шаг временной сетки должен быть меньше времени резких изменений температуры, которые происходят, например, в момент включения/выключения импульса нагрева. Однако неравномерные сетки более трудны для программирования и их погрешности при решении задач ТК малоисследованны.

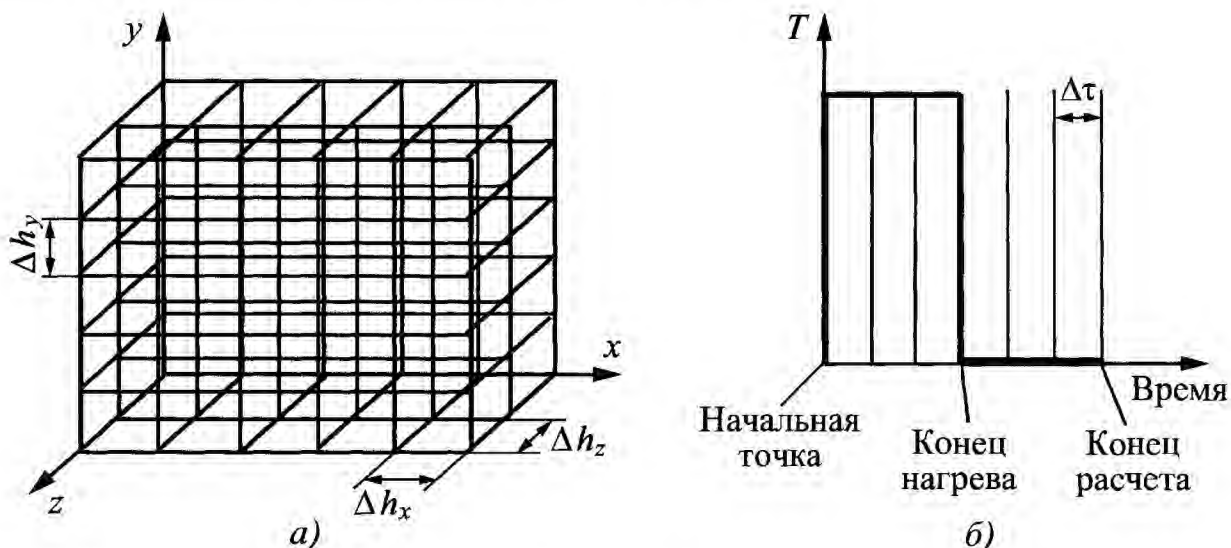


Рис. 4.2. Пространственная (а) и временная сетка (б) при численном моделировании задач ТК

#### 4.1.4. Точность численных решений

Точность расчетов с помощью численных методов оценивают относительно аналитических решений. Этот вопрос хорошо изучен в классической теории теплопередачи, т.е. для бездефектных изделий. Обычная рекомендация по выбору параметров сетки 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.

Автором проанализирована точность двух- и трехмерных численных алгоритмов, реализованных соответственно в компьютерных программах ThermoCalc-2D и ThermoCalc-6L ("Инновация"). Программа ThermoCalc-2D моделирует дисковидные дефекты в трехслойном дисковидном изделии (см. п. 4.3). При неограниченном увеличении диаметра дефекта, двухмерная цилиндрическая модель (иногда называемая "диск в диске") переходит в одномерную трехслойную модель, решение которой дано в Главе 3. Рекомендуемые значения шагов равномерной пространственно-временной сетки приведены в табл. 4.1 для некоторых типичных ситуаций ТК.

Величины погрешностей, составляющие в большинстве случаев от 0,5 до 5 %, приведены в табл. 4.1 для температур в *дефектной* области (см. данные в скобках). В качестве эталонного выбрано аналитическое решение одномерной трехслойной задачи ТК, реализованное в софтвере Multilayer-3. Бездефектные температуры, как правило, вычисляются с меньшими погрешностями (<1 %). Заметим, что наибольшие погрешности возникают в ситуациях, когда нетеплопроводное или значительной толщины тело нагревают коротким тепловым импульсом. Однако такие ситуации не очень характерны для практики, поскольку при этом обычно применяют маломощный и продолжительный нагрев.

#### 4.1.5. Коммерческие пакеты для численного решения задач ТК

##### Программы общего применения

Коммерческие пакеты для численного решения задач теплопередачи представляют собой законченные графические среды для моделирования сложных объектов, управления процессом расчета и визуализации результатов. Многие из имеющихся на рынке компьютерных программ могут быть использованы в той или иной степени в 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. Фактически, такие программы могут автоматически обмениваться данными или быть встроенными в многоцелевые средства проектирования CAD и моделирования CAM (Computer-Aided Modeling), которые широко применяют, например, в авиакосмической промышленности. Это позволяет существенно сократить время подготовки и предварительной обработки данных, поскольку однажды разработанные модели могут впоследствии использоваться различными программами.

В коммерческих пакетах для численного решения задач теплопередачи использованы приемы построения оптимальных сеточных моделей, что особенно важно при анализе сложных геометрий. Плотность пространственно-временной сетки может быть увеличена в тех местах или в те моменты времени, где и когда ожидаются основные теплофизические феномены, влияющие на проявление дефектов. Например, при анализе 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

#### 4.1. 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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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),  $a = 8,6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с; сталь –  $\lambda = 32$  Вт/(м·К),  $a = 7,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; углепластик –  $\lambda = 0,64$  Вт/(м·К),  $a = 5,2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с; бетон –  $\lambda = 1,5$  Вт/(м·К),  $a = 7,5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с; воздух (в дефекте) –  $\lambda = 0,07$  Вт/(м·К),  $a = 5,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

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

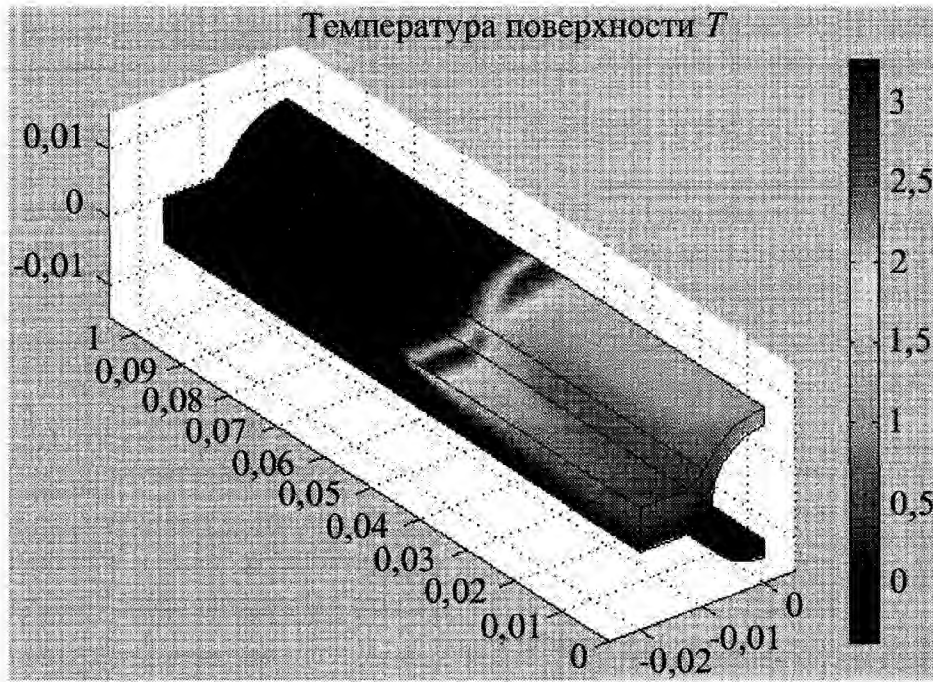
2. В скобках приведена точность вычислений температуры в дефектной области по сравнению с соответствующим одномерным решением, полученным с помощью программы Multilayer-3).

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

\* Эти модели требуют весьма малых шагов по координате  $z$ .

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 использоваться для моделирования изделий сложной формы и поверхностных неровностей; анизотропия

материалов и зависимость ТФХ от времени также легко моделируются в рамках современных моделей. Применяемые расчетные схемы могут быть явными и неявными с ручным или автоматическим изменением шага по времени, а также использовать метод конечных разностей или метод конечных элементов.



**Рис. 4.3. Моделирование ТК коррозии в трубке котла ТЭС при нагреве движущимся полосовым источником тепла (модель С. Маринетти)**

Пример моделирования задачи ТК коррозии в трубах котла тепловой станции изображен на рис. 4.3 (программа Comsol Multiphysics, использующая метод конечных элементов).

Некоторые программы, например, фирмы ThermoAnalytics (США), позволяют рассчитывать не только теплопередачу в телах сложной конфигурации с внутренними источниками тепла, но и предсказывать их ИК сигнатуры, т.е. профили теплового излучения, в различных спектральных диапазонах. Такие программы находят применение в архитектуре, теории машин и механизмов и военном деле.

Обзор ряда коммерческих пакетов, которые могут быть применены в ТК, приведен в табл. 4.2. Каждая программа имеет свои специфические особенности, описание которых можно найти на веб-сайтах производителей.

Описанные программы предъявляют достаточно высокие требования к мощности процессора используемого компьютера, объему оперативной памяти и объему жест-

кого диска. Наибольшие трудности при их применении возникают при моделировании трехмерных, нелинейных и импульсных задач. Как правило, лучшие результаты (на момент написания данной книги) 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 более чем на порядок выше для промышленности.

#### Специализированные программы

Специализированные программы для решения задач ТК разработаны в Управлении по аэронавтике США NASA, Управлении по аэронавтике Франции ONERA, Университете Уэйна (США), Федеральном институте исследований материалов ВАМ (Германия), Институте технологии конструкций ИТС (Италия) и ряде других организаций. На коммерческом уровне выполнен отечественный пакет фирмы "Инновация" (табл. 4.3).

**4.2. Коммерческие пакеты общего применения для теплофизических расчетов \***

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

\* Ряд данных предоставлен Э. Гринцато.

\*\* Некоторые характеристики присущи не всем программам.

**4.3. Специализированные компьютерные программы фирмы "Инновация" для решения задач ТК**

Программа	Характеристика
Multilayer-3	<i>Аналитическое</i> решение одномерной задачи нагрева неадиабатической трехслойной пластины прямоугольным импульсом
Multilayer-3D	<i>Численное</i> решение одномерной задачи нагрева неадиабатической многослойной пластины при произвольной функции нагрева и наличии фазового перехода в одном из внутренних слоев
ThermoCalc-2D	<i>Численное</i> решение задачи нагрева трехслойного дисковидного тела с концентрическим дефектом в виде диска (двухмерная цилиндрическая модель) Нагрев прямоугольным и синусоидальным импульсом Тепловые волны Адаптивный учет конвекции и излучения
ThermoCalc-6L	<i>Численное</i> решение задачи нагрева трехслойного параллелепипеда с 9-ю дефектами в форме параллелепипедов Анизотропные ТФХ 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
ThermoCalc-30L	Аналог программы ThermoCalc-6L До 30-ти различных слоев с анизотропными ТФХ и ориентированными друг относительно друга на угол, задаваемый пользователем

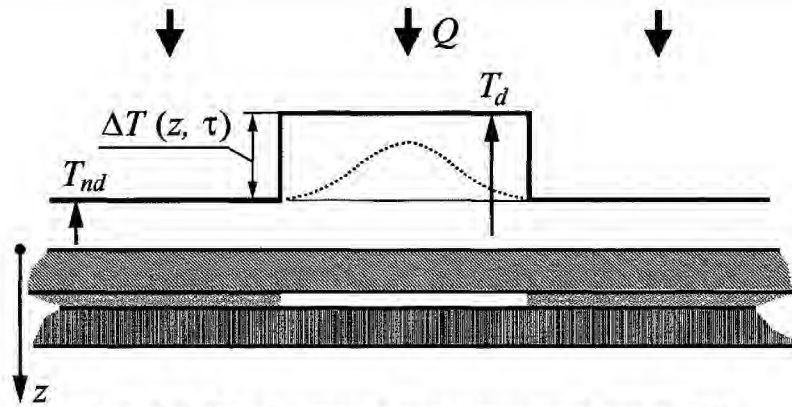


Рис. 4.4. Обобщенная одномерная модель ТК  
(пунктиром показан профиль температуры в случае учета трехмерной диффузии тепла)

## 4.2. ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ТК

### 4.2.1. Температурный сигнал в одномерной модели

Использование этой модели для расчета сигналов от внутренних дефектов предполагает, что теплопередача в изделии осуществляется независимо в дефектной и бездефектной области. При этом "поперечной" диффузией тепла можно пренебречь, вследствие чего пространственный профиль  $\Delta T$  в любой момент времени имеет вид прямоугольной ступеньки (см. рис. 4.4).

В одномерной модели температурный сигнал над дефектом зависит только от времени и пространственной координаты  $z$ , направленной в глубь изделия (рис. 4.4)

$$\Delta T(z, \tau) = T_d(z, \tau) - T_{nd}(z, \tau). \quad (4.24)$$

Дифференциальный температурный сигнал  $\Delta T$  рассчитывают в виде разности двух решений, полученных соответственно для дефектной и бездефектной зон. Такой подход позволяет оценить зависимость  $\Delta T$  от ТФХ изделия, а также от глубины залегания, толщины и ТФХ дефекта.

Границы применимости одномерных моделей, в которых влияние диффузии тепла на величину  $\Delta T$  остается незначительным, рассмотрены ниже. На практике "поперечные" (трехмерные) тепловые потоки на краях дефекта сглаживают форму температурного сигнала и при определенных размерах дефекта приводят к существенному снижению амплитуды  $\Delta T$  (см. пунктирную линию на рис. 4.4).

### 4.2.2. Одномерная модель ТК с абсолютно нетеплопроводным дефектом

#### Нагрев неадиабатической пластины (классическое решение)

Простейшая одномерная модель дефекта при одностороннем ТК изображена на рис. 4.5. Она является дальнейшим упрощением модели, представленной рис. 4.4. Дефект считается абсолютным теплоизолятором, поэтому на его границе выполняется условие:  $\partial T / \partial z = 0$ . В дефектной зоне в процессе теплопроводности участвует только слой материала толщиной  $l$ , причем  $l$  есть глубина залегания дефекта. Очевидно, что достоверность модели возрастает с уменьшением теплопроводности дефекта по сравнению с основным материалом. Как будет показано ниже, такая модель лучше описывает задачу определения толщины пластины (при оценке коррозии задней поверхности, см. также п. 3.7.3), нежели задачу обнаружения скрытых дефектов. Кроме того, модель на рис. 4.5, в отличие от более общей модели

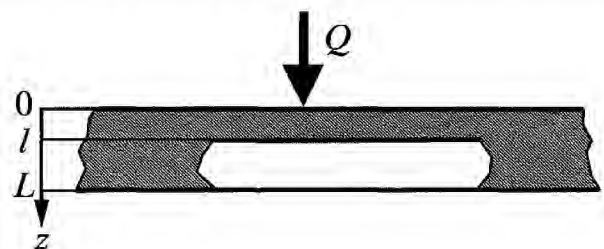


Рис. 4.5. Одномерная модель абсолютно нетеплопроводного дефекта при одностороннем ТК

рис. 4.4, малоприспособна для анализа двухсторонней процедуры ТК, в которой температурный сигнал  $\Delta T$  должен приниматься равным температуре бездефектной поверхности  $T_{nd}$ , поскольку под дефектом избыточная температура считается равной нулю. Ниже рассмотрен только случай одностороннего ТК.

Рассмотрим нагрев пластины, изображенной на рис. 4.5, тепловым потоком в виде прямоугольного импульса длительностью  $\tau_h$ . Вначале проанализируем случай неадиабатической пластины. Постановка задачи в бездефектной области имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (4.25)$$

$$T(z, \tau = 0) = 0; \quad (4.26)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = Q - \alpha^F T(z=0); \quad (4.27)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = \alpha^R T(z=L), \quad (4.28)$$

где (4.25) – одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности, (4.26) – начальное условие, (4.27) и (4.28) – граничные условия на поверхностях пластины.

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

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

Заметим, что модель (4.25 – 4.28) описывает также нагрев (или охлаждение) пластины в среде с температурой  $T_a$ . Действительно, условие (4.27) для нагрева в среде можно записать в виде формулы

$$-\lambda \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = \alpha^F [T_a - T(z=0)], \quad (4.29)$$

которая идентична условию (4.27), если принять  $Q = \alpha^F T_a$  (при этом температуру также отсчитывают от начальной температуры пластины). В случае охлаждения пластины следует просто изменить знак в правой части уравнения (4.29).

В классической теории теплопроводности рассмотрена задача нагрева обеих поверхностей пластины толщиной  $2L$  в среде с температурой  $T_a$ , причем в силу симметрии в центре пластины производная от температуры по координате равна нулю [17]. Очевидно, что такая задача идентична модели (4.25 – 4.28). Для передней поверхности ее решение имеет вид (см. табл. 2.5)

$$\frac{T^F}{Q'} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \text{Bi}}{\text{Bi}(\text{Bi}+1) + \mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \text{Fo}}, \quad (4.30)$$

где  $Q' = Q/\alpha$  и  $\mu_n$  – положительные корни характеристического уравнения  $\mu_n \text{tg}(\mu_n) = \text{Bi}$ . Некоторые значения  $\mu_n$  приведены в табл. 4.4.

При  $\tau \rightarrow \infty$   $T^F \rightarrow Q/\alpha$ . При нагреве в среде с температурой  $T_a = Q/\alpha$  температура поверхности пластины стремится к  $T_a$  (при адиабатической задней поверхности). С уменьшением времени процесса число значимых корней и соответственно членов ряда возрастает. Для изделий, удовлетворяющих условию  $\text{Bi} \leq 0,1$ , рекомендовано оставлять только первый член ряда  $\mu_1 = \sqrt{\text{Bi}}$  [17]. Тогда в бездефектной области решение имеет вид:

$$\begin{aligned} T_{nd}^F(\tau) &= \frac{Q}{\alpha} \left( 1 - \cos \sqrt{\text{Bi}} e^{-\text{Bi} \text{Fo}} \right) = \\ &= \frac{Q}{\alpha} \left( 1 - \cos \sqrt{\text{Bi}} e^{-\frac{\alpha a}{\lambda L} \tau} \right). \end{aligned} \quad (4.31)$$

4.4. Корни характеристического уравнения:  $\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = \operatorname{Bi}$  [17]

Bi	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$
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

Несмотря на то, что современные компьютеры позволяют выполнять вычисления с любым числом корней трансцендентного уравнения, использование классического решения (4.30) неудобно, если необходимо вычислять его производные. С. Маринетти предложил следующие соотношения для аналитического определения  $\mu_n$ :

$$\mu_1 = a_1 \operatorname{Bi}^2 + b_1 \sqrt[3]{\operatorname{Bi}} + c_1 \operatorname{Bi} + d_1 \sqrt{\operatorname{Bi}} + e_1;$$

$$\mu_n = a_n \operatorname{Bi}^2 + \frac{1}{\pi(n-1)} \operatorname{Bi} + \pi(n-1); \quad n = 2, 3, \dots;$$

$$a_n = \frac{1}{\alpha_a n^3 + \beta_a n^2 + \gamma_a n + \delta_a}; \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 5,77 \cdot 10^{-2}; & \alpha_a &= -13,5; \\ b_1 &= -2,12 \cdot 10^{-1}; & \beta_a &= -345,0; \\ c_1 &= 1,68 \cdot 10^{-2}; & \gamma_a &= 6184,4; \\ d_1 &= 9,97 \cdot 10^{-1}; & \delta_a &= -22\,718,0; \\ e_1 &= 1,70 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Погрешность аппроксимации классического решения (4.30) с использованием корней (4.32) не превышает 2 % в интервале  $\operatorname{Fo} = 0,1 \dots 1$  и  $\operatorname{Bi} = 0,05 \dots 1$ , но становится значительной для  $\operatorname{Bi} > 2$ .

## Оценка температурного сигнала от дефекта при импульсном ТК адиабатической пластины

Анализ решения (4.31) с точки зрения его применимости в ТК показывает, что при малых временах (порядка 0,01...0,1 с для тонких изделий) один член ряда не обеспечивает требуемой точности, а расчет со многими членами ряда сопряжен с определенными вычислительными трудностями, поэтому для часто встречающегося в ТК случая  $\operatorname{Bi} \leq 0,1$  целесообразно использовать адиабатическое решение для нагрева прямоугольным импульсом (см. табл. 2.5)

$$T_{nd}^F = \frac{QL}{\lambda} \left\{ \operatorname{Fo}_h + \frac{2}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 \operatorname{Fo}} \left( e^{n^2 \pi^2 \operatorname{Fo}_h} - 1 \right) \right\}, \quad (4.33)$$

которое при  $\tau \gg \tau_h$  совпадает с решением задачи адиабатического нагрева пластины импульсом Дирака (см. табл. 2.5)

$$T_{nd}^F = \frac{Wa}{\lambda L} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 \operatorname{Fo}} \right). \quad (4.34)$$

Решение (4.34) будет использовано ниже, главным образом, для того, чтобы



проиллюстрировать ограниченность простейшей одномерной модели рис. 4.5.

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

$$T_d^F = \frac{Wa}{\lambda L} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 Fo L^2 / l^2} \right). \quad (4.35)$$

Заметим, что энергетически импульс Дирака и прямоугольный импульс связаны очевидным соотношением  $W = Q \tau_h$ . Некоторые особенности решений (4.34–4.35) при определении толщины пластины (оценке коррозии) были рассмотрены в п. 3.7.3. На рис. 4.6 показано развитие температурного сигнала  $\Delta T$  и текущего контраста  $C^{run}$  во времени для дефекта на глубине  $l$ . Видно, что при  $\tau \rightarrow \infty$  оба параметра стремятся к величине  $L/l - 1$ , т.е. не зависят от ТФХ.

Для иллюстрации того, насколько данная модель отражает реальные ситуации ТК, на рис. 4.7 показано изменение текущего контраста  $C^{run}$  во времени над дисковидным воздушным дефектом ра-

диусом  $r_d = 5$  мм и толщиной  $d = 0,2$  мм, который расположен на глубине 1 мм в пластине толщиной 5 мм, выполненной из различных материалов. Нагрев производят импульсом длительностью  $\tau_h = 0,01$  с. Истинные значения контраста рассчитаны с помощью программы ThermoCalc-2D ("Инновация"). Согласно одномерной модели максимальный контраст для случая рис. 4.7 должен быть равен  $C_m^{run} = L/l - 1 = 4$ . Из рис. 4.7 следует, что наиболее близкое значение контраста создается воздушным дефектом в стали благодаря существенному различию ТФХ. Для углепластика оценка  $C^{run}$  становится нереалистичной.

Достоверность рассмотренной простейшей одномерной модели возрастает с увеличением толщины дефекта или теплопроводности основного материала. Следует также отметить, что описанная модель предсказывает чрезмерно длительные времена наблюдения, эквивалентные времени перехода в квазистационарный режим, поэтому ее практическое значение невелико.

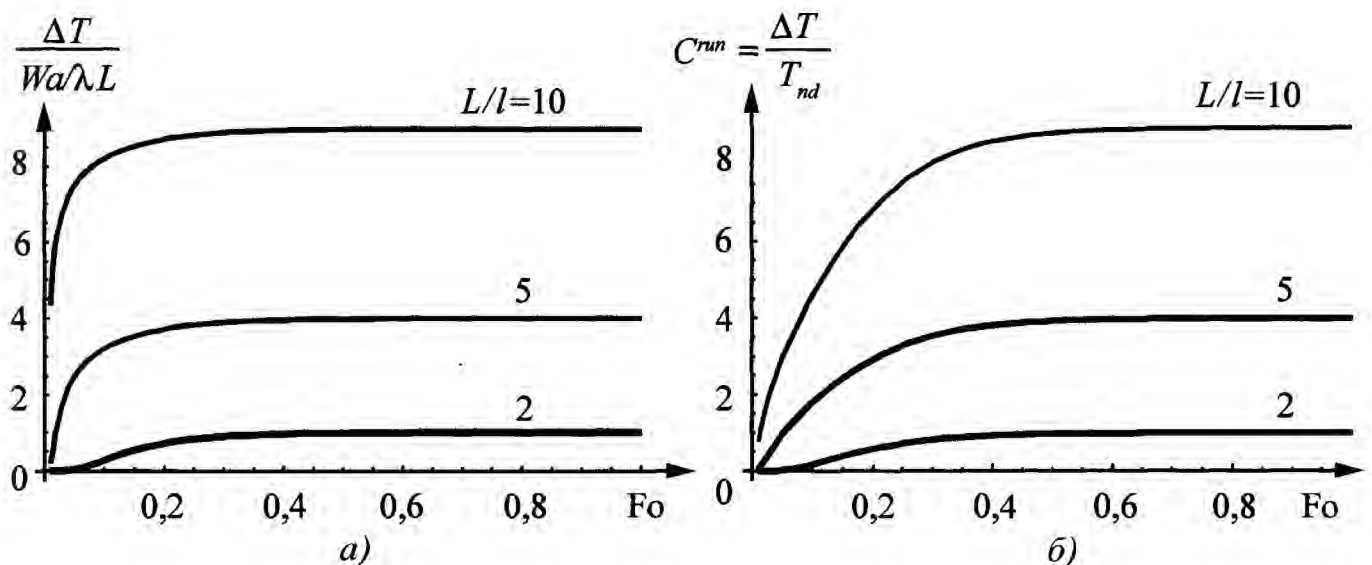


Рис. 4.6. Изменение температурного сигнала (а) и текущего контраста (б) над дефектом в одномерной адиабатической модели ТК согласно формулам (4.34) и (4.35)

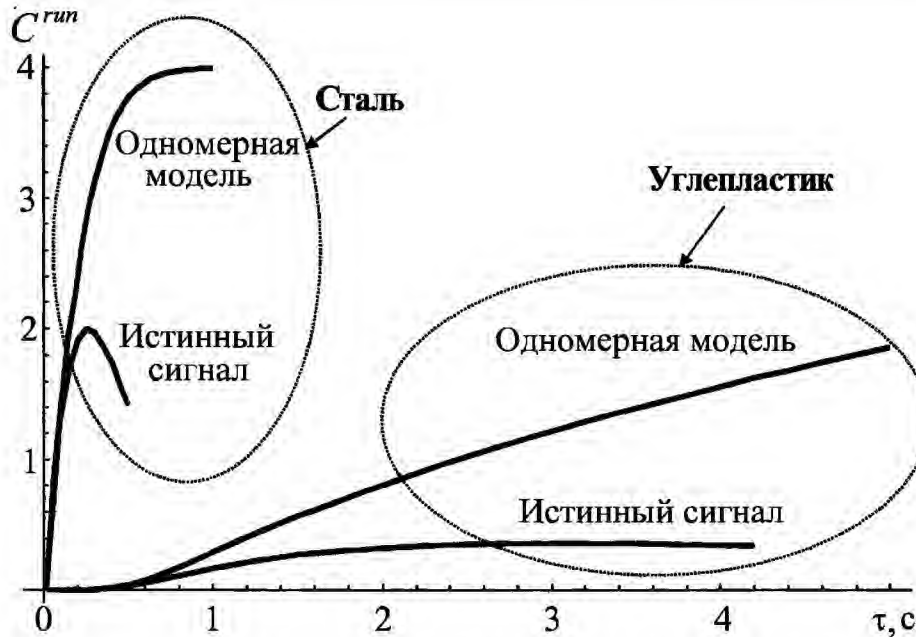


Рис. 4.7. Проверка одномерной адиабатической модели для воздушного дефекта радиусом 5 мм и толщиной 0,2 мм, расположенного в углепластике и стали AISI 1010 на глубине 1 мм (нагрев импульсом длительностью 0,01 с; ТФХ материалов взяты из табл. 2.2)

4.2.3. Гармонические тепловые волны

Интерференция в адиабатическом тонком слое и дефекте

В п. 3.10.4 мы рассмотрели отражение тепловых волн от поверхности раздела двух сред. Следуя работе Д. Альмонда и П. Пателя [44], рассмотрим особенности поведения тепловых волн в тонких слоях (дефектах), где наличие интерференции между падающими и отраженными волнами приводит к существенным изменениям амплитуды  $\Delta T(\tau)$  по сравнению со случаем отражения от границы полубесконечной среды.

Рассмотрим важный для практики случай нагрева покрытия толщиной  $L_c$  на подложке (рис. 4.8, а). Подложка рассматривается как полуограниченное тело, т.е. ее толщина значительно больше длины тепловой диффузии. Будем считать, что вся тепловая энергия нагрева выделяется на поверхности покрытия, хотя в общем случае нагрева оптическим излучением следует учитывать затухающее с ростом глубины поглощение энергии в тонком частично-прозрачном покрытии.

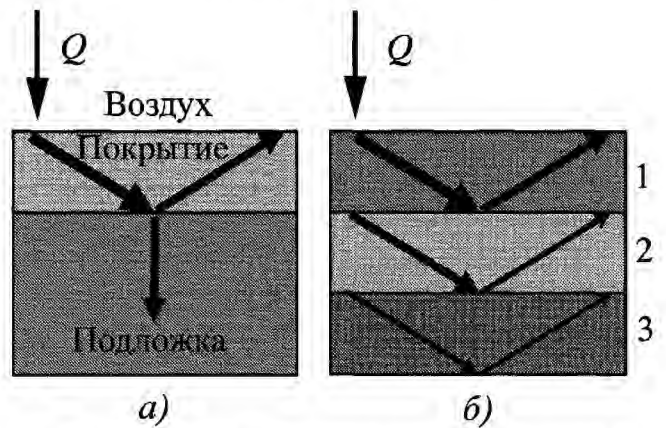


Рис. 4.8. Интерференция тепловых волн в покрытии (а) и дефекте (б)

Температура на поверхности покрытия представляет сумму падающих и отраженных волн, которые распространяются в покрытии, отражаясь от границ покрытие-подложка и покрытие-воздух (рис. 4.8, а). Выражение для поверхностной температуры получено К. Беннетом и Р. Пэтти в следующем виде [49]

$$T(z=0) = A\theta_{c-a} \left[ \frac{1 + R_{c-s} \exp(-2\sigma_c L_c)}{1 - R_{c-s} R_{c-a} \exp(-2\sigma_c L_c)} \right], \tag{4.36}$$

где  $A$  – амплитуда тепловой волны;  $\theta_{c-a}$  – коэффициент пропускания границы

покрытие-воздух;  $R_{c-s}$  – коэффициент отражения границы покрытие-подложка;  $R_{c-a}$  – коэффициент отражения границы покрытие-воздух, индекс "с" относится к покрытию (coating).

Заметим, что на границе покрытие-воздух коэффициент отражения  $R_{c-a} \approx 1$  и коэффициент пропускания  $\theta_{c-a} \approx 2$ , по-

скольку  $b \sim 0$  из-за низкой тепловой инерции воздуха.

Для этого практически важного случая на рис. 4.9 изображены нормализованные модуль и фаза поверхностной температурной волны  $T_{norm}(z=0)$ , построенные согласно следующим выражениям:

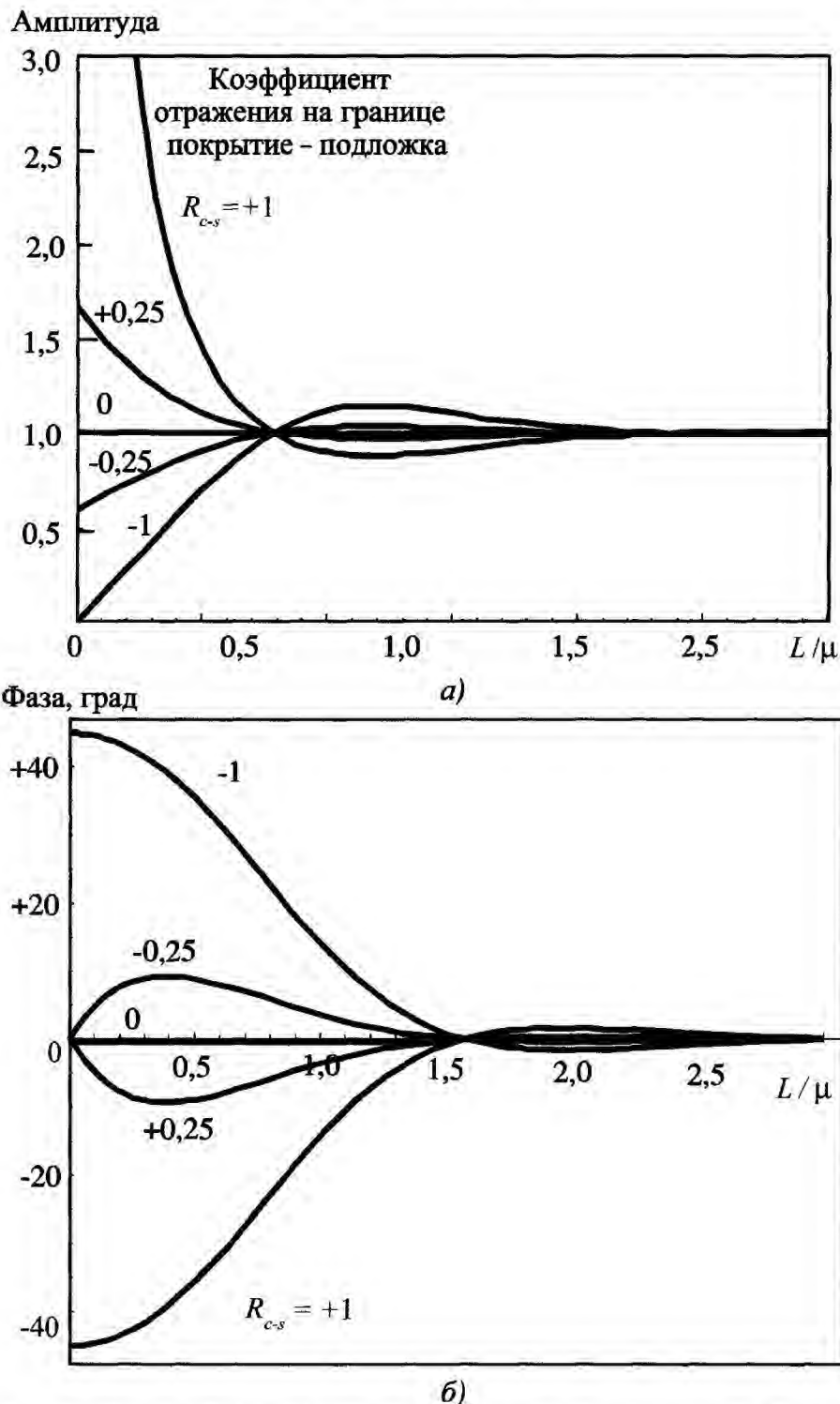


Рис. 4.9. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловых волн на поверхности покрытия для различных значений коэффициента отражения на границе покрытие-подложка (подложка моделируется полуограниченным телом;  $R_{c-a} = 1$ ;  $T_{c-a} = 2$ ;  $L_c = L$ )

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

$$\text{Модуль} = \sqrt{[\text{Re}\{T_{norm}\}]^2 + [\text{Im}\{T_{norm}\}]^2};$$

$$\text{Фаза} = \text{arctg} \frac{\text{Im}\{T_{norm}\}}{\text{Re}\{T_{norm}\}}, \quad (4.37)$$

где Re и Im – действительная и мнимая часть комплексного числа, соответственно.

Графики рис. 4.9 отчетливо показывают, что интерференция тепловых волн существенна при толщине покрытия менее одной длины диффузии. Особыми являются точки пересечения кривых с нулевой осью: для амплитуд это имеет место при  $L_c/\mu = 0,785$ , а для фаз – при  $L_c/\mu = 1,571$ . Этот факт может свидетельствовать о более глубоком проникновении фазы тепловых волн по сравнению с их амплитудой, что делает фазовый анализ более предпочтительным. Подробнее этот тезис будет рассмотрен ниже.

Практическое значение выражения (4.37) заключается в возможности определения ТФХ или толщины покрытия по результатам измерения поверхностной температуры. Заметим, что, в силу комплексного характера  $\sigma_c$ , температура

также является комплексной функцией. Это приводит к тому, что волна температуры в любой точке тела не совпадает по фазе с волной нагрева.

Внутри дефектов, например, трещин или расслоений, также происходит интерференция тепловых волн, поэтому коэффициент отражения тепловой волны от дефекта становится зависимым от частоты. Эффективный коэффициент отражения тонкого инородного включения равен (рис. 4.8, б) [44]

$$\Gamma = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2 \exp(-2\sigma_2 L_2)}{1 + \Gamma_1 \Gamma_2 \exp(-2\sigma_2 L_2)}, \quad (4.38)$$

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. 4.8, б),  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  – коэффициенты отражения тепловой волны для границ слоев 1/2 и 2/3,  $L_2$  – толщина 2-го слоя. Комплексный коэффициент  $\Gamma$  зависит от типа материала, частоты и толщины дефекта.

На рис. 4.10 изображены зависимости коэффициента отражения тепловых волн от воздушных дефектов в дюралюминии и углепластике на двух частотах:

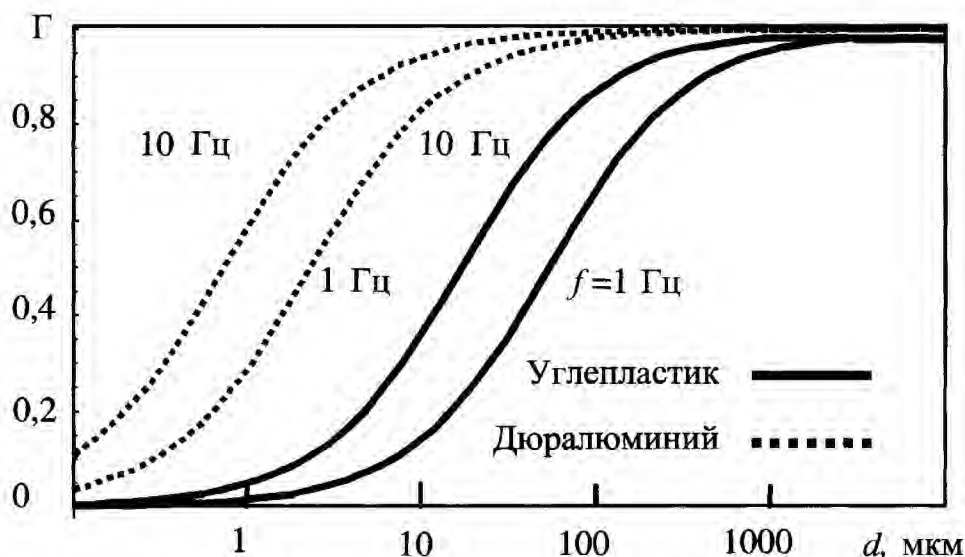


Рис. 4.10. Коэффициент отражения тепловых волн  $\Gamma$  различной частоты от тонких воздушных дефектов в дюралюминии и углепластике (см. ТФХ материалов в табл. 2.2)

1 и 10 Гц, рассчитанные согласно (4.38). Видно, что величина  $\Gamma$  возрастает с увеличением частоты, теплопроводности материала и толщины дефекта. Следует отметить насыщение соответствующей функции, означающее, что толщина дефекта, начиная с некоторого значения, перестает влиять на коэффициент отражения; ниже мы увидим, что этот вывод справедлив для практически важной зависимости сигнала  $\Delta T$  от толщины дефекта.

Выражение (4.38) справедливо для емкостных дефектов, образованных слоями с выраженными границами. Коэффициент отражения тепловой волны от резистивного дефекта дается следующим выражением [44]

$$\Gamma = \frac{1 - b_{21} + R_d \lambda_2 \sigma_2}{1 + b_{21} + R_d \lambda_2 \sigma_2}, \quad (4.39)$$

где, в отличие от выражения (4.38), оба индекса 1 и 2 относятся соответственно к слоям основного материала, разделенным слоем с тепловым сопротивлением  $R_d$ .

Сравнение выражений (4.38) и (4.39) для дефектов в дюралюминии и углепластике показывает совпадение значений коэффициента отражения (см. рис. 4.10); таким образом, тонкие газообразные дефекты в твердых материалах могут моделироваться контактным сопротивлением  $R_d$ , что упрощает соответствующие аналитические выражения.

#### Неадиабатическая пластина переменной толщины и простейшая оценка сигнала от дефектов

Решение задачи нагрева пластины гармоническим тепловым потоком с неадиабатическими ГУ приведено в табл. 2.6. Используя равенство  $\sqrt{\pm j} = \pm\sqrt{0,5}(1 \pm j)$ , для передней поверхности пластины это решение можно записать в следующем явном виде:

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

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

$$B = \text{ch}^2(u) \cos^2(u) + \text{sh}^2(u) \sin^2(u);$$

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

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

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

$$u = \sqrt{\frac{Pd}{2}}. \quad (4.40)$$

Основным параметром решения является критерий Предводителя Pd =  $\omega L^2 / a$ . При  $L \rightarrow \infty$  решение (4.40) переходит в решение для полуограниченного тела. Заметим, что в гармонических решениях табл. 2.6 отсутствует постоянная составляющая нагрева, а также затухающий со временем член, связанный с влиянием начальных условий.

Графики рис. 4.11 иллюстрируют, как отдельные тепловые волны взаимодействуют с пластинами из углепластика различной толщины. В согласии с предыдущими выводами видно, что низкочастотные волны проникают глубже в объект контроля и создают более высокую поверхностную температуру. В этом случае нельзя говорить об оптимальной частоте нагрева, по крайней мере, в бездефектной области. Фактически, максимальная температура нагрева обеспечивается волной нулевой частоты, т.е. непрерывным нагревом.

Оба графика на рис. 4.11 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 на графиках рис. 4.11, соответствующие минимумам функций  $A(L)$  и

$\Psi(L)$ . Предположительно, их наличие связано с интерференцией тепловых волн.

Сравнение графиков рис. 4.9 для амплитуды и фазы тепловой волны позволяет принять, что фаза распространяется до глубин, приблизительно вдвое больших, чем амплитуда волны той же частоты. Рассмотрим этот феномен на примере углепластика, используя данные рис. 4.11. Максимальную глубину проникновения фазы  $L_{\max}^{\text{Phase}}$  и амплитуды  $L_{\max}^{\text{Ampl}}$  предлага-

ется оценивать по минимумам функций  $A(L)$  и  $\Psi(L)$ , которые до определенной степени соответствуют переходу к условиям полугограниченного тела. Тогда из графиков рис. 4.11 можно получить, что  $L_{\max}^{\text{Phase}} / L_{\max}^{\text{Ampl}} \approx 1,5$  для  $f = 0,2$  Гц и  $L_{\max}^{\text{Phase}} / L_{\max}^{\text{Ampl}} \approx 1,7$  для  $f = 1$  Гц. Сравнение глубин проникновения амплитуды и фазы тепловых волн будет продолжено в п. 6.5 с использованием Фурье-анализа.

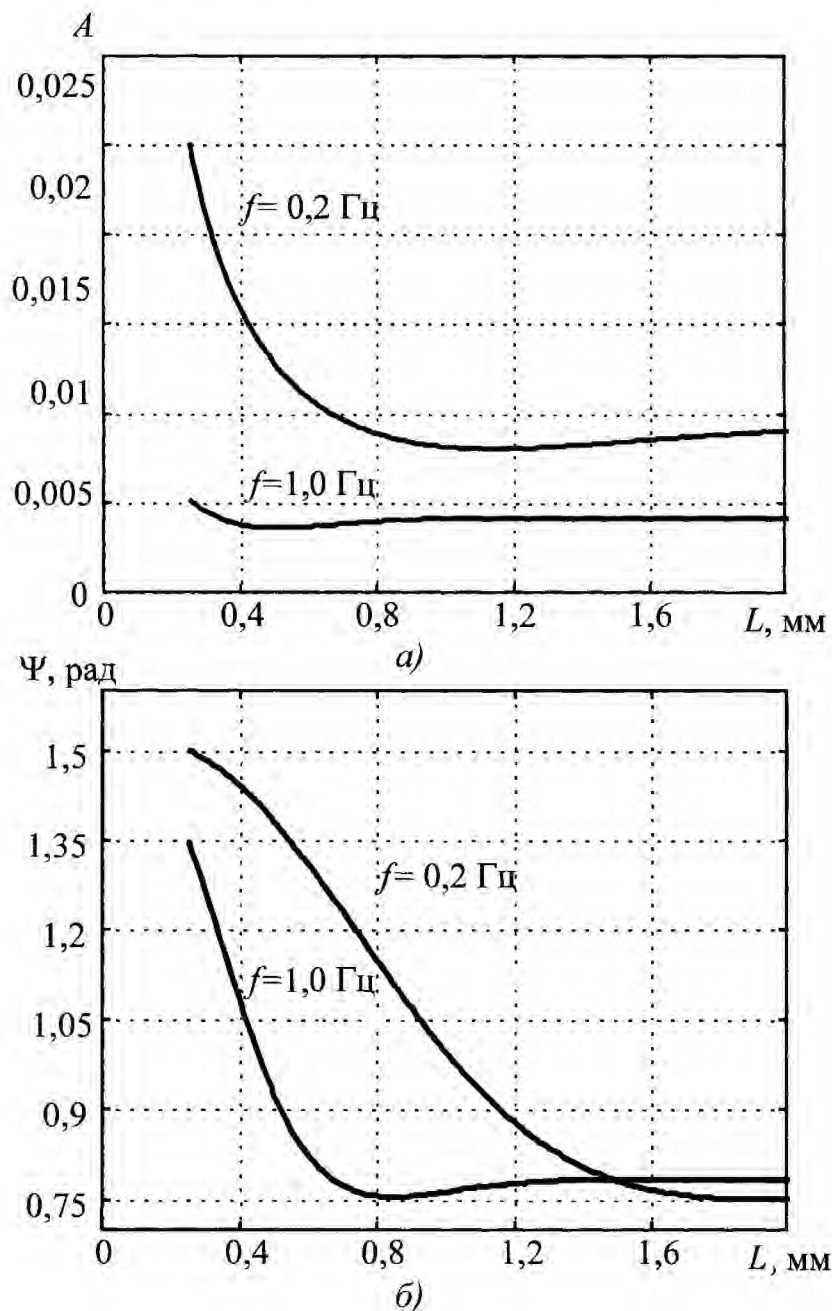


Рис. 4.11. Амплитуда (а) и фаза (б) тепловой волны в зависимости от толщины пластины из углепластика

Если принять модель идеально отражающего (полностью теплоизолированного) одномерного дефекта (п. 4.2.2, модель рис. 4.5), то одно и то же решение (4.40) можно использовать для анализа нагрева как бездефектной, так и дефектной зоны, принимая, что в зоне дефекта  $L = l$ .

Рассмотрим гармонический нагрев почвы, в которой на глубине 5 см находится дисковидный дефект диаметром 20 см и толщиной 10 см (обнаружение заглублен-

ных мин при нагреве солнечным излучением). В табл. 4.5 приведена амплитуда и фаза поверхностных температурных волн над дефектом и вдали от него, рассчитанные по формулам (4.40). Для сравнения приведены результаты расчета в реальной геометрии. В одномерной модели наличие дефекта существенно изменяет как амплитуду, так и фазу температурной волны, в то время как над реальными дефектами изменение обеих параметров менее значительно.

#### 4.5. Сравнение одномерной и трехмерной модели тепловых волн при обнаружении дисковидного дефекта (противопехотной мины) диаметром 20 см и толщиной 10 см в почве на глубине 5 см

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

Примечание. ТФХ материалов в табл. 2.2; нагрев типа  $Q(\tau) = Q_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau\right)$ ;  $T = 24$  ч;

$Q_m = 500$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha^F = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

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



Рис. 4.12. Сравнение одномерной и трехмерной модели тепловых волн при обнаружении воздушного полости в почве на глубине 5 см

На рис. 4.12 приведены три периода температурного сигнала  $\Delta T(\tau)$  для обеих моделей (видно, что влияние начальных условий в трехмерной модели исчезает уже в течение первого периода). Заметим, что 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 почвах с меньшей теплопроводностью величина сигнала становится еще ниже.

#### 4.2.4. Импульсные тепловые волны

##### Эффекты на границе основного материала и дефекта

В п. 4.2.3 было рассмотрено прохождение гармонических тепловых волн в структуре "покрытие-подложка". Аналогичным образом можно трактовать отражение импульсных тепловых волн на границах разнородных материалов. Как отмечалось в п. 3.7.6, коэффициент отражения на границе материалов 1 и 2 (материал-дефект и дефект-материал) является действительной величиной

$$\Gamma = \frac{e_2 - e_1}{e_2 + e_1}. \quad (4.41)$$

Аналитические решения для многослойных моделей ТК с емкостными слоями имеют громоздкий вид, поэтому чаще всего рассматривают резистивные дефекты, характеризующихся тепловым сопротивлением  $R_d$ . Помимо численных решений, в последнее время широко используют метод "теплогового четырехполюсника", который позволяет рассчитывать параметры теплопередачи в многослойных изделиях при произвольной форме функции нагрева, учитывая такие феномены, как поверхностная теплоотдача, проникновение излучения нагрева в глубь изделия и т.п.

##### Адиабатическое покрытие на подложке

Пусть покрытие толщиной  $L$  нанесено на подложку, которая может рассматриваться как полубесконечное тело. При адиабатических ГУ температура на поверхности покрытия описывается следующими соотношениями.

При нагреве импульсом Дирака с энергией  $W$

$$T^F(\tau) = \frac{W}{e_c \sqrt{\pi\tau}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n e^{-\tau^*/\tau} \right]. \quad (4.42)$$

При нагреве прямоугольным импульсом мощностью  $Q$ :

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

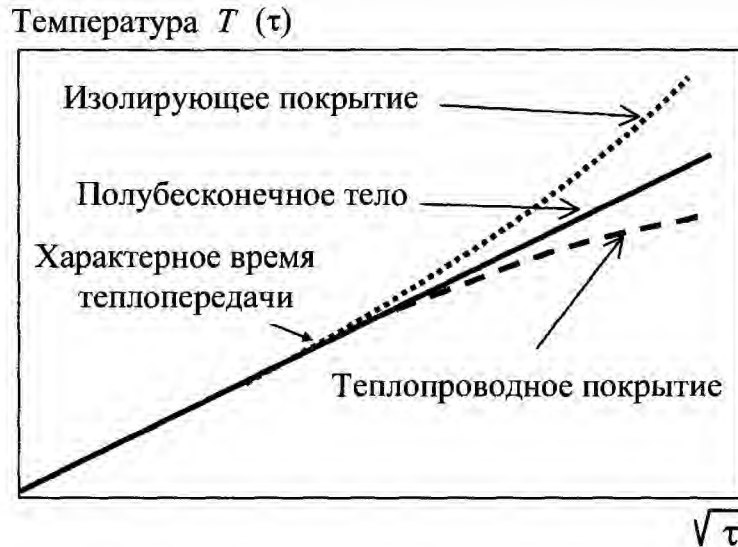
$$F(\tau) = e^{-\tau^*/\tau} - \sqrt{\frac{\pi\tau^*}{\tau}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}} \right). \quad (4.43)$$

При нагреве импульсом в виде прямоугольной ступеньки мощностью  $Q$

$$T^F(\tau) = \frac{2Q}{e_c} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n \times \left\{ e^{-\tau^*/\tau} - \sqrt{\frac{\pi\tau^*}{\tau}} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}} \right) \right\} \right], \quad (4.44)$$

где  $\tau^* = n^2 L^2 / \alpha_c$  – характеристическое время теплопередачи (specific heat transit time), причем индекс "c" относится к покрытию;  $e_c$  – тепловая инерция покрытия; коэффициент отражения  $\Gamma = (e_s - e_c) / (e_s + e_c)$  определен для границы раздела покрытия (c) и подложки (s).





**Рис. 4.13.** Влияние ТФХ подложки на поведение поверхностной температуры (нагрев полубесконечного тела равномерным тепловым потоком в виде ступенчатой функции)

Параметр  $\Gamma$  является индикатором характера теплового контакта между двумя материалами. Нулевое значение  $\Gamma$  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. 4.13 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 квадратного корня из времени  $\sqrt{\tau}$  имеет вид прямой линии. В течение этого периода граница раздела двух сред не проявляется на нагреваемой поверхности. В момент времени  $\tau^*$  температура поверхности начинает отклоняться от той, которая имела бы место при отсутствии границы раздела двух сред; при этом знак отклонения истинной температуры от ожидаемой зависит от знака параметра  $\Gamma$ .

Описанный подход использован в методе ТК, названном *ИК радиометрией с временным разрешением* [50]. Нагрев изделия производят равномерно-распределенным лазерным излучением, спектральный

диапазон которого находится вне диапазона чувствительности применяемой ИК системы, что позволяет измерять температуру передней поверхности на стадии нагрева без влияния отраженного излучения.

**Пример.** Распространим модель теплозащитного покрытия турбинных лопаток на случай отслоения покрытия от основания, что приводит к трехслойной структуре "покрытие-дефект-основание". На практике это ставит задачу идентификации двух типов дефектов теплозащитных покрытий: изменений толщины покрытия и отслоений.

На рис. 4.14 приведены расчетные зависимости дифференциального сигнала  $\Delta T(\tau)$  от параметров указанных дефектов, причем  $l_{ci}$  означает толщину покрытия и  $l_{dj}$  — толщину воздушного дефекта (расчеты выполнены С. Маринетти). Теплофизические характеристики соответствуют принятым в п. 3.1. Несимметричный импульсный нагрев моделировали следующей функцией

$$Q(\tau) = \frac{W\tau}{4\sigma^2} e^{-\tau/2\sigma}, \quad (4.45)$$

где  $\sigma = 0,6$  мс и  $W$  — энергия импульса (заметим, что максимальная плотность мощности имеет место при  $\tau = 2\sigma$ , т.е. при 1,2 мс).

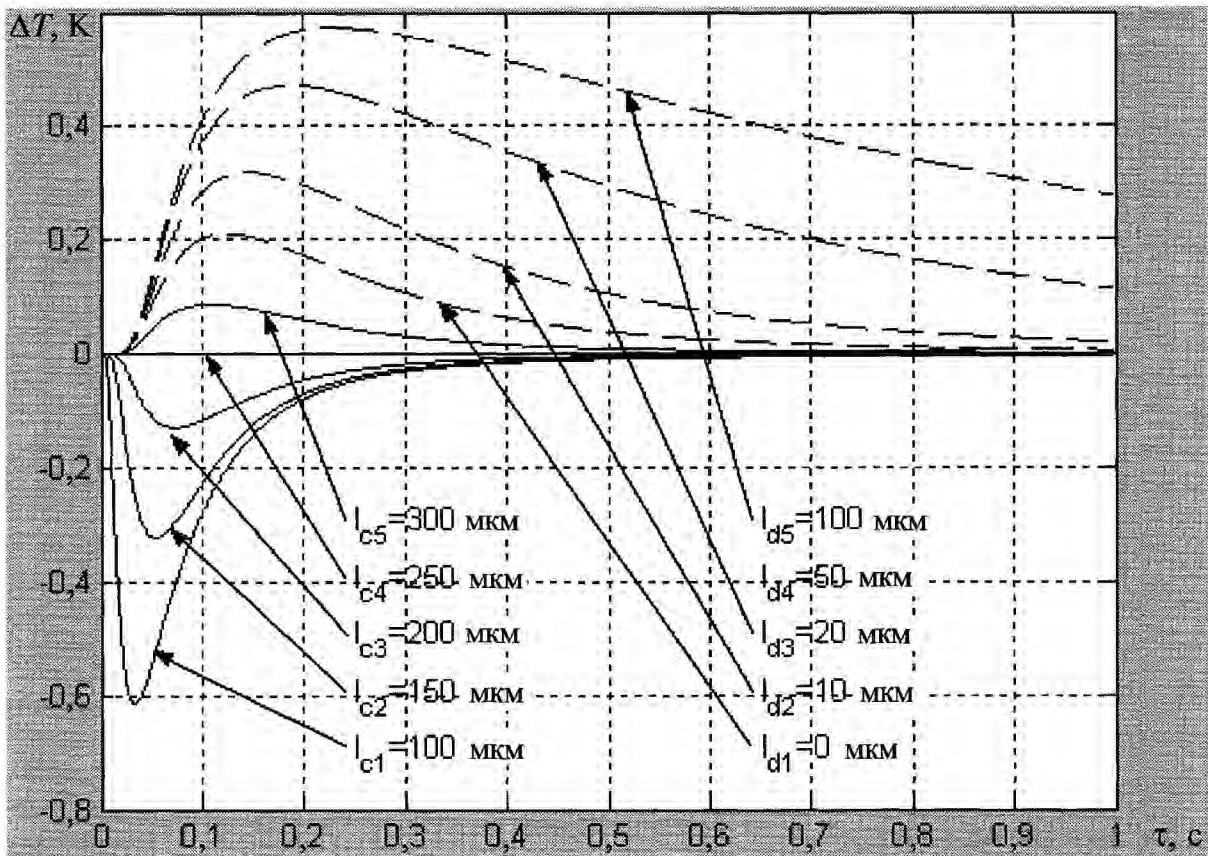


Рис. 4.14. Дифференциальные температурные сигналы от дефектов различного типа, рассчитанные относительно эталонного покрытия толщиной 250 мкм на подложке из стали AISI 304

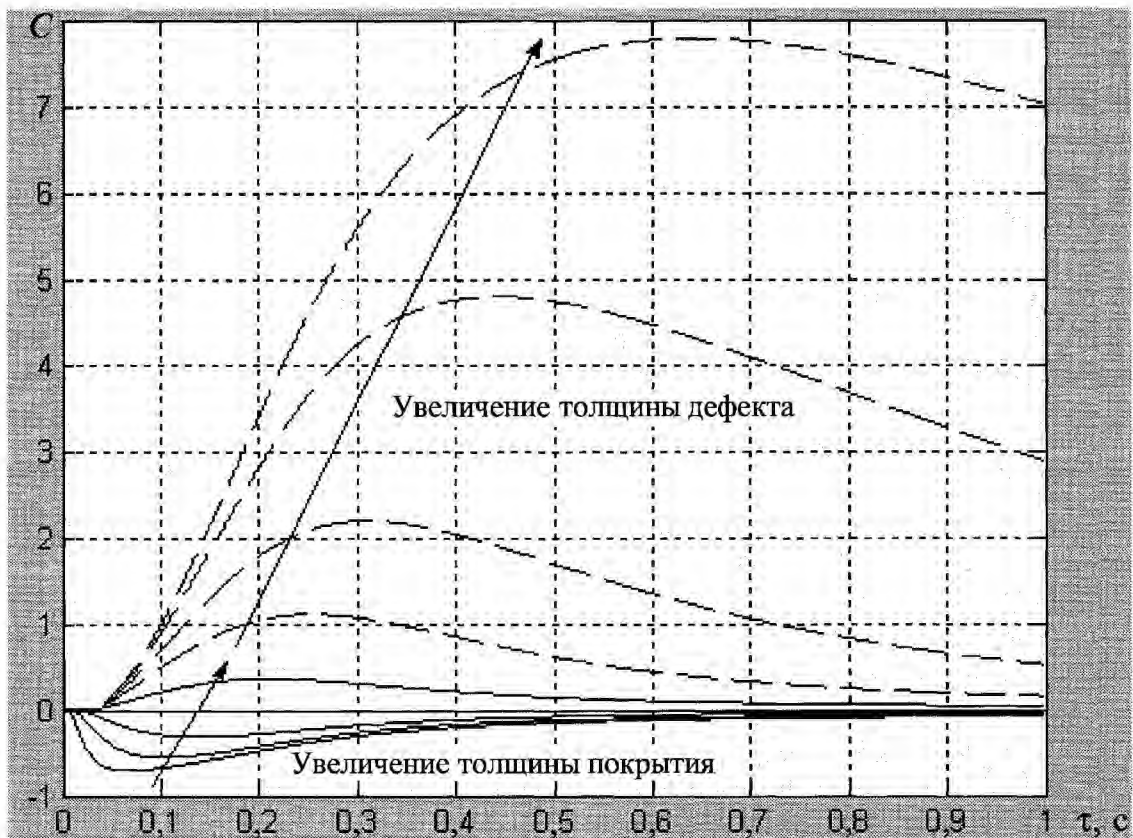


Рис. 4.15. Температурные контрасты от дефектов различного типа, рассчитанные относительно эталонного покрытия толщиной 250 мкм на подложке из стали AISI 304

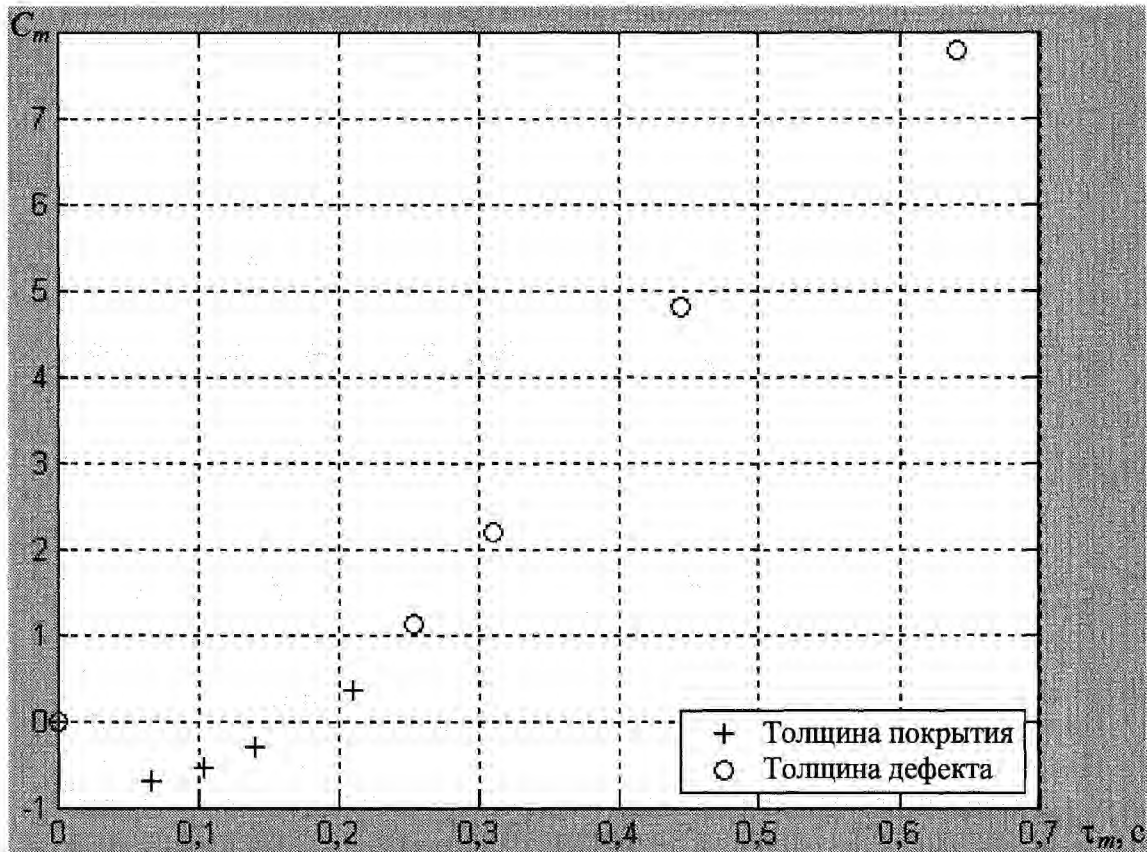


Рис. 4.16. Распределение максимальных контрастов и моментов их наступления для дефектов различного типа (покрытие на подложке из стали AISI 304)

Выражение (4.45) хорошо аппроксимирует форму светового импульса, генерируемого импульсными лампами. Выбранные расчетные параметры типичны для случая ТК покрытий турбинных лопаток. Все данные приведены относительно покрытия толщиной 250 мкм, принятого в качестве бездефектного. На рис. 4.15 те же самые расчетные данные представлены в виде зависимости текущего температурного контраста от времени  $C^{run}(\tau) = \Delta T(\tau)/T_{nd}(\tau)$ . Заметим, что утонение покрытия ведет к снижению температуры вследствие более быстрого стока тепла через подложку. Основным выводом из графиков рис. 4.14 и 4.15 состоит в том, что сигналы, обусловленные отслоениями, характеризуются большими амплитудами и наступают позднее, нежели сигналы, вызванные изменениями толщины покрытий.

Выбирая максимальный контраст  $C_m$  и момент его наступления  $\tau_m$  в качестве информативных критериев, можно

построить распределение  $\{C_m, \tau_m\}$ , показанное на рис. 4.16, которое графически иллюстрирует возможность дискриминации сигналов от дефектов указанных типов.

#### Трехслойная неадиабатическая пластина с емкостным дефектом

Одномерная модель изделия с емкостным дефектом описана в п. 3.9.1 в виде трехслойной пластины, каждый слой которой характеризуется набором параметров  $\{C, \rho, \lambda\}$ . Дифференциальный температурный сигнал в этой модели определяется формулой (4.24). Решение этой задачи в виде (3.54) является достаточно громоздким и требует привлечения компьютерной техники (программа Multilayer-3). Основное достоинство аналитических решений такого вида состоит в возможности проверки точности численных решений, получаемых для так называемых "бесконечных" дефектов, т.е. вытянутых параллельно поверхности нагрева.

Двухслойная адиабатическая пластина с резистивным дефектом и определение "кажущейся" тепловой инерции

Достаточно простое решение имеет место в случае, когда две адиабатические пластины разделены прослойкой с тепловым сопротивлением  $R_d = d/\lambda_d$ . Соответствующие формулы, полученные группой Д. Балажа из ONERA (Управления по авиации Франции) [18, 40], приведены в пп. 3.9.3, 3.9.4.

Анализ задачи нагрева импульсом Дирака оказался весьма эффективным при решении прямых и обратных задач импульсного ТК, в частности, с использованием так называемого метода "кажущейся", т.е. определяемой по результатам эксперимента, тепловой инерции объекта контроля (apparent effusivity method) [18]. Применение этого метода для оценки параметров скрытых дефектов (тепловой дефектометрии) будет рассмотрено в п. 5.1. Здесь мы ограничимся его иллюстрацией на примере ТК изделия, включающего Ni-Cr покрытие толщиной 100 мкм и стальную подложку толщиной 3 мм. Коэффициенты теплопроводности: покрытия –  $\lambda = 14$  Вт/(м·К), подложки –  $\lambda = 70$  Вт/(м·К). Плотность и теплоемкость обоих материалов одинаковы для обоих материалов:  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $C = 500$  Дж/(кг·К).

Идея метода состоит в том, что тепловая инерция  $e$  полуограниченного тела, подвергнутого импульсному тепловому воздействию, в любой момент времени может быть определена по формуле (3.2):

$$e = W / \left[ T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*} \right].$$

Определение абсолютного значения  $e$  требует измерения поглощенной образцом энергии, что представляет технические трудности. Авторы предложили применять этот метод для пластины в течение времени  $Fo < 0,1$ , когда поведение пластины аналогично поведению полуограниченного тела. Поскольку температура передней поверхности адиабатической пластины в конце нагрева равна  $T_\infty = W / (C \rho L)$ ,

тепловую инерцию предложено определять по формуле

$$e = C \rho L / \left[ T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*} \right], \quad (4.46)$$

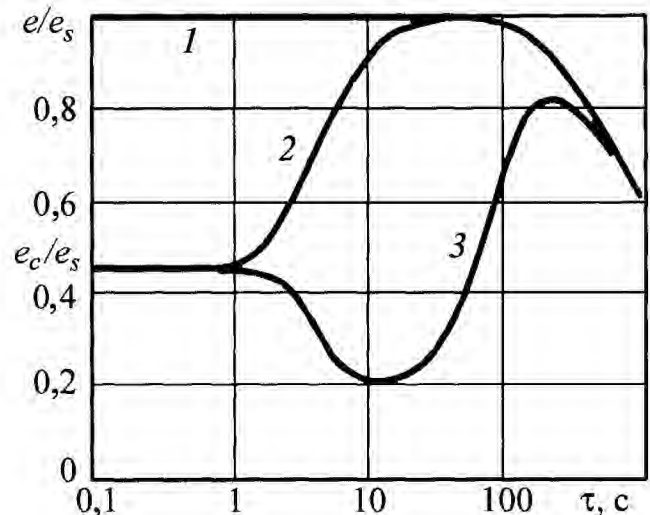
считая, что  $C, \rho, L$  известны.

Поскольку в конкретном эксперименте нагрев производился тепловым импульсом длительностью 40 мкс, возможно применить формулы для нагрева импульсом Дирака и 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) наличия воздушного расслоения толщиной 1 мкм между покрытием и подложкой ( $R_d^* = \sqrt{C_1 \rho_1 \lambda_1} R_d \sqrt{a_d} / d = 0,43$  представляет собой безразмерное тепловое сопротивление дефекта толщиной  $d$ , отнесенное к ТФХ первого слоя).

Соответствующие графики показаны на рис. 4.17 для отношения тепловых инерций покрытия и подложки  $e_c/e_s$ . Для



**Рис. 4.17. 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

подложки из стали без покрытия (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:  $e/e_s = e_c/e_s = \sqrt{\lambda_c/\lambda_s} = 0,45$ . Начиная с 10 мс и вплоть до 100 мс происходит сближение кривых 1 и 2, после чего структура покрытие-подложка начинает вести себя как подложка из стали без покрытия.

Наличие дефекта приводит к почти пятикратному увеличению избыточной температуры в момент времени около 10 мс, что приводит к приблизительно двукратному снижению кажущейся тепловой инерции (кривая 3). Наличие очевидного минимума в поведении функции  $e(\tau)$  является отражением наличия максимума температурного перепада  $\Delta T(\tau)$ , что позволяет предложить решение соответствующей обратной задачи ТК (см. п. 5.1) [18].

#### Многослойная пластина с фазовым превращением в одном из слоев

В ТК в ряде случаев возникает необходимость рассчитывать теплопередачу в телах, где в процессе испытаний происходят фазовые превращения веществ. Примером служит обнаружение воды в сотовых панелях авиационных конструкций (см. Главу 11). Сотовые панели выполнены из двух обшивок, между которыми размещены ячеистые структуры, напоминающие пчелиные соты (рис. 4.18, слева). Обшивка может быть выполнена из металлов (дюралюминия, стали) и композиционных материалов (стекло-, угле- и боропластика). Сами соты изготавливаются из алюминиевой фольги или специальной бумаги, например, типа Nomex.

При эксплуатации самолетов ячеистые структуры могут накапливать воду. Это является опасным дефектом, который

способен вызвать преждевременное разрушение конструкций самолетов, выполненных из сотовых панелей: элеронов, закрылков, рулей высоты и элементов фюзеляжа. При полете на крейсерской высоте вода в сотах замерзает и во время посадки самолета происходит постепенный прогрев панелей и таяние льда.

Соответствующую задачу дефектоскопии можно рассматривать согласно модели п. 3.9.1, не учитывающей процесс таяния. В этом случае расчетные времена оптимального наблюдения разности температур между дефектной и бездефектной зоной оказываются достаточно малыми, особенно для алюминиевых панелей. В то же время на практике вода в сотовых панелях видна с помощью тепловизора в течение нескольких часов после посадки (в зависимости от разности наземной температуры и температуры за бортом в режиме крейсерского полета). Столь длительный период наблюдения температурных сигналов можно объяснить наличием фазового превращения лед-вода, в ходе которого затрачивается определенная энергия на таяние льда, и зона с водой сохраняет низкую температуру в течение более длительного времени, чем это предсказывает модель чистой теплопроводности.

С математической точки зрения данная задача аналогична описанной в п. 3.9.1, однако в центральном слое дефектного участка изделия необходимо отслеживать появление и перемещения границы таяния льда (рис. 4.18, справа). На границе фазового перехода  $x_b$ , движущейся со скоростью  $V$ , выполняется условие неразрывности тепловых потоков и температур с учетом теплоты фазового превращения  $q$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i(x_b)}{\partial x} + \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x_b)}{\partial x} = \rho q V(x_b);$$

$$T_i(x_b) = T_{i+1}(x_b) = T_{ph}, \quad (4.47)$$

где  $T_{ph}$  – температура фазового превращения.

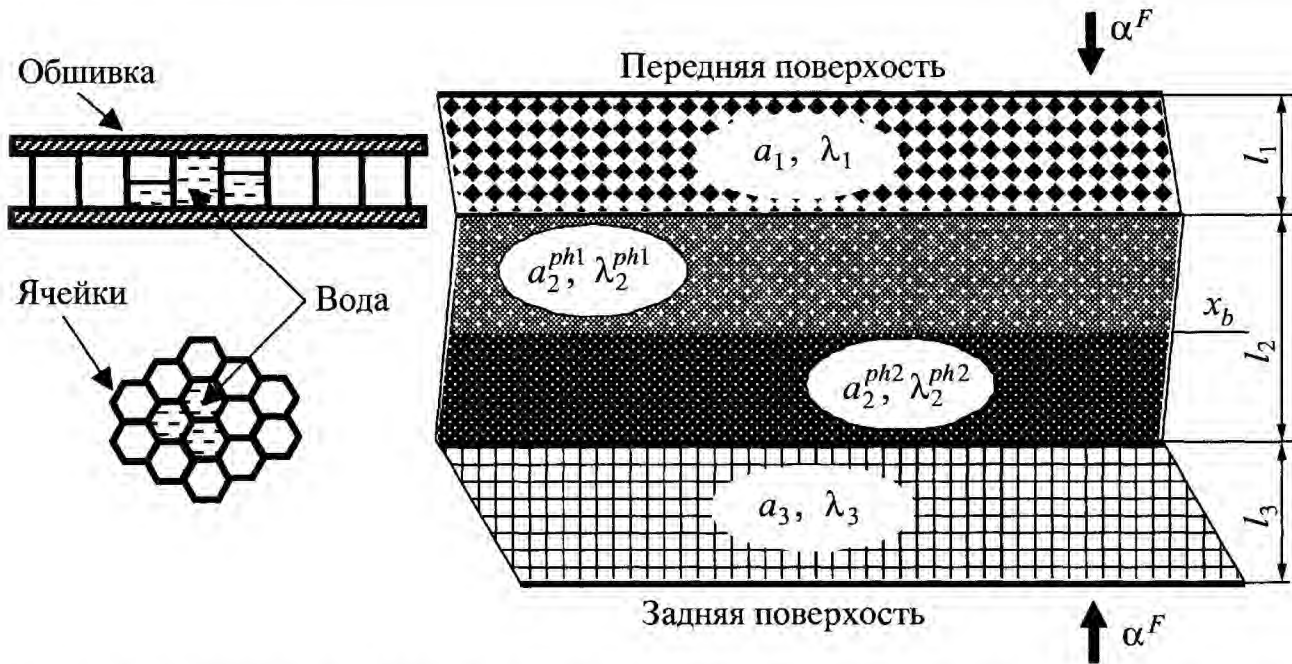


Рис. 4.18. Модель нагрева в среде трехслойной пластины, в центральном слое которой происходит фазовое превращение ( $x_b$  – движущаяся граница фазового перехода; индексы "ph1" и "ph2" обозначают соответственно два фазовых состояния материала центрального слоя)

На рис. 4.19 показаны кривые изменения температуры на поверхности трехслойной пластины, имитирующей алюминиевую сотовую панель толщиной 1 мм со слоем льда/воды толщиной 8 мм. Расчет задачи нагрева панели тепловым потоком  $Q = 500 \text{ Вт/м}^2$  с учетом таяния льда в центральном слое выполнен с помощью программы Multilayer-1D ("Инновация"). Учет фазового превращения лед/вода иллюстрирует характерную особенность поведения температуры в дефектной зоне, а именно, появление так называемой "полочки" температуры, близкой к  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (кривая 3), которая обусловлена расходом тепловой энергии на таяние льда. Соответственно, дифференциальный температурный сигнал  $\Delta T$  (кривая 5), предсказанный моделью с фазовым превращением, сохраняется на почти неизменном уровне в течение более длительного времени, чем это следует из модели чистой теплопроводности (кривая 4).

Заметим, что значительные амплитуды сигнала  $\Delta T$  на рис. 4.19 обусловлены одномерностью модели, что на практике соответствует большому количеству сотовых ячеек, занятых водой.

#### 4.2.5. Границы применимости реалистичных одномерных моделей ТК

Под *реалистичными* одномерными моделями будем понимать такие, которые учитывают все значимые параметры ТК за исключением диффузии тепла на границах дефектов. Единственным параметром, ограничивающим применение моделей типа (3.51), являются поперечные размеры дефекта  $h_x \times h_y$  в декартовых координатах или радиус дефекта  $r_d$  в цилиндрических координатах. Проиллюстрируем эффекты диффузии тепла вокруг скрытых дефектов, используя двухмерную цилиндрическую модель, которая детально рассмотрена в следующем разделе.

В этом параграфе будем считать, что изделие содержит дисковидный дефект радиусом  $r_d$  на глубине  $l$ . Изделие нагревают тепловым импульсом длительностью  $\tau_h$ , причем энергия нагрева равномерно распределена по передней поверхности изделия. Очевидно, что для любой глубины залегания дефекта двухмерный температурный сигнал  $\Delta T^{(II)}$  возрастает с

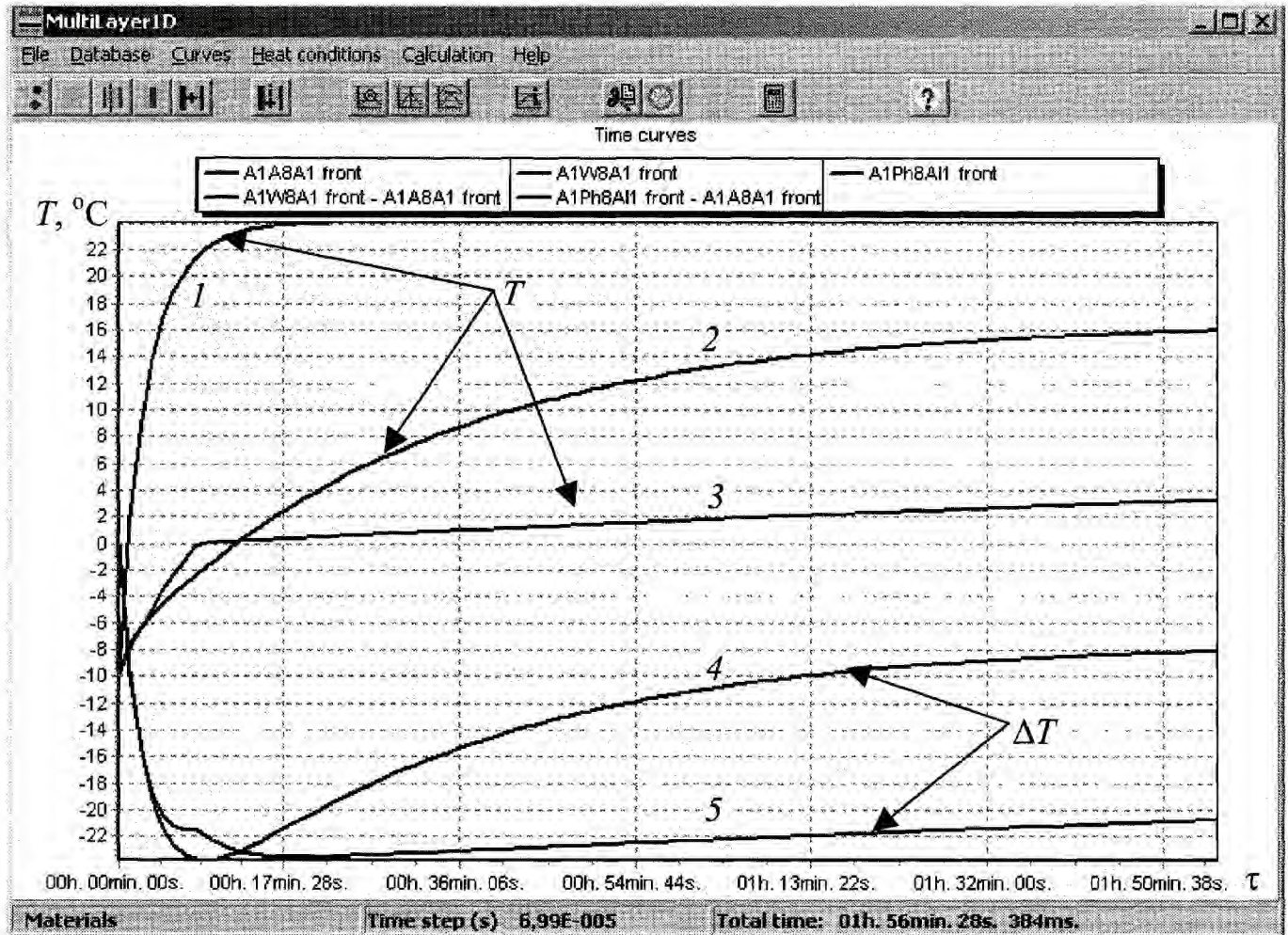


Рис. 4.19. Нагрев алюминиевой сотовой панели с водой (толщина обшивки 1 мм, высота сот 8 мм, начальная температура  $-10^{\circ}\text{C}$ ; плотность мощности теплового потока нагрева  $500 \text{ Вт/м}^2$ , полное время наблюдения 1 ч 50 мин):

- 1 – бездефектная зона; 2 – зона с водой (модель чистой теплопроводности);  
 3 – зона со льдом/водой (модель с фазовыми превращениями); 4 – температурный сигнал (модель чистой теплопроводности); 5 – температурный сигнал (модель с фазовыми превращениями)

ростом радиуса дефекта вплоть до определенного предельного значения  $\Delta T^{(I)}$ , которое определяется решением 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. 4.6 для дефектов в различных материалах (рассмотрены случаи, когда как толщина, так и глубина залегания дефектов, составляет соответственно 10 и 30 % от полной толщины изде-

лия  $L$ ). Значения  $r_d/l$  соответствуют отношению  $\Delta T^{(II)}/\Delta T^{(I)} = 0,9$ , т.е. ситуации, когда сигнал над реальным дефектом составляет 90 % амплитуды максимально возможного (одномерного) сигнала.

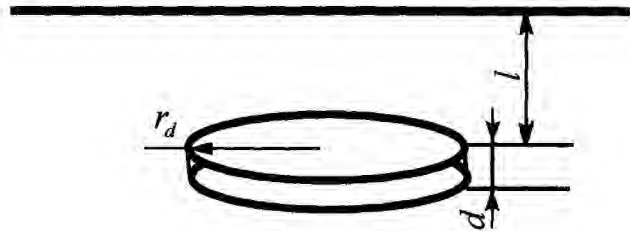
Данные табл. 4.6 показывают, что критические значения  $r_d/l$  существенно превосходят часто упоминаемое в литературе условие выявляемости внутренних дефектов в виде:  $r_d/l \geq 1$ . На практике это означает, что для большинства реальных дефектов одномерные модели приводят к нереалистичным значениям  $\Delta T$ .

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

Одномерная декартова модель



Двухмерная цилиндрическая модель



Глубина дефекта  $l$

Толщина дефекта  $d$

Критическое значение  $r_d/l$

*Алюминий*

$\lambda = 210 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, a = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, L = 2 \text{ мм}, Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$

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

*Углеродистый пластик*

$\lambda = 0,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, a = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, L = 5 \text{ мм}, Q = 10^5 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 0,01 \text{ с}$

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

*Почва*

$\lambda = 1,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, a = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}, L = 20 \text{ см}, Q = 10^3 \text{ Вт/м}^2, \tau_h = 12 \text{ ч}$

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



### 4.3. ДВУХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ТК

#### 4.3.1. Однослойная пластина с дефектом типа "канал" (декартова система координат)

Рассмотрим изделие с дефектом, бесконечно вытянутым в направлении одной из декартовых координат ( $y$ ). На практике это означает, что размер дефекта  $d_y$  на данной глубине отвечает условиям перехода многомерной задачи ТК в одномерную для координаты  $y$  (табл. 4.6). Таким образом, дефект можно представить протяженным каналом (рис. 4.20, а), а соответствующая задача ТК 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. 4.20, б).

Узкие подповерхностные трещины, расположенные перпендикулярно передней поверхности, практически не обнаруживаются при равномерном нагреве, поскольку они не искажают профиль температуры на поверхности (в ряде случаев поверхностные дефекты могут быть видны вследствие чисто радиационного феномена, поскольку они выступают как "черные тела", существенно повышая уровень теплового сигнала). Выявление таких дефектов благодаря механизму чистой теплопроводности возможно, если в изделии создан тепловой поток, распространяю-

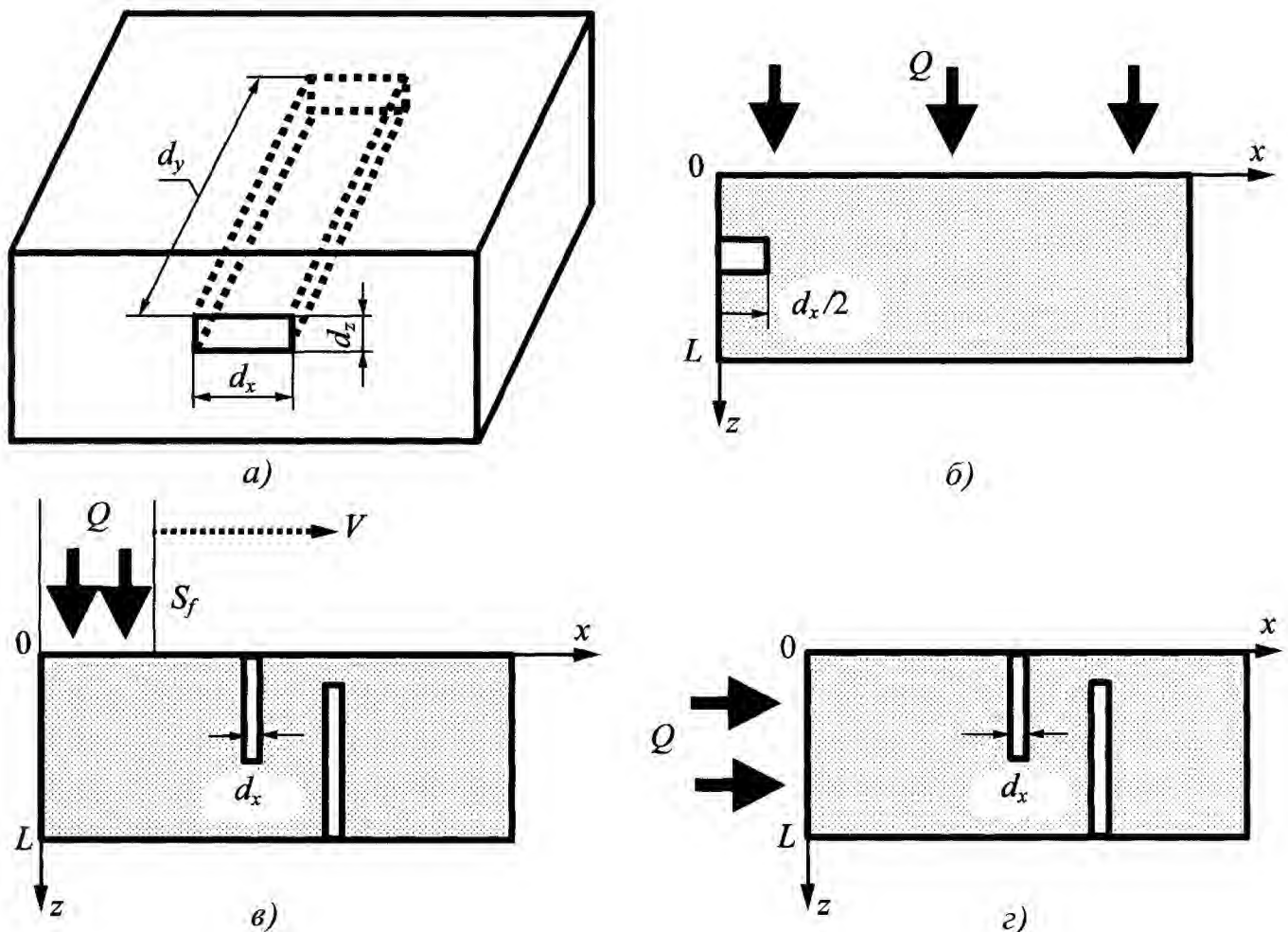


Рис. 4.20. Двухмерная декартова модель ТК:

а – изделие с дефектом типа "канал"; б – модель с равномерным поверхностным нагревом; в – модель с локализованным поверхностным нагревом; г – модель с боковым нагревом

щийся *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. 4.20, в). В ряде случаев можно нагревать торец изделия и отслеживать динамику распространения температурной волны (рис. 4.20, з).

Все двухмерные модели рис. 4.20, б–з имеют общую математическую постановку, которую мы не приводим, поскольку в п. 4.6 будет рассмотрен более общий случай трехмерной декартовой модели.

### 4.3.2. 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 дисковидного дефекта в многослойной дисковидной пластине, которую реализуют в цилиндрической системе координат. Вследствие азимутальной симметрии, в данной модели отсутствует зависимость температуры от угла  $\varphi$ , а 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 ГУ имеют место как на передней ( $F$ ), так и на задней поверхности ( $R$ ); 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, в то время как временная функция нагрева может быть произвольной.

Математическая постановка задачи нагрева трехслойной пластины описыва-

ется следующими соотношениями (см. рис. 4.21):

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

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

$$0 \leq z \leq L; \quad \tau > 0; \quad (4.48)$$

$$T_i(r, z, \tau) = 0; \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial T_i(z = 0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_l} + \frac{\alpha^F}{\lambda_l} T_i(z = 0, \tau); \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial T_i(z = L, \tau)}{\partial z} = -\frac{\alpha^F}{\lambda_3} T_i(z = L, \tau); \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial T_i(z = R, \tau)}{\partial z} = 0; \quad (4.52)$$

на границах между слоями и слоями и дефектами

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(z, \tau)}{\partial \bar{v}} = \lambda_j \frac{\partial T_j(z, \tau)}{\partial \bar{v}};$$

$$T_i(z, \tau) = T_j(z, \tau). \quad (4.53)$$

Уравнение (4.48) есть двухмерное уравнение теплопроводности параболического типа, записанное в цилиндрических координатах; уравнение (4.49) обозначает НУ; уравнение (4.50) описывает ГУ на передней поверхности (нагрев и охлаждение по закону Ньютона); уравнение (4.51) описывает ГУ на задней поверхности (охлаждение); уравнение (4.52) соответствует теплоизоляции боковой поверхности изделия; уравнения (4.53) суть условия неразрывности тепловых потоков и температур на границах внутренних областей (слоев и дефектов); все обозначения соответствуют принятым ранее.

При моделировании анизотропных материалов считают, что только коэффициент теплопроводности  $\lambda$  зависит от координат, а теплоемкость и плотность являются постоянными. Следовательно, анизотропная температуропроводность выражается формулой:  $a_i = \lambda_i / (C\rho)$ .

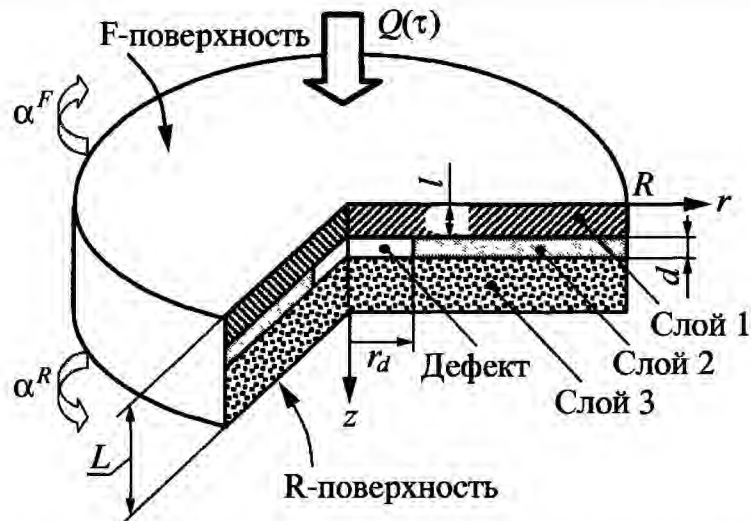


Рис. 4.21. Двухмерная цилиндрическая модель ТК

Двухмерная цилиндрическая модель рис. 4.21 реализована в программе ThermoCalc-2D, предназначенной для анализа и оптимизации задач ТК ("Иновация"). Зависимость  $Q(\tau)$  от времени описывает четыре типа нагрева:

- 1) прямоугольным импульсом;
- 2) синусоидальным импульсом (моделирует солнечный нагрев);
- 3) гармонический нагрев (тепловые волны);
- 4) произвольный нагрев, задаваемый ступенчатой функцией.

#### 4.4. ПРОСТАЯ ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ НАГРЕВЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВА ДВИЖУЩИМСЯ ТЕПЛОВЫМ ИСТОЧНИКОМ

Данная модель возникает в случае обнаружения тонких трещин, расположенных перпендикулярно передней поверхности. Геометрия задачи соответствует изображенной на рис. 4.20, б при условии, что выбран не двухмерный (в виде полосы), а трехмерный (локализованный) движущийся источник нагрева (рис. 4.22).

В бездефектной области задача имеет аналитическое решение, приведенное в табл. 2.7 и 2.8 для точечного и гауссов-

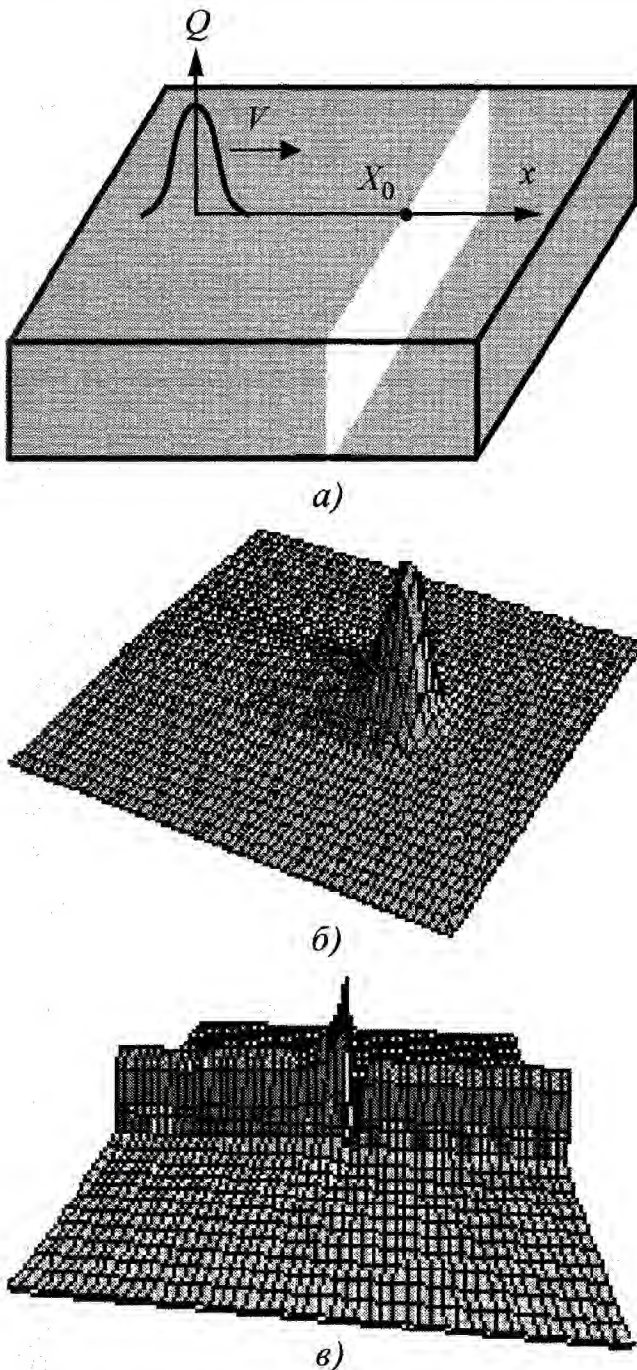
ского источника. В первом приближении поверхностную трещину моделируют плоскостью, расположенной в точке  $x = x_0$  перпендикулярно передней поверхности. Будем считать, что дефект имеет нулевую толщину и нулевую теплопроводность (рис. 4.22). При этом возмущающее действие дефекта сказывается, прежде всего, вдоль координаты  $x$ , а трехмерность модели обусловлена трехмерностью источника нагрева.

Сигнал от дефекта рассчитывают в системе координат, связанной либо с неподвижным изделием, либо с движущимся источником нагрева. Для дефекта в виде абсолютно теплоизолированной плоскости можно получить аналитическое решение, применяя *метод 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 как [39]:

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

$$x \leq x_0; Fo \leq ax_0 / VR^2, \quad (4.54)$$

где  $T_b, T_a$  – температуры, создаваемые основным (индекс "b") и мнимым (индекс "a") источником согласно формуле, приведенной в табл. 2.9; время  $Fo = ax_0 / VR^2$  соответствует моменту прихода основного источника в точку  $x = x_0$ .



**Рис. 4.22. Обнаружение вертикальных трещин с помощью движущегося теплового пучка:**  
 а – схема контроля; б – температурное распределение при отсутствии дефектов (в координатах изделия); в – распределение температуры в зоне вертикальной трещины (в координатах источника)

Из приведенных рассуждений следует, что температура в зоне дефекта в момент прихода туда основного пучка удваивается по сравнению с той температурой, которая имела бы место в отсутствие дефекта. Но поскольку 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.

#### 4.5. ТРЕХМЕРНАЯ АДИАБАТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТК

Ж. Батсаль и др. получили решение задачи ТК трехмерной адиабатической анизотропной пластины с прямоугольным резистивным дефектом размером  $b \times c$  (рис. 4.23) [51]. 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. Приведем ее сразу для пространства Лапласа ( $p$  есть переменная Лапласа – аналог времени  $\tau$ ):

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

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

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

$$z = 0 : -\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} = Q;$$

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

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

$$z = L_z : \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0, \quad (4.55)$$

где  $\Theta$  – образ температуры  $T$  в пространстве Лапласа;  $L_x, L_y, L_z$  – размеры пластины;  $l$  – глубина залегания дефекта;  $f(x, y) = 1$  при  $\{x, y\} \in [x_1, y_1] \times [x_2, y_2]$ , иначе  $f(x, y) = 0$ ;  $b = x_2 - x_1$ ;  $c = y_2 - y_1$  – размеры дефекта по координатам  $x$  и  $y$ ;

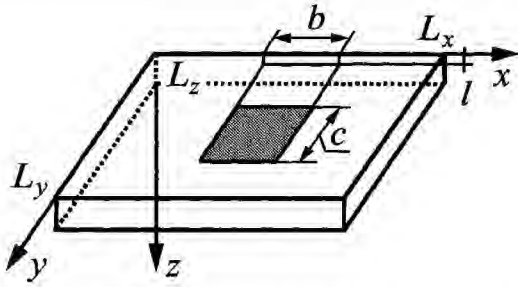


Рис. 4.23. К решению трехмерной адиабатической задачи ТК

$R_d$  – термическое сопротивление дефекта бесконечно малой толщины; индексы "d.f" и "d.r" относятся к передней и задней поверхностям дефекта.

С использованием безразмерных параметров постановка задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} \Theta^* &= \Theta / (QL_z / \lambda_z); \quad b^* = \frac{b}{L_z} (\lambda_z / \lambda_x)^{1/2}; \\ c^* &= \frac{c}{L_z} (\lambda_z / \lambda_y)^{1/2}; \quad \Psi^* = \Psi / Q; \\ x^* &= \frac{x}{L_z} (\lambda_z / \lambda_x)^{1/2}; \quad y^* = \frac{y}{L_z} (\lambda_z / \lambda_y)^{1/2}; \\ p^* &= L_z^2 p / a_z; \quad R_d^* = R_d / (L_z / \lambda_z); \\ z^* &= z / L_z; \quad l^* = l / L_z, \end{aligned} \quad (4.56)$$

где  $\Psi$  – Лаплас-образ z-компоненты плотности теплового потока  $q_z = -\lambda_z (\partial T / \partial z)$ ; ниже индекс "\*" опущен.

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} - p \Theta = 0. \quad (4.57)$$

К функции  $\Theta$  в уравнении (4.54) применяют двойное косинус-преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} T(\alpha, \beta, z, p) &= \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Theta(x, y, z, p) \cos(\alpha x) \times \\ &\times \cos(\beta y) dx dy, \end{aligned} \quad (4.58)$$

где  $T$  – есть Фурье-образ  $\Theta$ , а безразмерные пространственные пульсации приобретают дискретные значения:

$$\alpha_j = j \pi / L_x; \quad \beta_k = k \pi / L_y, \quad (4.59)$$

где  $j$  и  $k$  – неотрицательные целые числа. В пространстве Фурье уравнение (4.57) преобразуется в

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - (p + \alpha^2 + \beta^2) T = 0. \quad (4.60)$$

Решение последнего уравнения имеет вид:

$$T = F \operatorname{ch}(uz) + G \operatorname{sh}(uz); \quad u = \sqrt{p + \alpha^2 + \beta^2}. \quad (4.61)$$

Решение (4.61) может быть получено в явном виде, после чего переход из пространств Фурье и Лапласа в пространство оригиналов производят последовательно в численном виде. Преимуществом данного решения является возможность его использования в тепловой дефектометрии, оставаясь в пространстве интегральных преобразований.

#### 4.6. ОБОБЩЕННАЯ ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТК (трехслойная анизотропная неадиабатическая пластина с произвольными емкостными дефектами)

Дефекты конечных размеров целесообразно описывать в трехмерной декартовой системе координат. На практике приемлемой является модель изделия, имеющего форму многослойного параллелепипеда, в котором имеются дефекты также в форме параллелепипеда. Для трехслойной пластины математическая постановка задачи имеет следующий вид (рис. 4.24):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} &= a_i^x \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \\ &+ a_i^y \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + a_i^z \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2}; \end{aligned} \quad (4.62)$$

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

$$T_i(\tau = 0) = T_{in}; \quad (4.63)$$

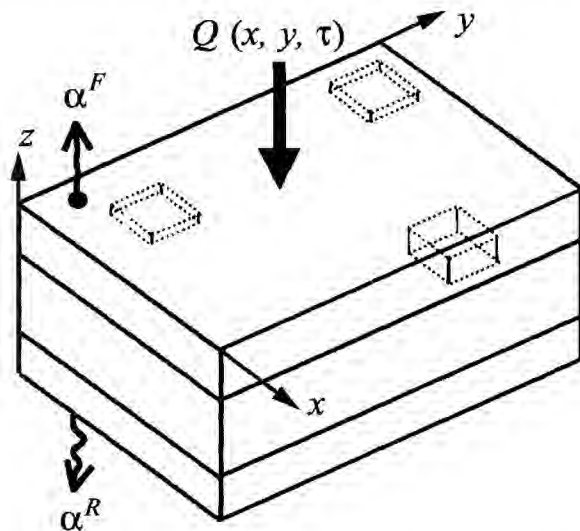


Рис. 4.24. Трехмерная декартова модель ТК

$$-\lambda_1^z \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = Q(x, y, \tau) - \alpha^F [T_1(x, y, z, \tau) - T_a]; \quad (4.64)$$

$$\lambda_3^z \frac{\partial T_3(x, y, z=L_z, \tau)}{\partial z} = -\alpha^R [T_3(x, y, z, \tau) - T_a]; \quad (4.65)$$

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

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

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

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

$$(4.66)$$

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

$$\lambda_i^{q_j} \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} = \lambda_{i\pm 1}^{q_j} \frac{\partial T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} \quad (4.67)$$

на границах между слоями и 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);  $T_{in}$  – начальная темпера-

тура объекта;  $a_i^{q_j}, \lambda_i^{q_j}$  – коэффициенты температуро- 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  $z$  ( $j = 1 \dots 3$ );  $\tau$  – время;  $Q(x, y, \tau)$  – плотность теплового потока, в общем случае зависящая от времени и пространственных координат;  $\alpha^F, \alpha^R$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно на передней и задней поверхностях;  $T_a$  – температура окружающей среды;  $L_x, L_y, L_z$  – размеры изделия по трем декартовым координатам.

Аналогично набору уравнений (4.48 – 4.53) уравнение (4.62) есть трехмерное дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа; уравнение (4.63) есть НУ; уравнение (4.64) описывает ГУ на передней поверхности, включая нагрев и охлаждение; уравнение (4.65) описывает ГУ на задней поверхности (только охлаждение); уравнения (4.66) соответствуют адиабатическим ГУ на боковых поверхностях объекта (вдоль координат  $x$  и  $y$ ); уравнения (4.67) описывают условия неразрывности температуры и тепловых потоков на границах слоев, а также слоев и дефектов.

В зависимости от задания функции нагрева  $Q(x, y, \tau)$  данная модель ТК может включать различные виды нагрева и охлаждения объекта контроля и соответственно реализовывать различные способы ТК. Трехмерная декартова модель рис. 4.24 использована в программе ThermoCalc-6L ("Инновация"). В одной из версий этой программы реализован произвольный вид нагрева, задаваемый табличной функцией времени (в программе также возможно задавать изменения всех других параметров модели в виде произвольных функций времени).

#### 4.7. УСЛОВИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ОТ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

Как отмечалось выше, общим критерием сравнения различных процедур ТК является отношение сигнал/шум, которое определяют как

$$s = \frac{\Delta T(\tau)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2}}, \quad (4.68)$$

где  $\Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2$  – дисперсия шумовых сигналов от  $N$  некоррелированных источников, выраженная в терминах температуры. Более подробно статистические процедуры обнаружения сигналов от дефектов на фоне помех будут описаны в Главе 10. Для понимания особенностей оптимизации процедур ТК рассмотрим ряд простых условий, которым должны удовлетворять информативные параметры ТК.

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

$$s > 1, \text{ или } \Delta T > \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2}. \quad (4.69)$$

Дисперсия шума изменяется во времени, поэтому максимальное значение  $s$  наступает в определенный момент времени, в общем случае не совпадающий с максимумом  $\Delta T(\tau)$  или  $C = \Delta T(\tau)/T(\tau)$ .

В данной главе мы ограничимся рассмотрением двух крайних случаев:

1) шумы ТК являются только *аддитивными* и полностью определяются шумами детектора  $\Delta T_{res}$ , т.е.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2} = \Delta T_{res};$$

2) шумы ТК являются только *мультипликативными* и определяются излучательными-поглощательными свойствами изделия;

их можно характеризовать контрастом помехи  $C_{noise} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta \bar{T}_{i \text{ noise}}^2} / T_{nd}(\tau) = \Delta T_{res}(\tau) / T_{nd}(\tau)$ , который не зависит от времени в силу линейности задач ТК.

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

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{res}. \quad (4.70)$$

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

$$C(\tau_m) > C_{noise}. \quad (4.71)$$

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

Принципиальное различие двух последних выражений состоит в том, что условию (4.70) можно удовлетворить путем увеличения поглощенной энергии  $W$  (мощности нагрева  $Q$ ). Условие (4.71) не зависит от  $W(Q)$  и определяется исключительно поверхностными свойствами изделия.

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

$$T_{abs}(\tau = \tau_h) < T_{destr}. \quad (4.72)$$

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

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

$$\begin{aligned} \Delta T(\tau_m) &> \Delta T_{res}; \\ C(\tau_m) &> C_{noise}; \\ T_{abs}(\tau = \tau_h) &< T_{destr}. \end{aligned} \quad (4.73)$$

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

$$f \geq (5 \dots 10) / \tau_m. \quad (4.74)$$

В условиях (4.73–4.74) участвуют параметры:

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

#### 4.8. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЯ И ДЕФЕКТА

В классических моделях ТК, описанных выше, температурные сигналы над скрытыми дефектами  $\Delta T$  и их производные, например, текущий температурный контраст  $C^{run} = \Delta T / T_{nd}$ , зависят от:

- времени  $\{\tau, \tau_h\}$ ;
- параметров нагрева  $\{Q, \tau_h\}$ ;
- интенсивности теплообмена объекта контроля с окружающей средой  $\{\alpha^F, \alpha^R\}$ ;
- толщины объекта контроля  $\{L\}$ ;
- ТФХ объекта контроля  $\{\lambda, a\}$ ;
- геометрических размеров дефектов  $\{h_x, h_y, h_z = d\}$  и глубин их залегания  $\{l\}$ ;
- ТФХ дефектов  $\{\lambda_d, a_d\}$ .

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

##### 4.8.1. Изменение температурных сигналов во времени

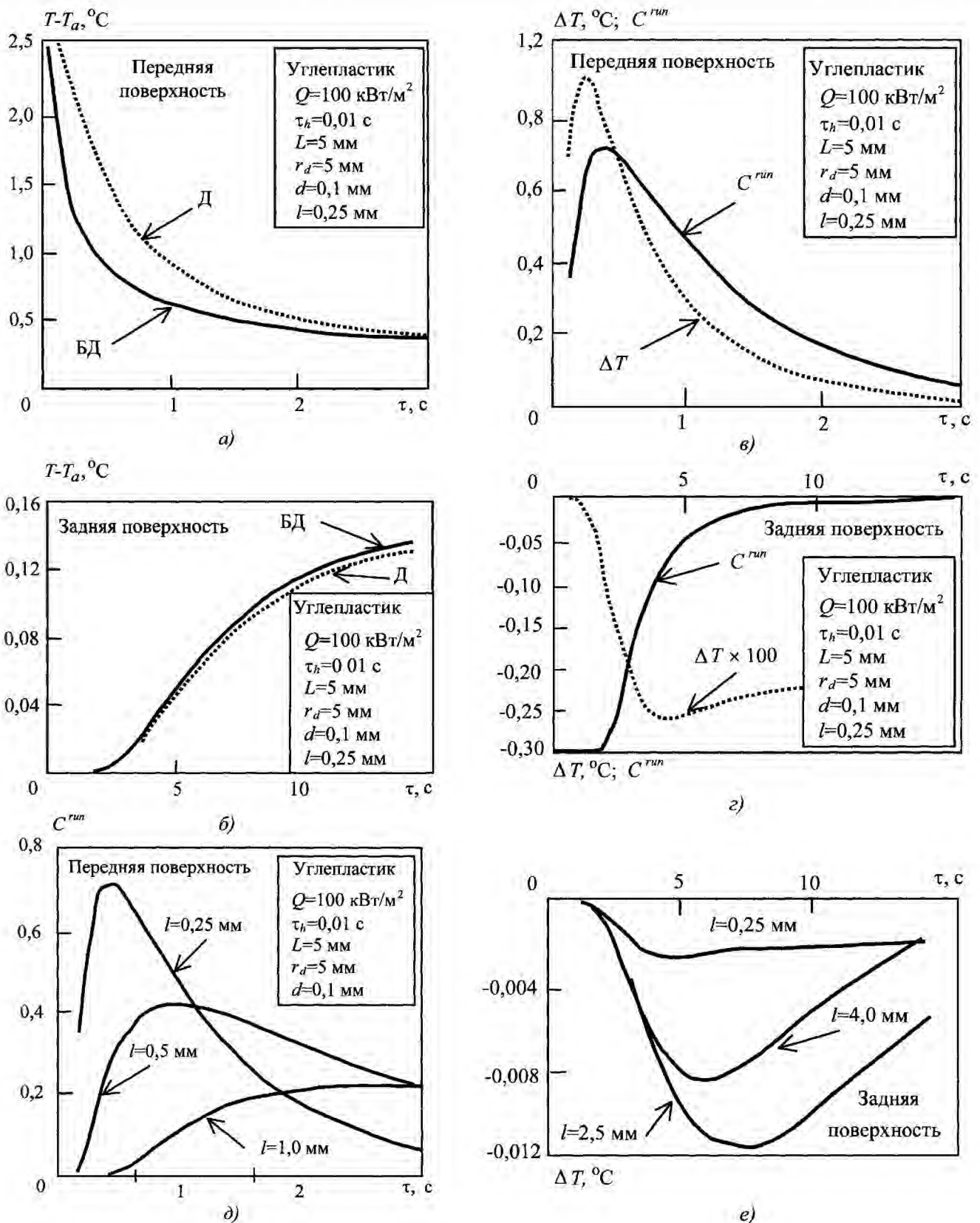
Тепловой НК называют активным, или *динамическим* (transient, dynamic), поскольку выявляемость внутренних дефектов существенно зависит от времени контроля, или *времени наблюдения* (observation time). Анализ изменений  $\Delta T$  и  $C^{run}$  во времени представляет также интерес для разработки алгоритмов повышения отношения *сигнал/шум*, которые широко распространены в современном ТК.

Ряд особенностей изменения температуры нагреваемых тел во времени был рассмотрен 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 мы рассмотрим результаты анализа многомерных моделей, описанных в пп. 4.3, 4.4.

Большая часть примеров будет относиться к выявлению дефектов в композиционных материалах, в частности, углепластике, которые широко используются в авиакосмической технике и представляют обширное поле для применения ТК. Тем не менее, приведенные результаты качественно объясняют особенности ТК и многих других материалов.

На рис. 4.25, *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  $\Delta T$  оказывает компонент тензора теплопроводности  $\lambda_z$ ,





**Рис. 4.25. 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):**

- а – температура на передней поверхности; б – температура на задней поверхности;
- в – температурный сигнал и контраст на передней поверхности;
- г – температурный сигнал и контраст на задней поверхности;
- д – зависимость температурного сигнала на передней поверхности от глубины дефекта;
- е – зависимость температурного сигнала на задней поверхности от глубины дефекта

направленный в глубь изделия). При кратковременной тепловой стимуляции, т.е. когда длительность нагрева существенно меньше характерных времен теплопередачи в конкретном изделии ( $Fo_h = \alpha\tau_h / L^2 \ll 0,1$ ), заметная разница между дефектной  $T_d$  и бездефектной  $T_{nd}$  температурой начинает сказываться на стадии охлаждения ( $\tau > \tau_h$ ).

На рис. 4.25, в, з дифференциальные температурные сигналы  $\Delta T = T_d - T_{nd}$  сравнены с текущим температурным контрастом  $C^{run} = \Delta T / T_{nd}$  (в дальнейшем индекс "run" будет опущен). На обеих поверхностях изделия поведение информативных параметров  $\Delta T$  и  $C$  обнаруживает специфические максимумы, которые наступают при различных оптимальных временах наблюдения  $\tau_m$ .

На передней поверхности (рис. 4.25, в), на стадии охлаждения, максимальное значение  $\Delta T_m$  наступает раньше, чем максимальное значение контраста  $C_m$ . Напротив, если оба максимума имеют место внутри импульса нагрева, то  $C_m$  опережает  $\Delta T_m$ . 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  $\Delta T$  малы. Поэтому в двухсторонних процедурах ТК (рис. 4.25, з), оптимальным временем контроля является такое, при котором сигнал  $\Delta T$  начинает превышать уровень шумов.

Отметим еще раз, что, с учетом используемого определения дифференциального температурного сигнала,  $\Delta T > 0$  на нагреваемой поверхности и  $\Delta T < 0$  на задней поверхности для дефектов, чья теплопроводность ниже, чем теплопро-

водность основного материала. Для более теплопроводных включений знак дифференциального температурного сигнала изменяется на обратный.

Из последнего правила есть исключения, например, обусловленные так называемой *инверсией*  $\Delta T$ . Инверсия возникает на передней поверхности при больших временах наблюдения, когда слой перегретого над дефектом основного материала начинает охлаждаться быстрее, чем бездефектные слои. Инверсию температурного сигнала отмечали над фторопластовыми вставками в углепластиковых стандартных образцах, которые часто используют в качестве имитаторов трещин и расслоений. В этом случае причиной инверсии может быть также наличие воздушных зазоров вокруг вставок и модификация структуры композита при внесении дефектов.

Амплитуда инверсионных сигналов обычно мала, и это явление редко наблюдают экспериментально. Возможности, которые гипотетически представляет инверсия для выделения сигналов от дефектов на фоне помех, до сих пор не реализованы. Другое исключение может иметь место в процедуре двухстороннего ТК тонких воздушных расслоений в слаботеплопроводных материалах; при этом знак расчетных сигналов  $\Delta T^R$  на обратной поверхности изделия зависит от выбранной модели ТК. Если присутствие дефекта не изменяет общей толщины изделия, т.е. дефект замещает часть основного материала, температура под воздушным дефектом может превышать бездефектную: ( $\Delta T^R > 0$ ). Если же имеет место реальное расслоение, приводящее к появлению в дефектной зоне дополнительного теплового сопротивления, то температурный сигнал становится отрицательным ( $\Delta T^R < 0$ ).

Из-за диффузионного характера теплопередачи в твердом теле температурные сигналы на передней поверхности весьма чувствительны к глубине залегания дефектов  $l$ . С ростом  $l$  не только уменьшается амплитуда  $\Delta T$ , но и моменты опти-

мального ТК наступают при более поздних временах (рис. 4.25, *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. Напротив, важной характеристикой двухсторонних процедур ТК является то, что характеристики температурных сигналов на задней поверхности, в основном, определяются толщиной изделия  $L$  и относительно слабо зависят от  $l$ . Интересно отметить, что максимальные значения  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  имеют место для дефектов, расположенных в середине изделия (рис. 4.25, *е*).

Тепловое нагружение в методе тепловых волн часто описывают функцией

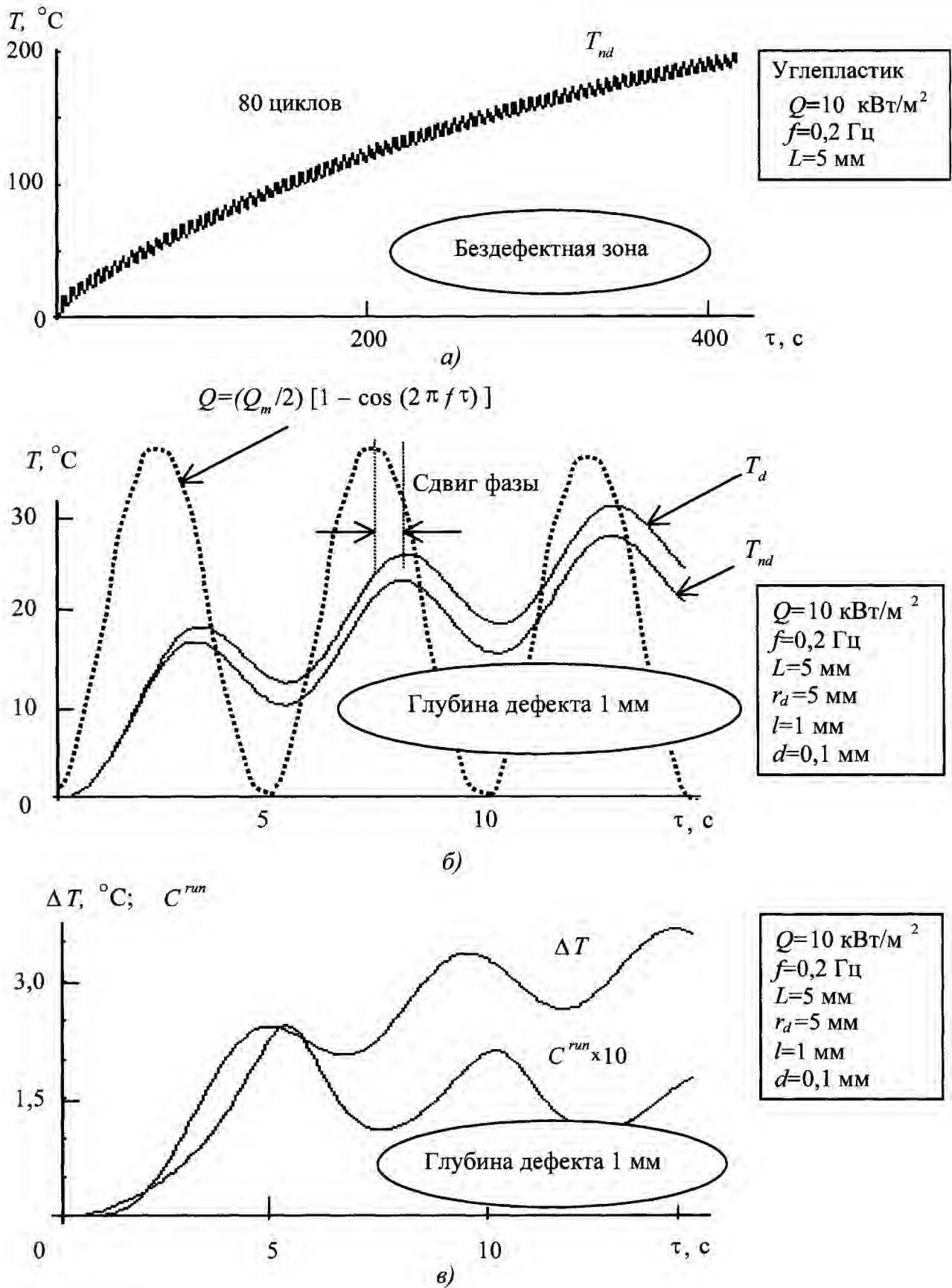
$$Q = \frac{Q_m}{2} [1 - \cos(2\pi ft)], \quad (4.75)$$

которая обеспечивает неотрицательные значения плотности теплового потока в течение нагрева. В этом случае поверхностная температура, как в бездефектной, так и в дефектной, зоне имеет постоянную и гармоническую компоненты (см. пример на рис. 4.26, *а*). Квазистационарный режим достигается через определенное число волновых периодов, которое зависит от типа материала и толщины изделия. Классический *фототермический* (photothermal) метод, обычно применяемый при испытаниях тонких 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 *синхронной термографии* (lock-in thermography). 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

изделий относительно большой толщины, например, углепластика толщиной 5 мм, может понадобиться до 80 циклов для того, чтобы установился квазистационарный режим (рис. 4.26, *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. 4.26, *б*). На поверхности полубесконечного тела сдвиг фазы бездефектной поверхностной волны относительно функции нагрева равен  $-45^\circ$ . Фазовые сдвиги рассматривают в качестве информативного критерия дефектности тела, который часто обеспечивает лучшее значение отношения сигнал/шум по сравнению с температурой. Поскольку фаза может быть выражена в терминах времени, анализ сигналов в фазовом пространстве в определенной степени идентичен анализу во временной области. Известно, что, по сравнению с измерением амплитуд, измерения фазы (времени) являются 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 изменения  $\Delta T$  и  $C$  во времени показаны на рис. 4.26, *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 (4.70). 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).



**Рис. 4.26.** 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 в бездефектной и дефектной областях (3 цикла нагрева);  
 в – температурный сигнал и контраст на передней поверхности (3 цикла нагрева)

## 4.8.2. Глубина залегания дефекта

Влияние глубины залегания дефекта  $l$  на оптимальные параметры ТК проил-

люстрировано на примере ТК углепластика толщиной 5 мм (рис. 4.27).

На передней поверхности температурный сигнал резко спадает с ростом  $l$

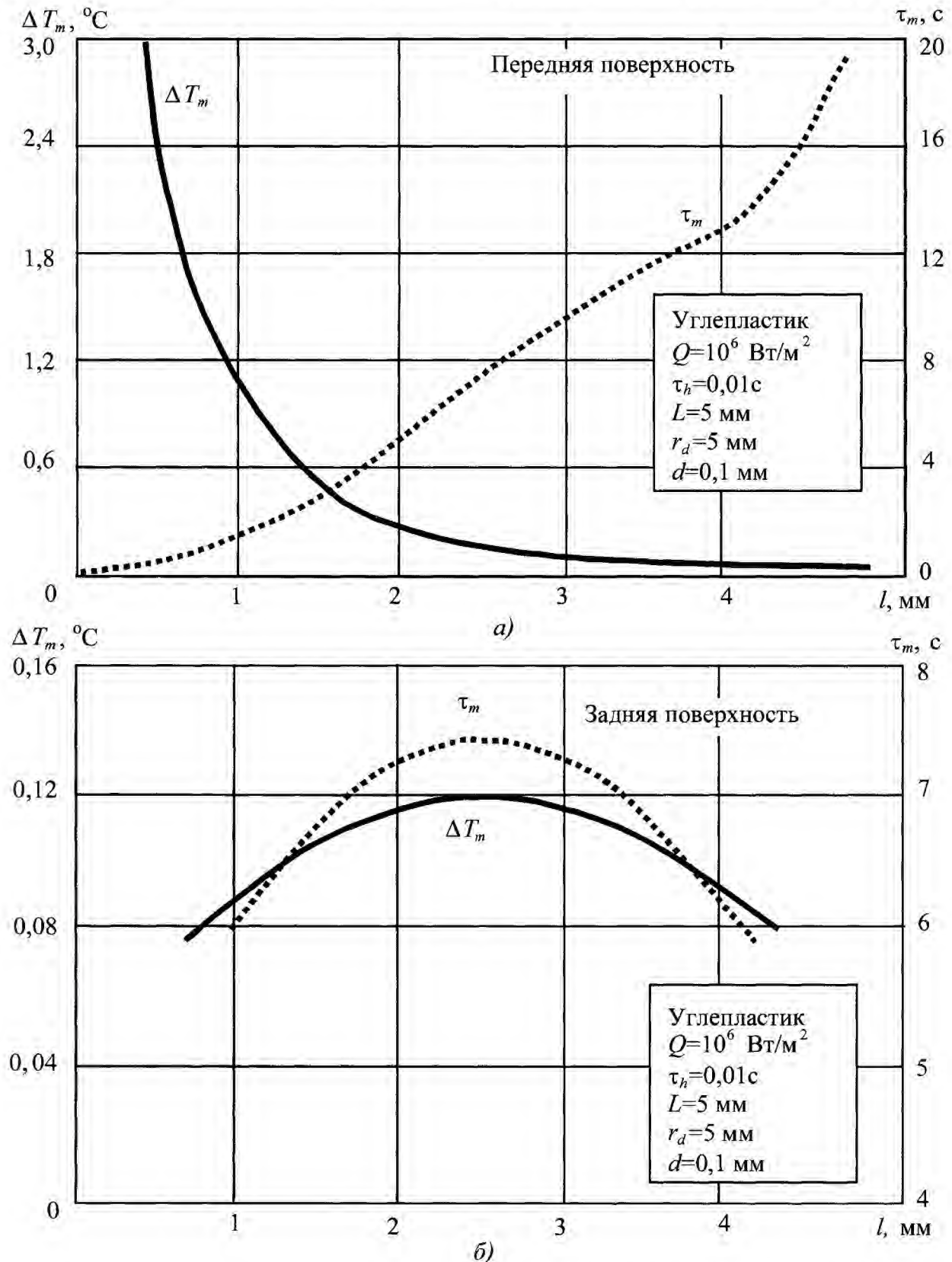


Рис. 4.27. Оптимальные параметры обнаружения дефектов в углепластике толщиной 5 мм в зависимости от глубины их залегания:

$a$  – передняя поверхность;  $b$  – задняя поверхность

(рис. 4.27, 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  $Q = 10^6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , что соответствует избыточной температуре поверхности в конце нагрева  $\sim 110^\circ\text{C}$ . Дальнейшее увеличение мощности нагрева повысит  $\Delta T$  и соответственно увеличит предельное значение  $l$ , однако при этом изделие может разрушиться вследствие перегрева. Таким образом, предельно допустимая температура материала ограничивает повышение мощности нагрева для обнаружения более глубоких дефектов. Более того, в случае чисто мультипликативной поверхностной помехи, рост температуры нагрева не приведет к улучшению отношения сигнал/шум вследствие пропорционального возрастания амплитуды шума. Что касается оптимального времени наблюдения  $\tau_m$ , то оно возрастает с увеличением глубины залегания  $l$ , достигая  $\tau_m \sim 10 \text{ с}$  при  $l \sim 3 \text{ мм}$ . Отметим, что с учетом данных рис. 4.27, а, часто рекомендуемое соотношение  $\tau_m = l^2 / a$ , которое не принимает во внимание конечные размеры дефектов, можно использовать только в качестве грубого приближения.

На задней поверхности графики обеих функций  $\Delta T(l)$  и  $\tau_m(l)$  являются симметричными относительно середины изделия  $l = 2,5 \text{ мм}$  (рис. 4.27, б), что также следует из аналитического решения в области Лапласа (п. 4.1.2). Таким образом, в двухсторонней процедуре ТК дефекты, находящиеся в середине изделия, создают максимальные значения  $\Delta T$  при максимальном времени наблюдения  $\tau_m$ .

#### 4.8.3. Толщина дефекта

В принципе толщина дефекта  $d$  в направлении распространения основного теплового потока является всего лишь одним из размеров дефекта, которые существенно

влияют на  $\Delta T$  и  $\tau_m$ . Отдельное рассмотрение параметра  $d$  целесообразно при сравнении многомерных и одномерных задач ТК, поскольку размеры дефектов в поперечном направлении проецируются на поверхность контроля в явном виде, а величина  $d$  подлежит идентификации.

Как следует из рис. 4.28, с ростом  $d$  увеличивается амплитуда сигнала  $\Delta T$  и возрастает время  $\tau_m$ . Для случая расположения дефекта в середине изделия, т.е. на глубине  $l = 2,5 \text{ мм}$ , соответствующие зависимости подобны и для передней, и для задней поверхностей (рис. 4.28). Наиболее сильно параметры  $\Delta T$  и  $\tau_m$  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.

Следует отметить, что при разработке алгоритмов тепловой дефектометрии решающим параметром является тепловое сопротивление дефекта  $R_d = d / \lambda_d$ , поскольку толщина дефекта  $d$  и его теплопроводность  $\lambda_d$  совместно влияют на параметры обнаружения. Это еще одно отличие параметра  $d$  от поперечных размеров  $h_x$  и  $h_y$ .

#### 4.8.4. Поперечные размеры и конфигурация дефекта

Условно можно считать, что в нагреваемом материале существуют тепловые потоки, распространяющиеся вглубь и в поперечных направлениях. Поперечные тепловые потоки наиболее интенсивны на краях дефектов, благодаря чему снижается величина  $\Delta T$  для малых дефектов. Дефекты достаточно больших поперечных размеров характеризуются преимущественно одномерным течением тепла через дефект. Это положение проиллюстрировано на рис. 4.29 зависимостью  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  от  $r_d / l$ . Видно, что в углепластике попе-

речным тепловым потоком можно пренебречь, если  $2r_d/l > 5$ . Для алюминия

это условие становится более жестким:  $2r_d/l > 10$ .

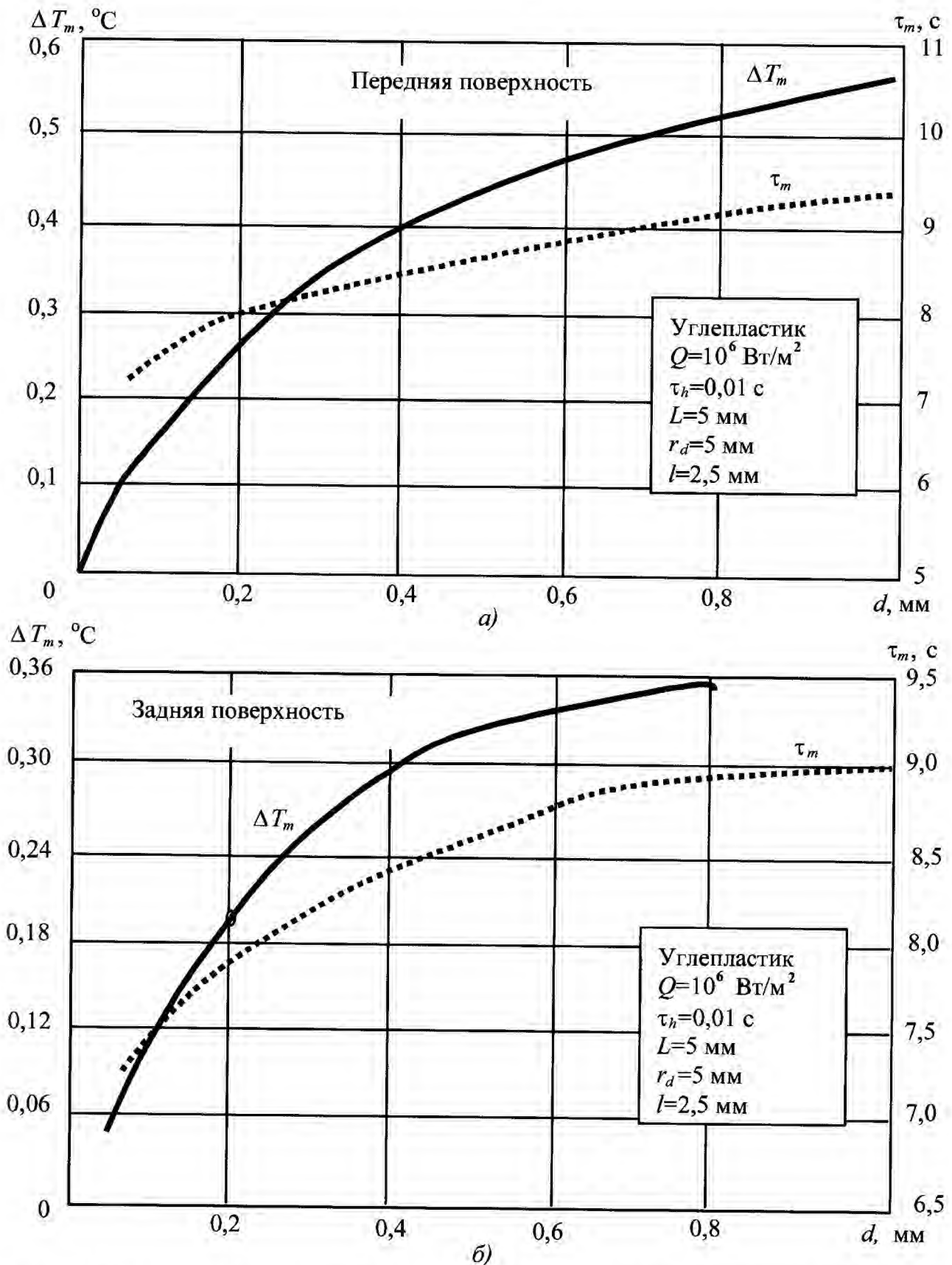
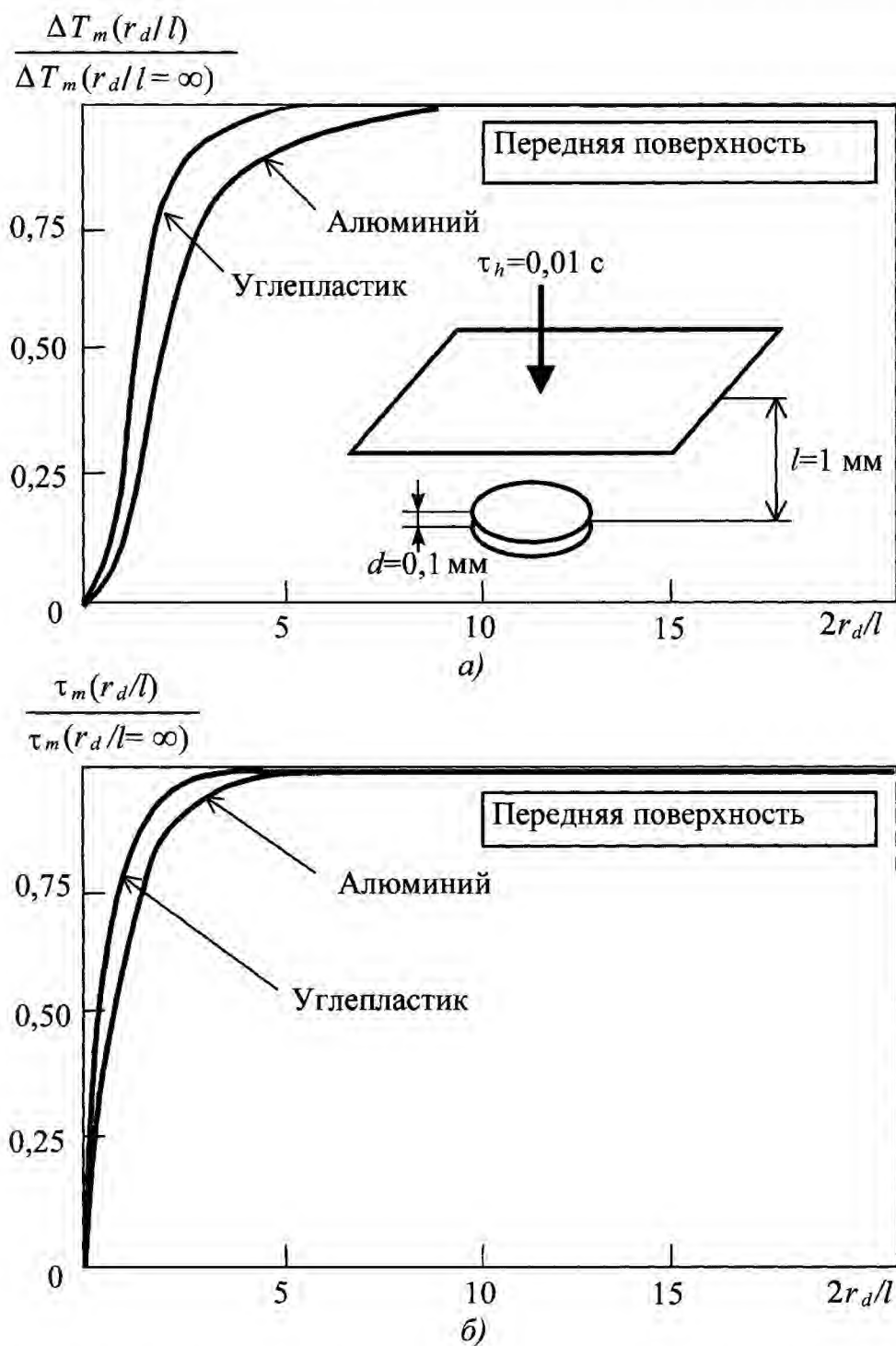


Рис. 4.28. Оптимальные параметры обнаружения дефектов в углепластике толщиной 5 мм в зависимости от толщины дефекта:

*a* – передняя поверхность; *б* – задняя поверхность



**Рис. 4.29. Зависимость оптимальных параметров обнаружения от поперечных размеров дефектов:**

*a* – зависимость максимального температурного сигнала от  $r_d/l$ ;

*б* – зависимость оптимального времени наблюдения от  $r_d/l$

В литературе по ТК сформулировано 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. 4.29, *a* подтверждают этот

вывод, поскольку именно со значений  $2r_d/l \leq 2$  начинается резкий спад  $\Delta T_m$ . Следует отметить, что временные параметры ( $\tau_m$ ) более устойчивы к вариациям поперечных размеров дефектов, поэтому именно их целесообразно использовать для оценки  $l$  и  $d$ .

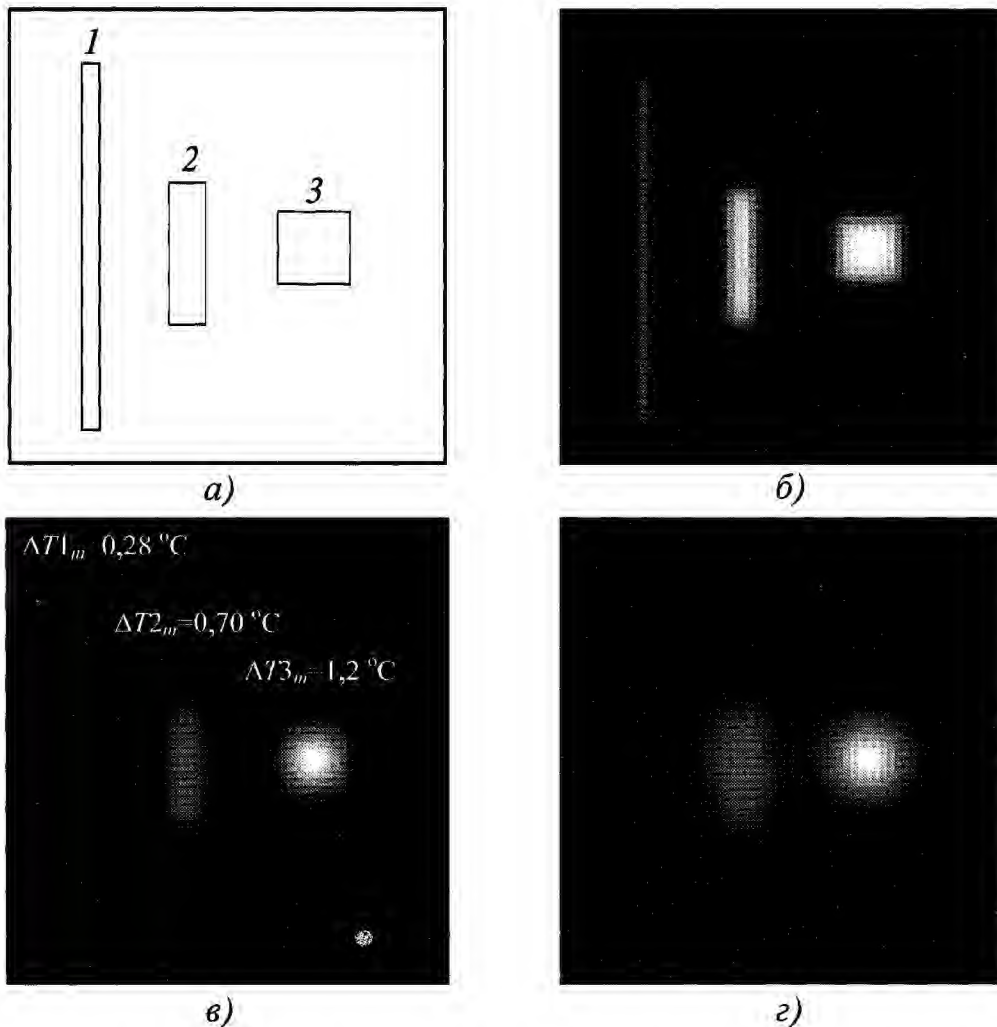


Другой аспект анализа диффузии тепла в поперечном направлении относится к влиянию на  $\Delta T$  конфигурации дефектов при их неизменной площади, а также влиянию близкорасположенных дефектов друг на друга.

На рис. 4.30 показаны термограммы 50 %-го коррозионного уноса материала в стальной пластине толщиной 2 мм, полученные при трех моментах времени. Площадь поперечного сечения всех дефектов равна  $25 \text{ мм}^2$  (рис. 4.30, а). Форма дефектов воспроизводится наилучшим образом при малых временах наблюдения (рис. 4.30, б), когда поперечный тепловой поток незначителен; при этом влияние близкорасположенных дефектов друг на друга минималь-

но. Эта особенность ТК лежит в основе метода раннего обнаружения. При оптимальном времени наблюдения (рис. 4.30, в) температурный сигнал достигает максимума  $\Delta T_m$ , однако при этом усиливается диффузия тепла в поперечных направлениях. В этот момент времени пятикратное изменение размеров дефекта вдоль одной из координат приводит приблизительно к пятикратному изменению  $\Delta T_m$ , 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



**Рис. 4.30.** Влияние конфигурации дефектов на распределение поверхностной температуры (обнаружение 50 %-го коррозионного уноса материала в стали толщиной 2 мм;

$$Q = 10^6 \text{ Вт/м}^2; \tau_h = 0,01 \text{ с):}$$

а – схема дефектов (Дефект 1 –  $1 \times 25 \text{ мм}^2$ , Дефект 2 –  $2,5 \times 10 \text{ мм}^2$ , Дефект 3 –  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ); б – распределение температуры при 0,1 с; в – 0,5 с (оптимальные условия обнаружения); г – 1 с

"отпечатки" скрытых дефектов. В анизотропных материалах форма таких отпечатков может дополнительно искажаться из-за различий в ТФХ материала по различным координатам (рис. 4.30, *з*); при этом, например, температурные сигналы над дефектами квадратной формы приобретают форму овала, оси которого связаны с анизотропной теплопроводностью материала.

#### 4.8.5. Протокол нагрева и его оптимизация

##### Гипотетическая оптимальная процедура ТК

Процесс ТК, как правило, является линейным по отношению к энергии тепловой стимуляции. Иными словами, избыточная температура поверхности  $T$  и температурный сигнал  $\Delta T$  прямо пропорциональны мощности (энергии) нагрева (охлаждения), поэтому для обеспечения максимального значения  $\Delta T$  "оптимальный" нагреватель должен иметь возможно большую мощность  $Q$ . 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  $C^{run} = \Delta T / T_{nd}$ .

Еще в 1975 г. А.Е. Карпельсон и др. показали, что максимальный контраст создается мгновенным точечным источником, перемещающимся *по объему* изделия [52]. 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. Его величину можно оценить из следующих

простых рассуждений. Пусть происходит нагрев энергией  $W$  поочередно элементарных адиабатических объемов  $\Delta V$  внутри дефекта и соответствующих равных объемов в основном материале. Среднее повышение температуры элементарных объемов равно:

$$T_{nd} = \frac{W}{(c\rho)_{nd} \Delta V}; \quad T_d = \frac{W}{(c\rho)_d \Delta V}. \quad (4.76)$$

Максимальная величина контраста  $C^{run}$  составляет

$$C_m^{run} = \frac{(c\rho)_{nd}}{(c\rho)_d} - 1. \quad (4.77)$$

Условия *максимальной локализованности* и *мгновенности действия* гипотетического оптимального источника нагрева физически определяют необходимость обеспечить максимальную адиабатичность элементарного объема, т.е. предотвратить объемную диффузию тепла.

Практическая реализация описанного способа тепловой стимуляции затруднительна. Близкими к оптимальным режимам ТК являются:

- 1) поверхностный нагрев сосредоточенным тепловым пучком, сканирующим поверхность изделия без пропусков, например, с помощью лазера;
- 2) пропускание через металлическое изделие мощного импульса электрического тока;
- 3) индукционный нагрев металлических слоев в структурах металл-неметалл;
- 4) мощный объемный СВЧ нагрев.

Выше (см. п. 4.2.2) было получено максимальное значение  $C_m^{run} = L/l - 1$  для случая поверхностного нагрева, которое формально можно сопоставить с формулой (4.77).

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

### Практическая оптимизация протокола нагрева

В принципе каждая дефектная ситуация требует организации оптимального протокола нагрева.

Ряд особенностей одностороннего ТК проиллюстрирован на рис. 4.31. 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 на фоне спада избыточной температуры. Фактически, задний фронт прямоугольного импульса действует как импульс Дирака, поэтому кратковременный рост контраста отмечается всегда после прекращения действия прямоугольного импульса. Заметим, что при длительных временах наблюдения, как температурный сигнал, так и контраст, могут стать отрицательными вследствие более быстрого охлаждения слоя материала над дефектом (рис. 4.31).

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  $\Delta T$ ;

3) импульс не должен быть слишком мощным, чтобы не разрушить изделие за счет перегрева.

Сравнение нагрева прямоугольным импульсом и гармоническими тепловыми волнами представлено в табл. 4.7 для воздушного дефекта на глубине 1 мм в образце из углепластика толщиной 5 мм (односторонняя процедура ТК). Видно, что наибольший контраст температуры над дефектом обеспечивается прямоугольным импульсом нагрева.

На практике возможны другие факторы, влияющие на выбор процедуры нагрева: технические ограничения, помехи дефектоскопу со стороны нагревателя, требования техники безопасности и т.п.

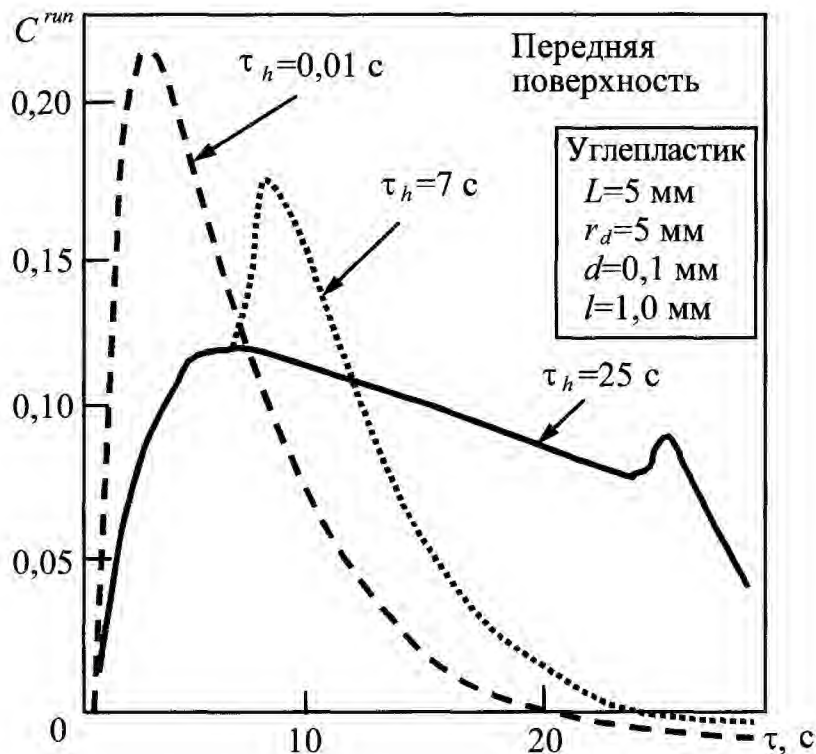


Рис. 4.31. Влияние длительности импульса нагрева на текущий температурный контраст

**4.7. Максимальные температурные контрасты и оптимальные времена наблюдения при обнаружении воздушного дефекта в углепластике**  
( $L = 5$  мм;  $l = 1$  мм;  $d = 0,1$  мм;  $r_d = 5$  мм)

Вид нагрева	Максимальный текущий температурный контраст $C_m$	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m)$ , с
<i>Импульсный нагрев</i>		
$\tau_h = 0,01$ с	0,230	2,6
$\tau_h = 7$ с	0,185	8,5
$\tau_h = 25$ с	0,127	7,0
<i>Нагрев гармоническими тепловыми волнами</i>		
$f = 0,1$ Гц	0,181	9,7
$f = 0,2$ Гц	0,208	5,3
$f = 0,5$ Гц	0,167	6,2

У. Уинфри и К. Крамер предложили обрабатывать экспериментальные данные по выявлению скрытых дефектов тепловым методом с помощью специально синтезированного теоретического фильтра, преобразующего эти данные к такому виду, который должен быть получен в результате оптимизации формы импульса нагрева [53]. С учетом ряда допущений было установлено, что максимальное отношение сигнал/шум для конкретного дефекта достигается, если форма импульса нагрева идентична временному отклику  $\Delta T$  для данного дефекта, что выражает принцип оптимальной фильтрации. Иными словами, авторы предлагают последовательно фильтровать экспериментальные данные для предполагаемых типов дефектов и возможных глубин их залегания.






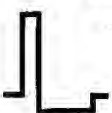
Проиллюстрируем влияние формы импульса нагрева на выявление воздушного расслоения размером  $150 \times 40 \times 1$  мм в штукатурке на глубине 3 мм (ТК настенных фресок).

В табл. 4.8 приведены расчетные оптимальные параметры обнаружения дефектов для импульсов нагрева различной формы, включая комбинацию нагрева и охлаждения, а также сглаженные импуль-

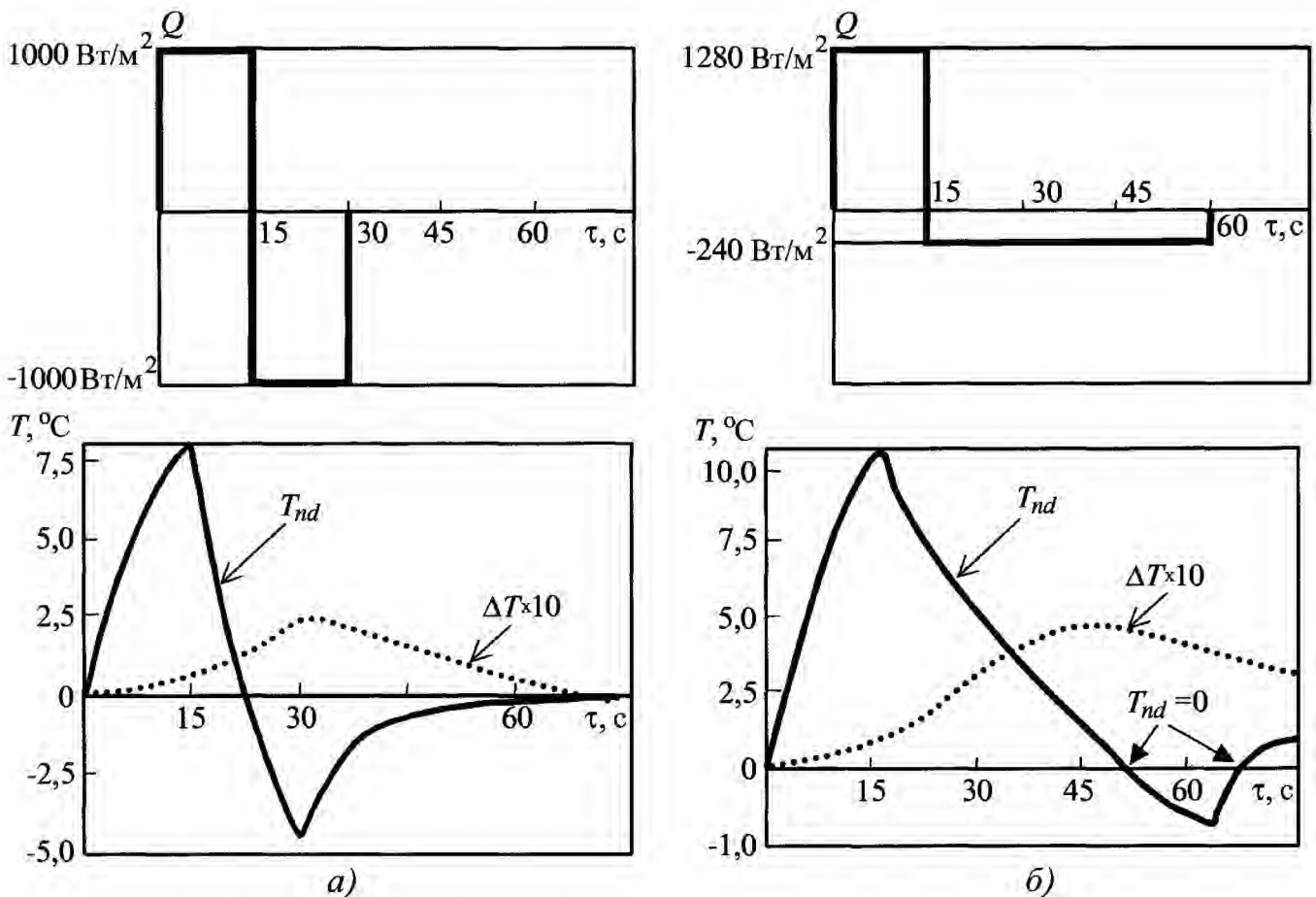
сы нагрева, форма которых соответствует температурному отклику  $\Delta T$  для двух прямоугольных импульсов. Результаты нормированы на полную поглощенную энергию  $W = 30$  кДж/м<sup>2</sup>, что, например, эквивалентно воздействию прямоугольного импульса мощностью  $Q = 1$  кВт/м<sup>2</sup> в течение 30 с.

Как и ранее, рассмотрим оптимизацию по двум критериям:  $\Delta T$  и  $C^{min}$ . Если принять температурное разрешение аппаратуры контроля равным  $\Delta T_{res} = 0,1$  °С, видно, что моделируемый дефект будет обнаружен во всех случаях, описанных в табл. 4.8. Для настенных фресок разумным пределом нагрева является превышение температуры поверхности не более, чем на 10 °С. Следовательно, случаи нагрева *Импульсами* 1, 3, 5 и 6 близки к предельным, т.е. дальнейший рост мощности нагрева недопустим, а случай нагрева *Импульсом* 2 требует снижения мощности нагрева на 60 % (заметим, что предельную температуру нагрева следует определять в зоне дефектов, где температура выше, чем в бездефектной зоне). Наоборот, при нагреве *Импульсом* 4 плотность мощности может быть увеличена почти втрое.

**4.8. Влияние формы импульса нагрева на оптимальные параметры ТК дефектов в настенных фресках**  
(воздушный дефект размером  $150 \times 40 \times 1$  мм, расположенный в штукатурке толщиной 40 мм на глубине 3 мм)

Форма импульса нагрева	Оптимальные параметры обнаружения				
	Максимальная избыточная температура над дефектом, °C	$\Delta T_m$ , °C	$\tau_m(\Delta T_m)$ , с	$C_m^{run}$ , °C	$\tau_m(C_m^{run})$ , с
<b>Импульс 1</b>  1000 Вт/м <sup>2</sup> (30 с)	11,6 при 30 с	0,934	68	0,274	98
<b>Импульс 2</b>  2000 Вт/м <sup>2</sup> (15 с)	16,3 при 15 с	0,952	58	0,275	88
<b>Импульс 3</b>  +1000 Вт/м <sup>2</sup> (15 с) -1000 Вт/м <sup>2</sup> (15 с)	8,2 при 15 с	0,256 0,132*	34 22*	$\rightarrow \infty$	22*
<b>Импульс 4</b>  Полная энергия 30 кДж/м <sup>2</sup> (отклик на Импульс 1)	3,89 при 124 с	0,526	168	0,185	242
<b>Импульс 5</b>  Полная энергия 30 кДж/м <sup>2</sup> (отклик на Импульс 3)	8,65 при 46 с	0,849	94	0,270	120
<b>Импульс 6</b>  +1280 Вт/м <sup>2</sup> (15 с) -240 Вт/м <sup>2</sup> (45 с)	10,44 при 15 с	0,500 0,490*	48 51*	$\rightarrow \infty$	51*

\* В момент  $T_{nd} = 0$ .



**Рис. 4.32. Комбинированная стимуляция объекта контроля**  
 (модель табл. 4.8):  
 а – симметричный (Импульс 3); б – асимметричный (Импульс 6)

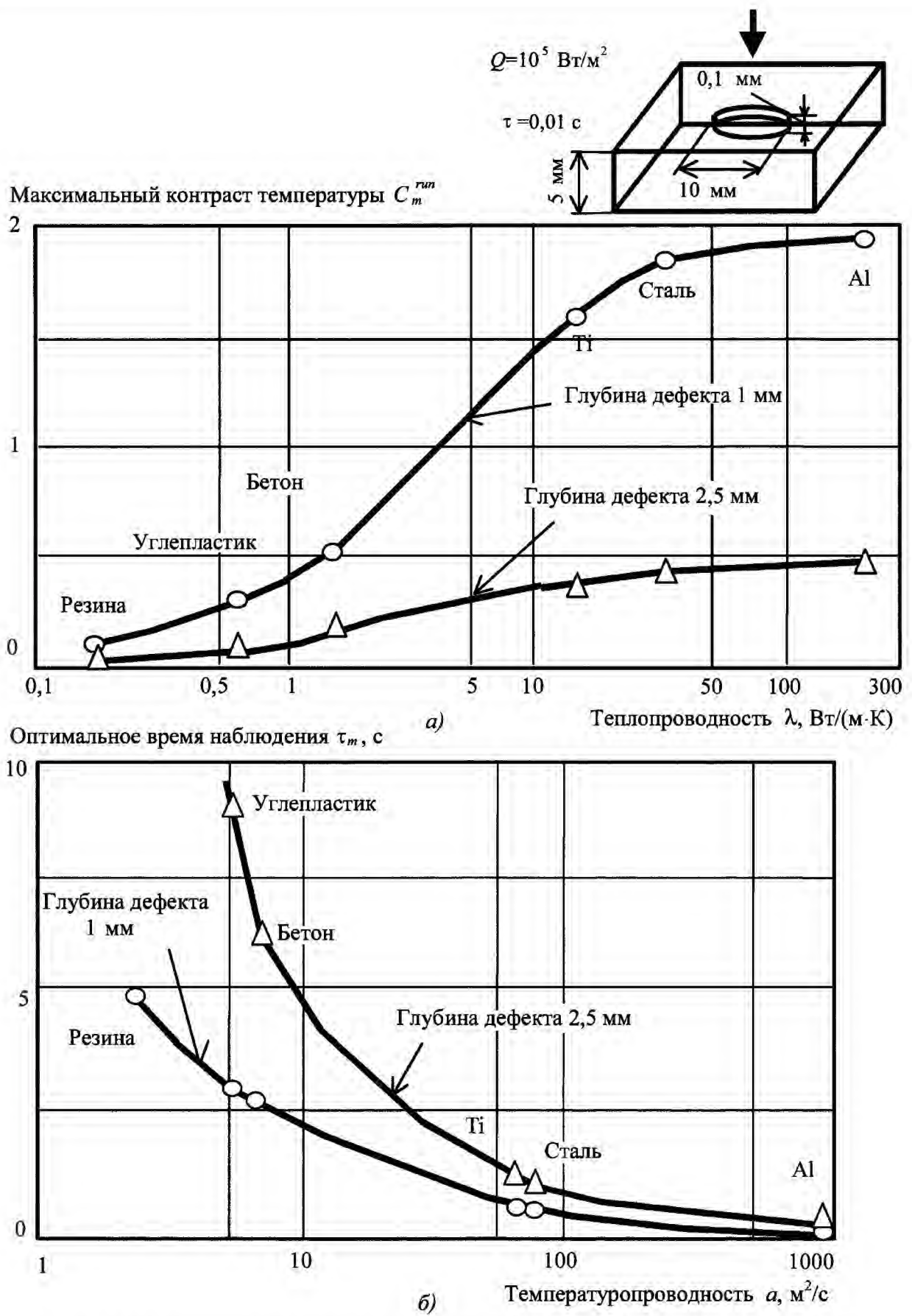
Пересчитывая данные табл. 4.6 с учетом линейности задачи нагрева ( $T \sim Q$  и  $\Delta T \sim Q$ ), рассмотренные случаи нагрева можно расположить в следующем порядке по степени снижения их "оптимальности" по критерию  $\Delta T$ : 4, 5, 1, 2, 6, 3. Этот результат физически очевиден, поскольку длинные импульсы нагрева проникают глубже в объект контроля и вызывают минимальный перегрев, поэтому их полная энергия может быть увеличена.

Как уже отмечалось выше, при "обычном" нагреве максимальный контраст обеспечивается самым коротким импульсом нагрева (Импульс 2). Гипотетически можно рассмотреть комбинированный нагрев/охлаждение (Импульсы 3, 6), в результате чего возможен переход бездефектной температуры  $T_{nd}$  через нулевое значение; при этом значение текущего контраста стремится к бесконечности

(рис. 4.32). Нагрев такого типа может быть симметричным (Импульс 3, рис. 4.32, а) и асимметричным (Импульс 6, рис. 4.32, б). Преимущество асимметричной схемы состоит в том, что, регулируя амплитуду и длительность охлаждения, можно получить точку  $T_{nd} = 0$  в момент максимального температурного сигнала  $\Delta T_m$  (рис. 4.32, б). Экспериментально подобная схема тепловой стимуляции объекта контроля не исследовалась, а предельные возможности ТК в этом случае определяются не контрастом, а отношением сигнал/шум (4.69).

#### 4.8.6. Материал изделия

Если не принимать во внимание помехи, оптимальными для ТК с поверхностным нагревом являются материалы, создающие максимальные температурные контрасты. С одной стороны, тепловая энергия не проникает глубоко в слаботеп-



**Рис. 4.33.** Зависимости оптимальных параметров обнаружения от материала:  
 а – максимальный температурный контраст в зависимости от теплопроводности;  
 б – оптимальное время обнаружения в зависимости от температуропроводности

лопроводные материалы, с другой стороны, в высокотеплопроводных материалах сильна диффузия тепла вокруг дефектов. Теоретический анализ задач ТК показывает, что температурные контрасты в металлах выше, чем в неметаллах, однако на практике металлы имеют бóльший 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 интервалов времени наблюдения (10...100 мс). При столь малых временах развития теплового процесса, применение обычных ИК камер с частотой кадров до 30 Гц и последовательным считыванием сигнала с отдельных чувствительных площадок приемника излучения приводит к искажению термограмм, поскольку температура в различных точках одного и того же изображения регистрируется в различные моменты времени. Поэтому для обнаружения коррозии в тонких высокотеплопроводных материалах рекомендуется применять ИК камеры с матричными детекторами, 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. 4.33. Видно, что бóльшие контрасты возникают в более теплопроводных материалах (рис. 4.33, а) при более коротких временах наблюдения (рис. 4.33, б). Эта тенденция сохраняется для различных глубин залегания дефектов, хотя ясно, что с ростом  $l$  эффекты

растекания тепла вокруг дефектов становятся более существенными, и для определенных дефектов возможно существование "оптимального" материала, в котором значение  $C$  максимально.

#### 4.8.7. Мощность нагрева и интенсивность поверхностного теплообмена

Как отмечалось выше, вследствие линейности задач ТК, избыточная температура нагрева 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 бóльшего отношения *сигнал/помеха*  $s = \Delta T / \Delta T_{noise}$ , где  $\Delta T_{noise}$  – эквивалентный сигнал помех различного рода, включая собственные шумы приемника излучения, которые определяют величину температурного разрешения  $\Delta T_{res}$ .

Шум  $\Delta T_{res}$  является аддитивным, в то время как поверхностные шумы объектов контроля могут в первом приближении считаться мультипликативными. Такими являются шумы, обусловленные флуктуациями коэффициента излучения  $\epsilon$ , 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. В общем случае, уровень помехи изменяется в ходе нагрева, в частности, из-за наличия отраженного излучения и ряда нелинейных эффектов.

Интенсивность поверхностного теплообмена описывается коэффициентом  $\alpha^F$  на передней и  $\alpha^R$  на задней поверхностях. Для тонких и/или высокотепло-



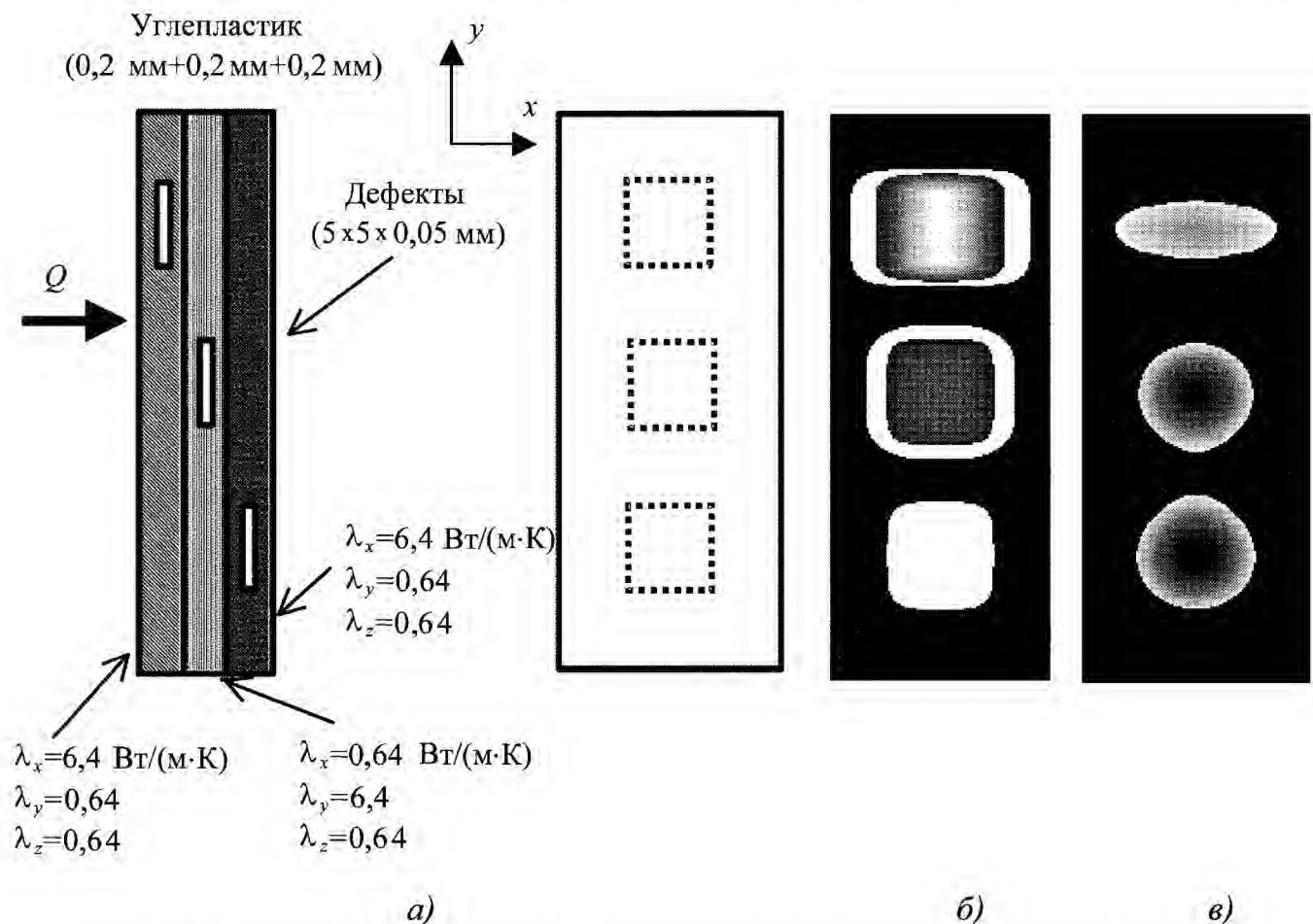
проводных материалов, удовлетворяющих условию  $Bi = \alpha L / \lambda < 0,1$ , что соответствует приблизительно адиабатическим условиям теплообмена, температурные контрасты слабо зависят от интенсивности теплоотдачи в широком диапазоне значений  $\alpha$ . При ТК толстых и/или слаботеплопроводных материалов более интенсивная теплоотдача на передней поверхности снижает температурные контрасты на этой поверхности. В двухсторонних процедурах сигналы от дефектов слабо зависят от  $\alpha$ .

#### 4.8.8. Анизотропия ТФХ

Учет анизотропии ТФХ важен, прежде всего, при ТК мононаправленных волокнистых композитов, у которых теплопроводность вдоль волокон существен-

но выше, чем поперек волокон. Если укладка отдельных слоев производится с поворотом волокон на некоторый угол, например, 45 или 90°, эффект поперечной анизотропии снижается с увеличением толщины изделия вследствие усреднения ТФХ по всем направлениям.

На рис. 4.34, *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 импульсом 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. 4.34, *б*).



**Рис. 4.34.** Влияние анизотропии ТФХ на температурное распределение в пластине из углепластика с расслоениями после импульсного нагрева (программа ThermoCalc-3D):  
*а* – схема изделия; *б* – термограмма при 0,2 с (изотермическое представление);  
*в* – термограмма при 1 с (изотермическое представление)

С увеличением времени наблюдения до 1 с дефектные зоны сглаживаются и начинают напоминать овалы, причем форма температурного отпечатка от дефекта в 1-м слое становится резко вытянутой в направлении оси  $x$  ввиду того, что теплопроводность по этой координате в 10 раз выше теплопроводности по координате  $y$  (рис. 4.34, в).

Формы температурных отпечатков для других дефектов также претерпевают искажения, которые вызваны влиянием анизотропии вышележащих слоев. Таким образом, в тонком углепластике, являющемся типичным анизотропным композиционным материалом, имеет место искажение, а в ряде случаев, даже смещение поверхностных температурных "отпечатков" относительно истинного положения скрытых дефектов.

**4.8.9. Температурное поле в зоне трещины, расположенной перпендикулярно передней поверхности**

Изделие из стали, содержащее два воздушных дефекта и изображенное на рис. 4.35, 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.). Дефекты такого рода характерны, например, для турбинных лопаток [54, 55].

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. 4.35, 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 температуры нарушается из-за того, что

трещина препятствует распространению теплового потока слева направо и в глубь изделия (рис. 4.35, в). Вместе с тем, форма и амплитуда сигнала  $\Delta T$  таковы, что простой визуальный анализ термограммы рис. 4.35 не обеспечивает надежного выявления обоих типов трещин. В работах [54, 55] было предложено подчеркивать присутствие дефектов путем *дифференцирования* строчного температурного сигнала по пространственной координате, как это показано на рис. 4.35, г – ж. Изображение на рис. 4.35, г получено путем обработки термограммы рис. 4.35, в с помощью *статистического фильтра локальной дисперсии* (statistical local variance filter). В случае рис. 4.35, г использована маска  $3 \times 3$  согласно формуле:

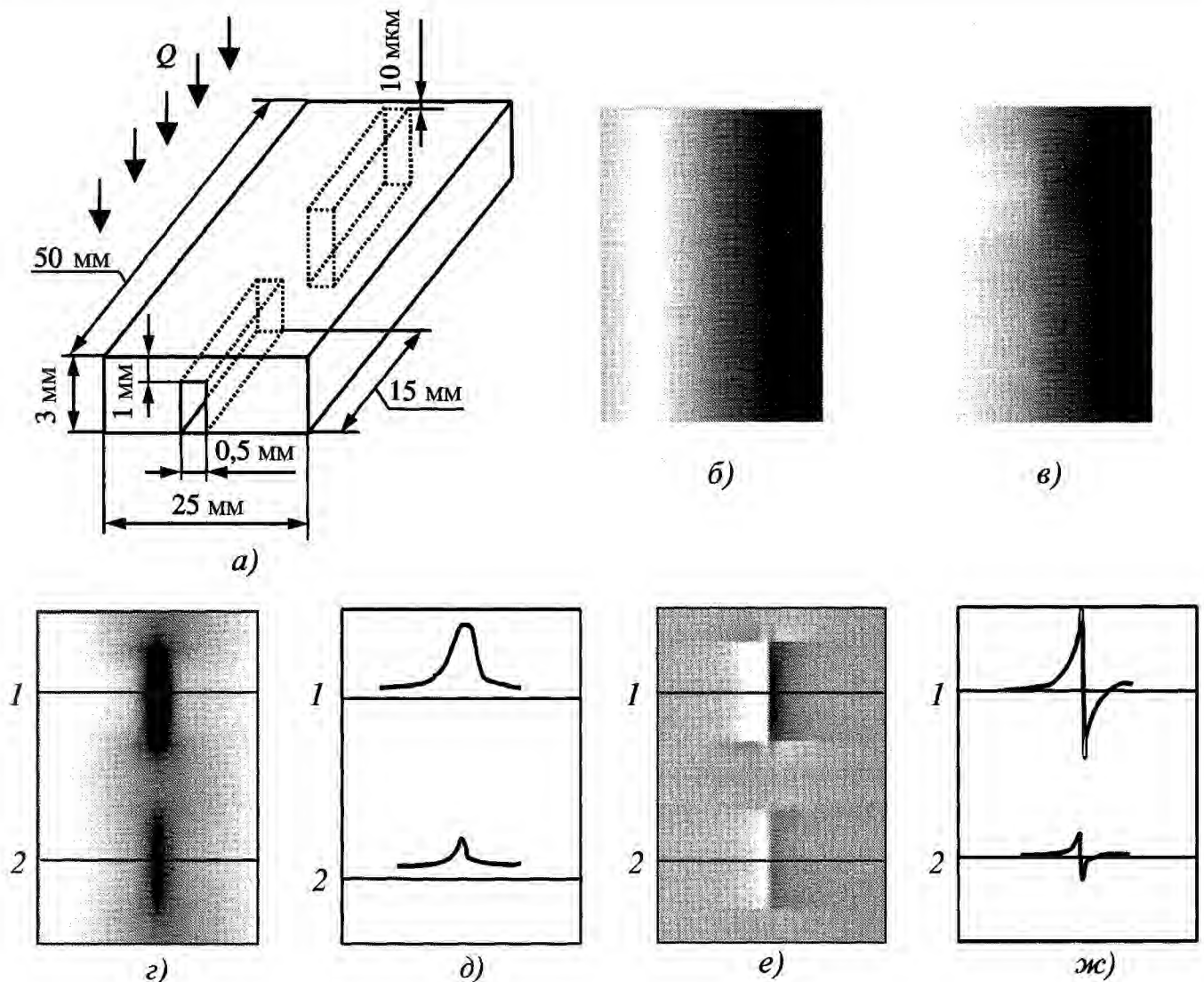
$$\sigma^2(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N=3} \sum_{j=1}^{N=3} [T(i, j) - m]^2;$$

$$m = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N=3} \sum_{j=1}^{N=3} T(i, j), \quad (4.78)$$

где  $T(i, j)$  – значение в точке  $[i, j]$ . Профили температуры для обоих дефектов изображены на рис. 4.35, е. Классическая форма сигнала температурной производной показана на рис. 4.35, д, ж как результат обработки термограммы рис. 4.35, в с помощью фильтра Лапласа (маска  $3 \times 3$ ):

$$3 \times 3 \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}. \quad (4.79)$$

Отчетливое изображение обоих типов дефектов на рис. 4.35, г – ж обусловлено 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 подобных изображений ухудшается по сравнению с расчетными результатами в силу того, что операция дифференцирования увеличивает вклад высокочастотных шумов и тем самым снижает отношение *сигнал/шум*.



**Рис. 4.35. Выявление трещины, расположенной перпендикулярно передней поверхности, при полосовом нагреве образца из стали марки AISI 1010 в течение 0,5 с ( $\lambda = 63,9$  Вт/(м·К);  $\alpha = 18,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; программа ThermoCalc-6L):**

*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 фильтром Лапласа;

*е* – профили температуры для изображения *г*);

*ж* – профили температуры для изображения *д*)

Качество исходной термограммы можно повысить путем:

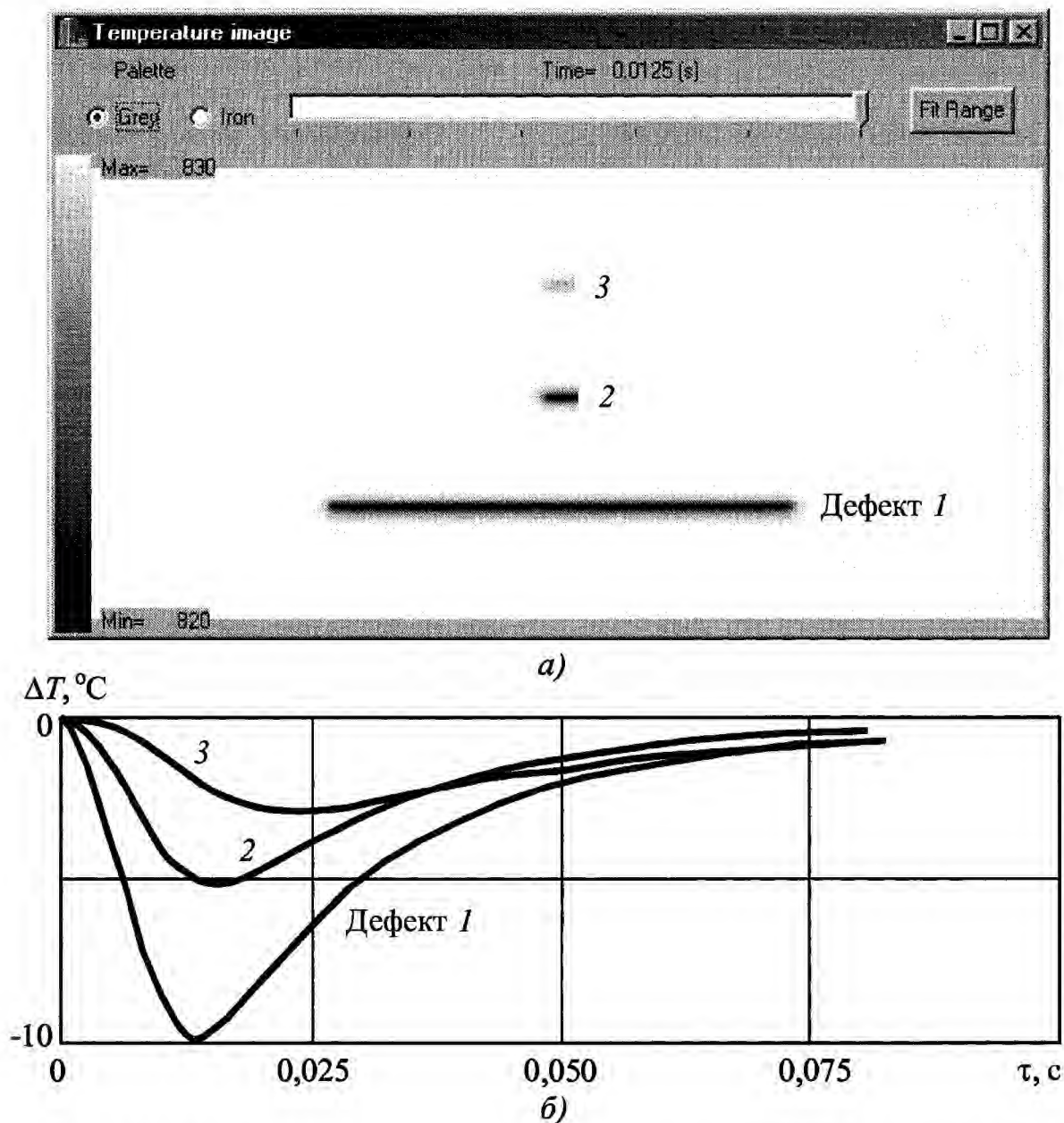
1) локализации поверхностного нагрева;

2) перемещения поверхностного источника с постоянной скоростью и регистрации температуры на определенном расстоянии от него;

3) нагрева торца изделия, что означает переход от поверхностного нагрева к объемному.

#### 4.8.10. Принудительное охлаждение объекта контроля

Как отмечалось выше, нагрев и охлаждение изделия математически эквивалентны и сводятся к смене знака в соответствующих выражениях. Тем не менее, нагрев, особенно в малых зонах, легче осуществить на практике, и его мощность, как правило, существенно превышает мощность охлаждения.



**Рис. 4.36. Обнаружение воздушных дефектов в стали AISI 1010 толщиной 3 мм путем принудительного охлаждения изделия (время охлаждения 0,01 с; интенсивность охлаждения  $\alpha_{forced} = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; программа ThermoCalc-6L):**

*a* – термограмма при 0,0125 с (Дефект 1:  $l = 0,3 \text{ мм}$ ;  $d = 90 \text{ мкм}$ ;  $h_x \times h_y = 40 \times 0,9 \text{ мм}$ ; Дефект 2:  $l = 0,3 \text{ мм}$ ;  $d = 90 \text{ мкм}$ ;  $h_x \times h_y = 4,5 \times 0,9 \text{ мм}$ ; Дефект 3:  $l = 0,6 \text{ мм}$ ;  $d = 90 \text{ мкм}$ ;  $h_x \times h_y = 4,5 \times 0,9 \text{ мм}$ );  
*б* – развитие температурного перепада во времени

В качестве иллюстрации рассмотрим принудительное охлаждение с помощью струи холодной воды изделия из стали AISI 1010 толщиной 3 мм, предварительно нагретого до 850 °С (подобные процедуры могут быть использованы в металлургии). Изделие содержит три воздушных дефекта, из которых Дефект 1 и 2 находятся на глубине 30 мкм, а Дефект 3 – на глу-

бине 60 мкм, причем Дефект 1 и 2 различаются только продольными размерами (см. рис. 4.36). Вода подается на переднюю поверхность изделия в течение 0,01 с (эквивалентный коэффициент вынужденного теплообмена  $\alpha_{forced} = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , после чего изделие продолжает охлаждаться путем обычной конвекции с коэффициентом  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Вследствие высокой

температуропроводности стали нестационарные тепловые процессы развиваются в течение десятков миллисекунд (см. пример температурного распределения на рис. 4.36, *a*).

Развитие температурного перепада во времени аналогично тому, которое имело бы место при нагреве эквивалентным тепловым импульсом, однако его знак отрицателен, т.е. дефектные участки в ходе охлаждения холоднее бездефектных (рис. 4.36, *b*). Очевидно, что наименьший сигнал создается наиболее глубоким дефектом. Оптимальные параметры обнаружения в этом случае:

Дефект 1:  $\Delta T_m = 10,0$  °C при  $\tau_m = 0,0125$  с;

Дефект 2:  $\Delta T_m = 5,1$  °C при  $\tau_m = 0,015$  с;

Дефект 3:  $\Delta T_m = 2,8$  °C при  $\tau_m = 0,0225$  с.

#### 4.8.11. Выявление близкорасположенных дефектов

Проблему взаимного влияния дефектов на поверхностное распределение температуры рассматривают в двух аспектах:

1) близкое расположение дефектов в плане ставит задачу о пространственном разрешении теплового метода аналогично тому, как это имеет место в оптике;

2) дефекты, расположенные ближе к контролируемой поверхности, могут затенять более глубокие дефекты.

Обе задачи анализируют, используя численные решения трехмерных задач ТК.

##### Пространственное разрешение ТК

Задача состоит в обеспечении условий контроля, которые позволят различить два дефекта, расположенные близко друг от друга в плане. Как и в оптике, для этого изготавливают специальные образцы со щелевыми дефектами различной ширины, расположенными на различных расстояниях друг от друга подобно оптическим мирам. Очевидно, что для данного стандартного образца улучшить про-

странственное разрешение можно оптимальным выбором процедуры и условий контроля.

Ограничимся иллюстрацией данной проблемы на примере образцов из углепластика и алюминия, в которых на глубине 0,5 мм расположены 6 дефектов (схема рис. 4.37, *a*).

Для углепластика рассмотрим 2 варианта:

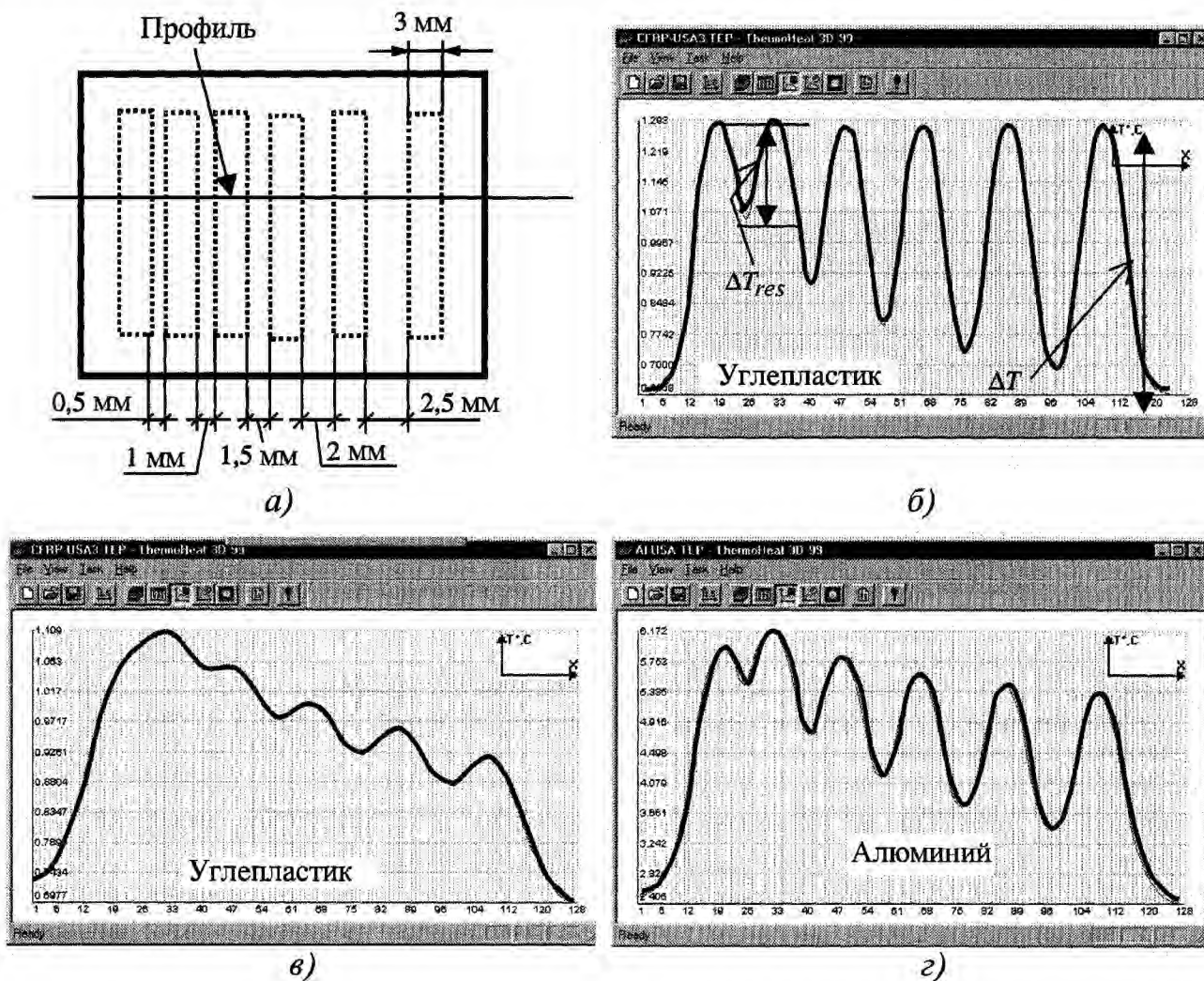
1) изотропный материал ( $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64$  Вт/(м·К));

2) анизотропный материал ( $\lambda_y = \lambda_z = 0,64$  Вт/(м·К);  $\lambda_x = 6,4$  Вт/(м·К)).

Мерой пространственного разрешения выбрано отношение температурного сигнала  $\Delta T_{\text{разр}}$  от двух близкорасположенных дефектов к максимально возможному сигналу  $\Delta T$ , который имел бы место для одиночного дефекта (см. рис. 4.37, *b*). Примем, что два близкорасположенных дефекта будут уверенно обнаружены, если  $\Delta T_{\text{разр}} \geq 0,1\Delta T$ . Тогда в изотропном углепластике для момента наблюдения 1 с пространственное разрешение будет лучше 0,5 мм, что соответствует расстоянию между первыми двумя дефектами слева (рис. 4.37, *b*).

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. 4.37, *в*). Соответственно, в алюминии для момента наблюдения 0,03 с пространственное разрешение равно 0,5 мм (рис. 4.37, *г*). Подчеркнем еще раз, что пространственное разрешение теплового метода ухудшается с увеличением времени наблюдения и ростом глубины дефектов. Наилучшие результаты получают при использовании метода раннего обнаружения.

Профили рис. 4.37 также показывают, что несколько близкорасположенных дефектов повышают среднюю температуру в зоне их нахождения, и при недостаточном



**Рис. 4.37. Пространственное разрешение дефектов в ТК**

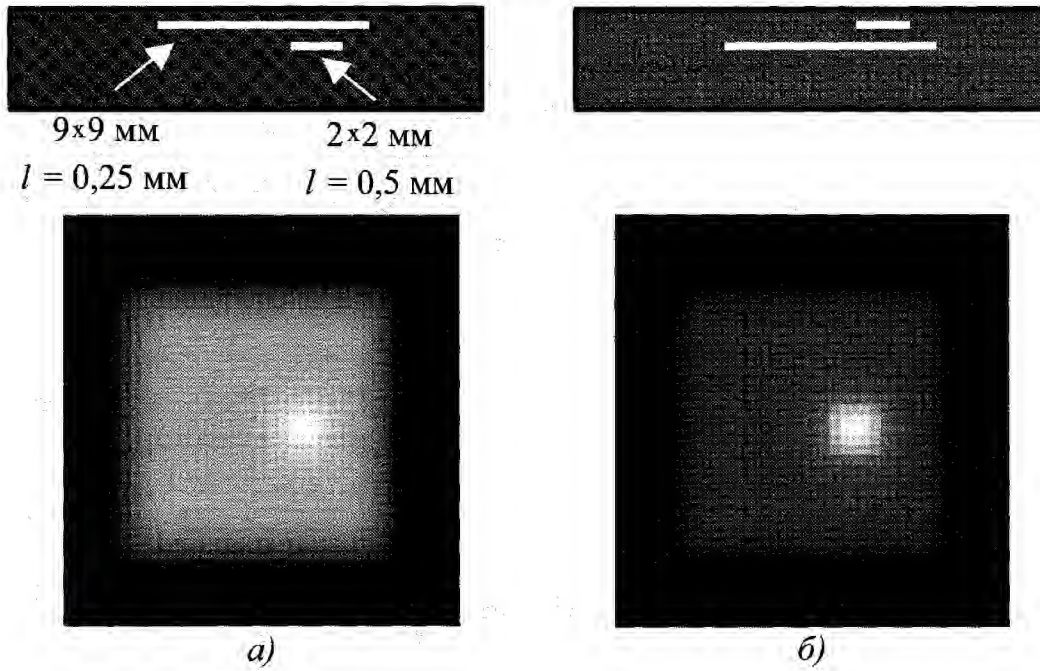
(поперечные размеры дефектов  $3 \times 25$  мм, глубина залегания 0,5 мм, толщина дефектов 0,5 мм):  
 а – схема дефектов; б – углепластик ( $L = 5$  мм,  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = 0,64$  Вт/(м·К),  $Q = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_h = 1$  с);  
 в – углепластик ( $L = 5$  мм,  $\lambda_x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

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. Деджиованни [56], показал, что суммарное температурное распределение  $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau)$  над группой малоразмерных дефектов может быть представлено как суперпозиция сигналов от каждого дефекта:  $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau) = \sum \Delta T_i(x, y, \tau)$ , т.е. суммирование производят как в пространстве, так и во времени.

Идентификация дефектов иногда возможна путем простого визуального просмотра термограммы. Например, в 1-м случае, представленном на рис. 4.38, а, более глубокий малый дефект "просвечивает" сквозь большой дефект. Тем не менее, дефектометрия в таких случаях затруднительна, поскольку приращение сигнала, вызванное более глубоким дефектом, зачастую находится на уровне шума и его невозможно отличить от вариаций геометрии и ТФХ основного дефекта. В теории ТК сигнал от двух тонких дефектов, расположенных один под другим, ведет себя слегка иным образом, нежели сигнал от одного дефекта двойной толщины, однако экспериментально возможность раз-



**Рис. 4.38. Затенение одного дефекта другим**  
(углепластик;  $L = 5$  мм,  $l = 1$  мм,  $d = 0,1$  мм,  $Q = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_h = 0,01$  с,  $\tau = 0,5$  с)

деления таких дефектов не доказана. Более того, с практической точки зрения, наличие уже одного дефекта может привести к отбраковке изделия, поэтому нет нужды оценивать характеристики других дефектов. Что касается 2-го случая, изображенного на рис. 4.38, б, оба дефекта могут быть оценены количественно, за исключением части большого дефекта, затененной малым дефектом.

#### 4.9. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ: ПРИМЕРЫ

Выше отмечалось, что одной из основных целей теоретического анализа является оптимизация параметров экспериментальных процедур. В любой процедуре испытаний дефект создает максимальное значение выбранного информативного параметра в определенный момент времени. В табл. 4.9 – 4.11 описаны три конкретных примера, 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  $\Delta T$  и  $C$ , по крайней мере, при малых толщинах изделий (табл. 4.9). 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. 4.10 и 4.11) глубина дефекта и его толщина выражаются через унос материала, однако процедуры ТК сохраняют свои классические особенности, например, поперечные размеры дефектов влияют главным образом на температурные контрасты, но не на оптимальные времена наблюдения. Данные табл. 4.10 также доказывают, что все три распространенных метода ТК (импульсный, ступенчатый и гармонический нагрев) обеспечивают близкие значения параметров обнаружения, что является отражением общности физических принципов ТК.

**4.9. 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 (<math>\tau_h = 0,01 \text{ с}</math>; <math>T_{\max} \approx 11,3 \text{ }^\circ\text{C}</math> для <math>Q = 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2</math>)</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



## 4.10. Оптимальные параметры обнаружения коррозии в стали

(сталь:  $a = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 32 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ )

Толщина изделия $L$ , мм	Унос материала, %	Радиус дефекта $r_d$ , мм	Максимальный температурный контраст $C_m^{rup}$	Оптимальное время наблюдения $\tau_m(C_m^{rup})$ , с
<i>Кратковременный нагрев (<math>\tau_h = 0,01 \text{ с}</math>; <math>T_{\max} \approx 8,4 \text{ }^\circ\text{C}</math> для <math>Q = 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2</math>)*</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 (<math>\tau_h = 5 \text{ с}</math>)</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. 4.10

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.

#### 4.11. Оптимальные параметры обнаружения коррозионного уноса материала в алюминии ( $Al$ : $a = 8,6 \cdot 10^{-5}$ м<sup>2</sup>/с, $\lambda = 210$ Вт/(м·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 (<math>\tau_h = 0,01</math> с)</i>				
1 ( $T_{max} \approx 5,57$ °С для $Q = 10^6$ Вт/м <sup>2</sup> )	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 ( $T_{max} \approx 4,54$ °С для $Q = 10^6$ Вт/м <sup>2</sup> )	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

Заметим, что данные табл. 4.10 (кратковременный нагрев) и табл. 4.11 хорошо описываются формулой инверсии (3.11), которая может быть также выражена через текущий контраст:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{C^{run}}{1 + C^{run}}; \quad C^{run} = \frac{\Delta L / L}{1 - \Delta L / L}. \quad (4.80)$$

В выражениях (4.80) отсутствуют ТФХ объекта контроля, что делает данный подход весьма общим. Для трех значений уноса материала (90, 50 и 10 %), представленных в табл. 4.10 и 4.11, соответствующие значения текущего контраста равны 9; 1 и 0.11 соответственно, что

близко к значениям, полученным в таблицах численным методом.

В табл. 4.12 приведены оптимальные параметры обнаружения протяженных (одномерных) воздушных дефектов в различных материалах при кратковременном и длительном нагреве. Следует обратить внимание на существенные различия в оптимальных моментах наблюдения максимальных контрастов и максимальных температурных сигналов. Данные табл. 4.12 могут быть использованы для ориентировочного прогнозирования возможностей ТК материалов с различной теплопроводностью.

#### 4.12. Оптимальные параметры обнаружения протяженных воздушных дефектов в различных материалах при кратковременном и длительном нагреве

Толщина изделия, мм	Вид нагрева	Оптимальные параметры обнаружения							
		Al		Сталь		Бетон		Углепластик	
		$C_m$ ( $\tau_m, c$ )	$\Delta T_m, ^\circ C$ ( $\tau_m, c$ )	$C_m$ ( $\tau_m, c$ )	$\Delta T_m, ^\circ C$ ( $\tau_m, c$ )	$C_m$ ( $\tau_m, c$ )	$\Delta T_m, ^\circ C$ ( $\tau_m, c$ )	$C_m$ ( $\tau_m, c$ )	$\Delta T_m, ^\circ C$ ( $\tau_m, c$ )
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)

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 поверхностях  $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ; программа Multilayer для аналитического решения одномерных задач ТК.

\* Приближенные значения.

**Пример.** С помощью табл. 4.9 – 4.11 можно получить реалистичные оценки предельных возможностей ТК по параметрам дефектов в различных материалах, если имеются данные о шумовых поверхностных контрастах. Например, пороговый контраст помехи на поверхности углепластика достигает 6 %, следовательно, в любой процедуре ТК будут выявляться дефекты, создающие  $C^{шум} > 0,06$ . Например, согласно данным табл. 4.9, в углепластике толщиной 1 мм этому условию соответствуют, дефекты радиусом более 5 мм, толщиной более 50 мкм на глубине менее 0,75 мм. Соответственно, в изделии толщиной 5 мм, параметры предельных дефектов составляют: по радиусу – более 5 мм, по толщине – более 100 мкм и по глубине залегания – менее 2,5 мм.

Очевидно, что указанные предельные значения могут быть улучшены по какому-либо параметру при соответственном ухудшении других параметров; например, дефекты радиусом менее 5 мм могут быть обнаружены либо на меньшей глубине, либо они должны быть большей толщины.

#### 4.10. РАЗВИТЫЕ МОДЕЛИ ТК

Все модели ТК, проанализированные выше, можно считать классическими в том смысле, что особенности пространственного распределения и временного развития сигнала  $\Delta T$  в зависимости от параметров этих моделей изучены достаточно хорошо, и многие из них практически используются в алгоритмах дефектометрии (см. Главу 5).

Дальнейшее углубление теоретических моделей связано:

1) со специфическими задачами, в которых действуют новые параметры обнаружения (например, движение влаги в почве и ее испарение на поверхности могут существенно снижать величину  $\Delta T$  над заглубленными объектами, такими как мины);

2) с анализом тонких эффектов, которые не играют решающей роли для обнаружения, но сказываются на физиче-

ском механизме контроля (например, анизотропия композитов приводит к искажению формы  $\Delta T$  на поверхности);

3) с возможной модификацией ТФХ основного материала в стандартных образцах при внесении в них искусственных дефектов;

4) с объединением чисто тепловых эффектов в объекте контроля с особенностями тепловизионной регистрации температуры (например, связь угла зрения ИК системы с индикатрисой 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 массоперенос в объекте контроля (испарение воды, таяние льда);
- шероховатость нагреваемой поверхности;
- конвективную и радиационную компоненты теплоотдачи, которые изменяются во времени;
- зависимость коэффициента излучения от состояния объекта и угла зрения тепловизора.

##### 4.10.1. Обнаружение фторопластовых вставок в углепластике

Распространенная технология изготовления стандартных образцов из углепластика предусматривает размещение фторопластовых вставок (inserts) между слоями композита. Моделирование таких дефектов не всегда возможно в рамках классических задач ТК, поскольку гипотеза об идеальном контакте фторопласта и углепластика приводит к заниженным оценкам температурных сигналов. Следовательно, приходится допускать наличие

незапланированных воздушных зазоров на границах дефектов и возможность модификации ТФХ основного материала.

На рис. 4.39, а показаны схемы двух стандартных образцов из углепластика, в которых фторопластовые вставки находятся на глубине 0,5 и 1,3 мм. Экспериментальные данные по изменению сигнала  $\Delta T$  во времени при импульсном нагреве ( $Q = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_h = 10$  мс) приведены на рис. 4.39, б. В образце А максимальный положительный сигнал составил  $\Delta T_m = 1,2$  °С в момент времени  $\tau_m = 0,8$  с, в то же время в образце Б сигнал находился на уровне шума, а визуально на месте дефекта наблюдалось понижение температуры.

Экспериментальные значения  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  для обоих образцов приведены в табл. 4.13 в сравнении с данными, рассчитанными по классической модели ТК, ко-

торая предусматривает идеальный тепловой контакт фторопласта и углепластика. Допущение о наличии воздушных зазоров между фторопластом и углепластиком не объясняет отрицательный знак  $\Delta T$  в образце Б. Расхождения теоретических и экспериментальных данных можно избежать, предположив, что в процессе изготовления образцов, помимо возникновения воздушных зазоров, изменяются ТФХ углепластика согласно схеме на рис. 4.40, а. Удовлетворительное совпадение результатов (см. кривые на рис. 4.40, б и данные табл. 4.13) возможно при одновременном увеличении как плотности, так и теплопроводности углепластика на 25 %, при этом его температуропроводность остается по определению неизменной.

Следует заметить, что описанный подход реализует решение обратной задачи ТК методом многократных проб и не гарантирует единственности решений.

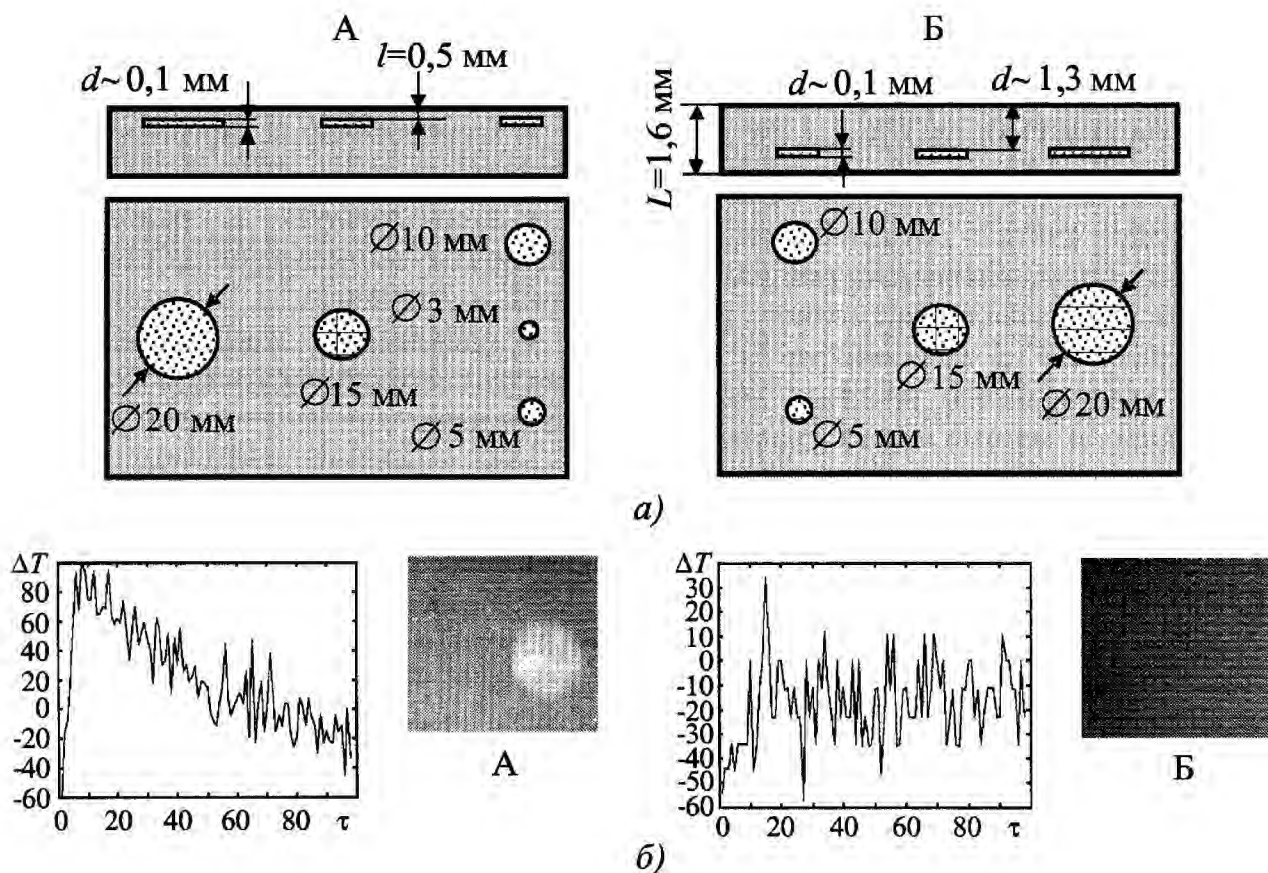
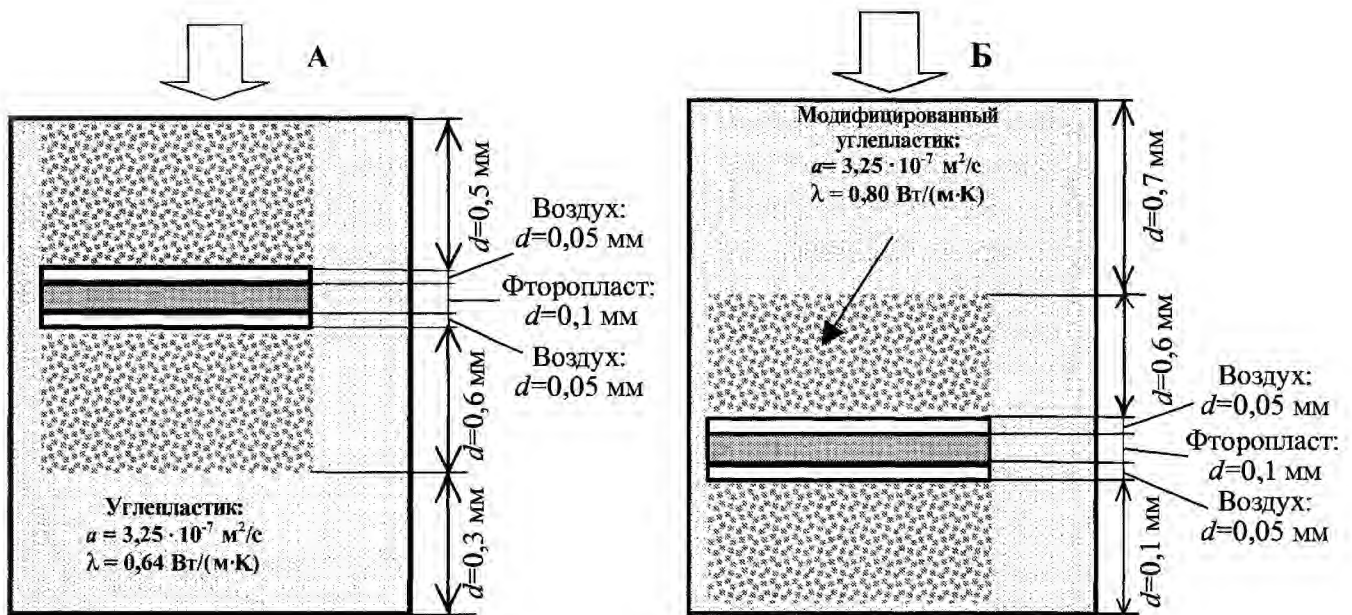


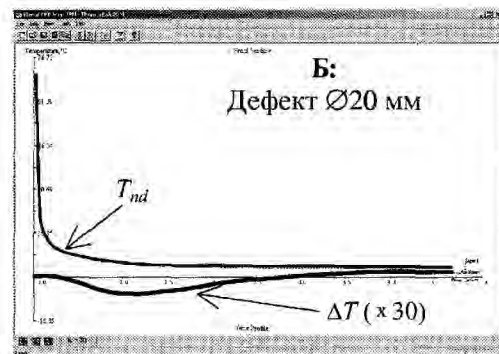
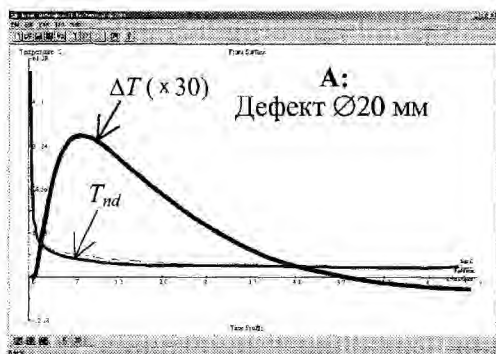
Рис. 4.39. Схема расположения фторопластовых вставок в стандартном образце из углепластика (а) и экспериментальные температурные сигналы (б) при импульсном нагреве ( $Q = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_h = 10$  мс)

**4.13. Сравнение экспериментальных и расчетных данных при ТК стандартных образцов из углепластика (рис. 4.39)**

Параметры		Эксперимент	Классическая модель (идеальный контакт между фторопластом и углепластиком)	Модель рис. 4.40 (программа ThermoCalc-2D)
<b>А</b>	$\Delta T_m$	+1,2 °C	+0,81 °C	+1,3 °C
	$\tau_m$	0,8 с	0,63 с	0,78 с
<b>Б</b>	$\Delta T_m$	~ -0,2 °C	+0,21 °C	-0,2 °C
	$\tau_m$	~ 1...2 с	2,23 с	1,1 с



а)



б)

**Рис. 4.40. Развитое моделирование ТК фторопластовых вставок в углепластике:**  
а – схема модификации ТФХ углепластика; б – расчетные температурные сигналы

### 4.10.2. Обнаружения мин в грунте

Другим примером развитой модели ТК является задача обнаружения мин в грунте (см. рис. 4.41). Номенклатура противопехотных и противотанковых мин весьма широка, однако в теоретических моделях мину чаще всего имитируют диском из однородного материала, расположенным в почве на глубинах от 1 до 15 см. Почва нагревается солнечным излучением, суточный ход которого моделируют функцией (3.33):  $Q(\tau) = Q_0 [1 - \cos(\omega\tau)]$ , где циклическая частота связана с суточным изменением солнечной освещенности ( $\omega = 2\pi/24$  ч). Большинство исследователей полагает, что обнаружение мин с помощью тепловизора возможно благодаря локальному возмущению ТФХ почвы, которое возникает при внесении мины в почву. Это доказывается четко фиксируемым в экспериментах суточным ходом  $\Delta T$ , что подтверждается простейшей моделью ТК. Однако, термографический контраст в месте расположения мины зависит не только от температуры, но и от изменения коэффициента излучения поч-

вы вследствие ее разрыхления и изменения влажности. Дополнительным фактором является наличие растительности, которая затеняет истинную температуру поверхности почвы.

#### Классическая модель

Классическая двумерная модель ТК в цилиндрических координатах позволяет получить зависимости сигнала  $\Delta T$  от времени, глубины залегания, размеров мины, ТФХ и неровностей почвы (см. рис. 4.42 и табл. 4.14). Вследствие более низкой интегральной теплопроводности мины или наличия воздушного зазора между миной и грунтом, в дневное время над ней имеет место локальное повышение температуры ( $\Delta T > 0$ ), достигая почти  $\Delta T_m \sim 5^\circ\text{C}$  в середине дня (рис. 4.40). Для неглубоко залегающих мин в ночное время может иметь место инверсия  $\Delta T$ , когда участок почвы над миной характеризуется пониженной температурой.

Как следует из табл. 4.14, в простейшей модели обнаружения мин наиболее сильным фактором, влияющим на  $\Delta T$ , является глубина залегания мины  $l$ .



Рис. 4.41. Модель ТК мин, заглубленных в почве:

а – схема контроля и граничные условия на поверхности почвы;

б – дискретизация пространственной сетки на поверхности (моделирование шероховатости)





Продолжение табл. 4.14

Параметры модели				Оптимальные параметры обнаружения *	
Материал	Диаметр мины, см	Толщина мины, см	Глубина залегания, см	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}^{**}$	$\tau_m, \text{ч}^{***}$
Песок сухой	20	1	1	-0,54 +0,58	-1 +5,3
			5	-0,15 +0,13	+1 +7,8
			10	-0,036 +0,023	+3,5 +14
		10	1	-1,36 +0,84	+0,3 +7
			5	-0,41 +0,21	+2,3 +12,5
			10	-0,10 +0,053	+5,0 +21,3
Песок влажный	20	10	1	+8,68 -0,92	+1 +11,5
			5	+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.

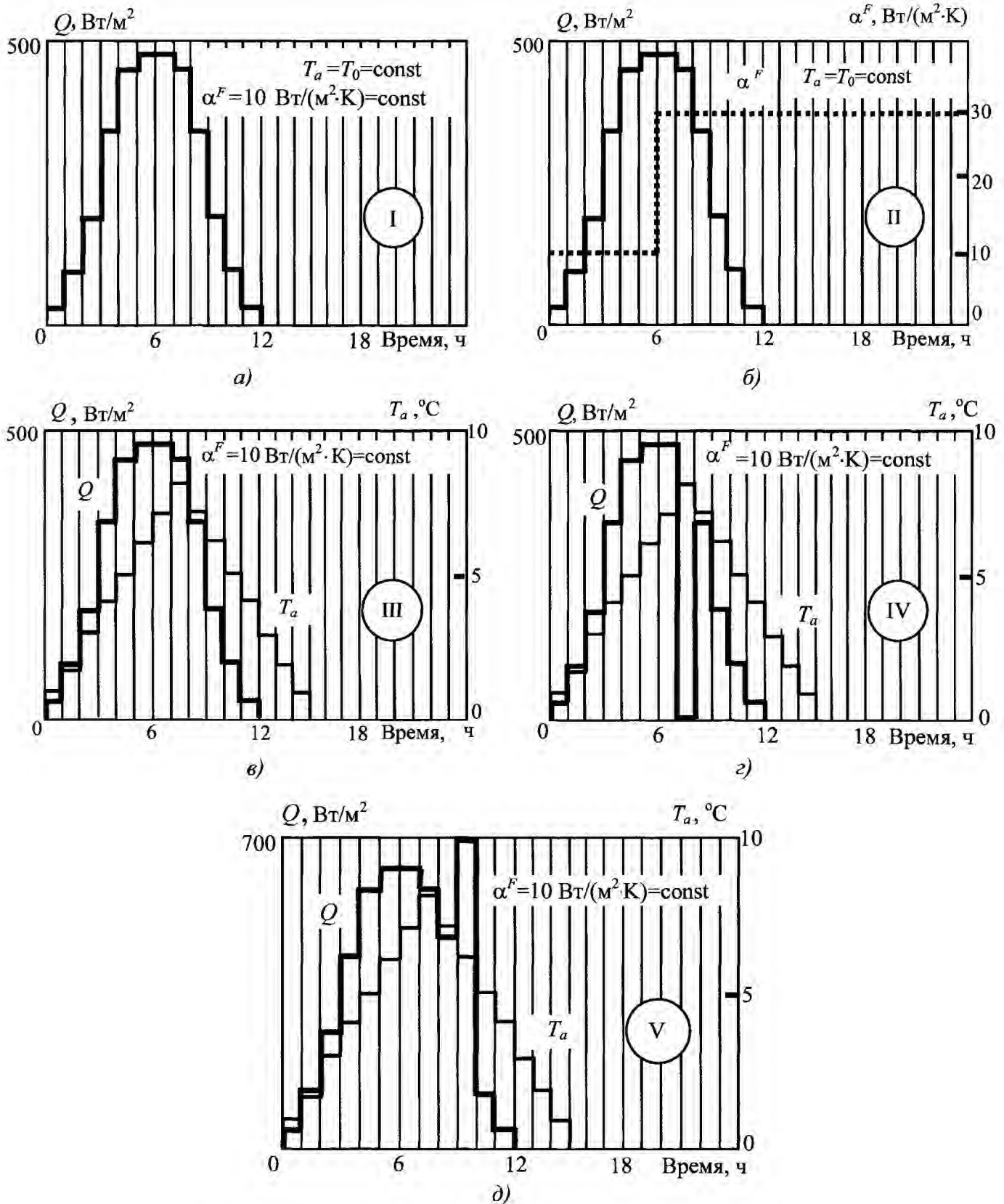
\*\*\*\* С точностью до шага расчета.

### Развитая модель ТК

Рассмотрим обнаружение противопехотных безоболочечных мин (из тринитротолуола) диаметром 20 см в почве на двух глубинах: 1 и 5 см. Различные виды типов и профилей нагрева изображены на рис. 4.43. Отсчет времени ведется от 6-00 ч утра (соответствует 0 ч на рис. 4.43); максимум инсоляции приходится на 12-00 ч дня. Для численного анализа использована программа ThermoCalc-3D Pro ("Инновация"), в которой все параметры модели можно задавать в табличной форме как функцию времени. Ре-

зультаты моделирования приведены в табл. 4.15.

Профиль I моделирует нагрев косинусоидальным импульсом, который проанализирован в предыдущем параграфе (полная поглощенная энергия в течение 12 часов равна 3 кВт·ч/м<sup>2</sup>). Сравнивая данные табл. 4.14 и табл. 4.15 видно, что оптимальные параметры обнаружения весьма близки (различия объясняются отклонениями ступенчатого профиля нагрева от гладкого и тем, что программа ThermoCalc-3D Pro моделирует дефекты прямоугольной формы в отличие от дисковидных дефектов в программе ThermoCalc-2D).



**Рис. 4.43. Профили нагрева при обнаружении мин в почве:**

- a* – 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/м<sup>2</sup> с 15-00 до 16-00 ч)

#### 4.15. 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. 4.43; программа ThermoCalc-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.

#### Влияние ветра

В рамках принятой модели изменение скорости ветра может быть сведено к изменению коэффициента теплообмена  $\alpha(\tau)$ .

Пример временного профиля  $\alpha(\tau)$  II изображен на рис. 4.43, б: смоделировано увеличение интенсивности теплоотдачи, начиная с 12-00 ч, с 10 до 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К), что, согласно формуле (2.4) эквивалентно увеличению скорости ветра с 2 до 11 м/с. Очевидно, что усиление теплоотдачи с поверхности снижает сигнал от мин. В особенности, это характерно для мины, расположенной на глубине 5 см, поскольку увеличение  $\alpha$  произошло в период максимального проявления именно этой мины.

#### Совместный нагрев солнечным излучением и средой

До сих пор мы рассматривали нагрев объекта контролем потоком лучистой энергии мощностью  $Q$ , причем начальная температура  $T_0$  была равна температуре окружающей среды  $T_a$ , а граничное условие имело вид уравнения (4.48):

$$\frac{\partial T_i(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_1} + \frac{\alpha^F}{\lambda_1} T_i(z=0, \tau).$$

Нетрудно показать, что, если температура среды изменяется, то это эквивалентно поступлению дополнительной энергии, которая будет нагревать объект исследований, если  $T_a > T_0$  и охлаждать его, если  $T_a < T_0$ . Температура воздуха подвержена суточным колебаниям, а солнечный поток существенно зависит от облачности. В этом случае целесообразно рассматривать произвольную функцию нагрева солнцем и средой в виде:

$$\frac{\partial T_i(z=0, \tau)}{\partial z} = -\frac{Q(\tau)}{\lambda_1} - \frac{\alpha^F}{\lambda_1} T_a(\tau) + \frac{\alpha^F}{\lambda_1} T_i(z=0, \tau). \quad (4.81)$$

Профиль III моделирует такой комбинированный способ нагрева, причем рост температуры среды  $T_a$  происходит относительно начального момента, за который принято 6-00 ч утра. Поскольку даже в момент максимальной температуры среды (рост на 8 °С в период 13-00...14-00) экви-

валентный дополнительный поток равен только  $\alpha^F T_{a \max} = 80 \text{ Вт/м}^2$ , т.е. существенно меньше основного лучистого потока, приращение температурного сигнала вследствие дополнительного подогрева средой незначительно (см. табл. 4.15).

#### Уход солнца за облака

Пример суточной функции нагрева, моделирующей кратковременный уход солнца за облака (с 13-00 до 14-00 ч), показан на рис. 4.43, з (Профиль IV). Из данных табл. 4.15 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

Модель с произвольным нагревом позволяет проанализировать возможное улучшение выявляемости мин путем использования искусственного источника нагрева; функция нагрева для этого случая изображена на рис. 4.43, д (Профиль V, мощность лучистого потока с 15-00 до 16-00 ч увеличена на  $500 \text{ Вт/м}^2$ ). 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 сигнала  $\Delta T$  зависит от мощности источника и в случае Профиля V возрастает на 3...5%. Очевидно, что столь малое повышение сигнала связано с неоптимальным выбором момента включения дополнительного источника, использование которого более эффективно при  $\Delta T \sim 0 \text{ С}^\circ$ .

#### Неровности почвы

При анализе 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. 4.43, 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 температурные сигналы, которые могут быть восприняты оператором как ложные отметки дефектов. Моделирование произвольной шероховатости почвы методом конечных элементов описано И. Сендуром и Б. Бартлейном [57] (см. рис. 4.41, б). Более простой пример искажения температурного отпечатка мины, расположенной под небольшим возвышением почвы, показан на рис. 4.44.

#### Влажность почвы

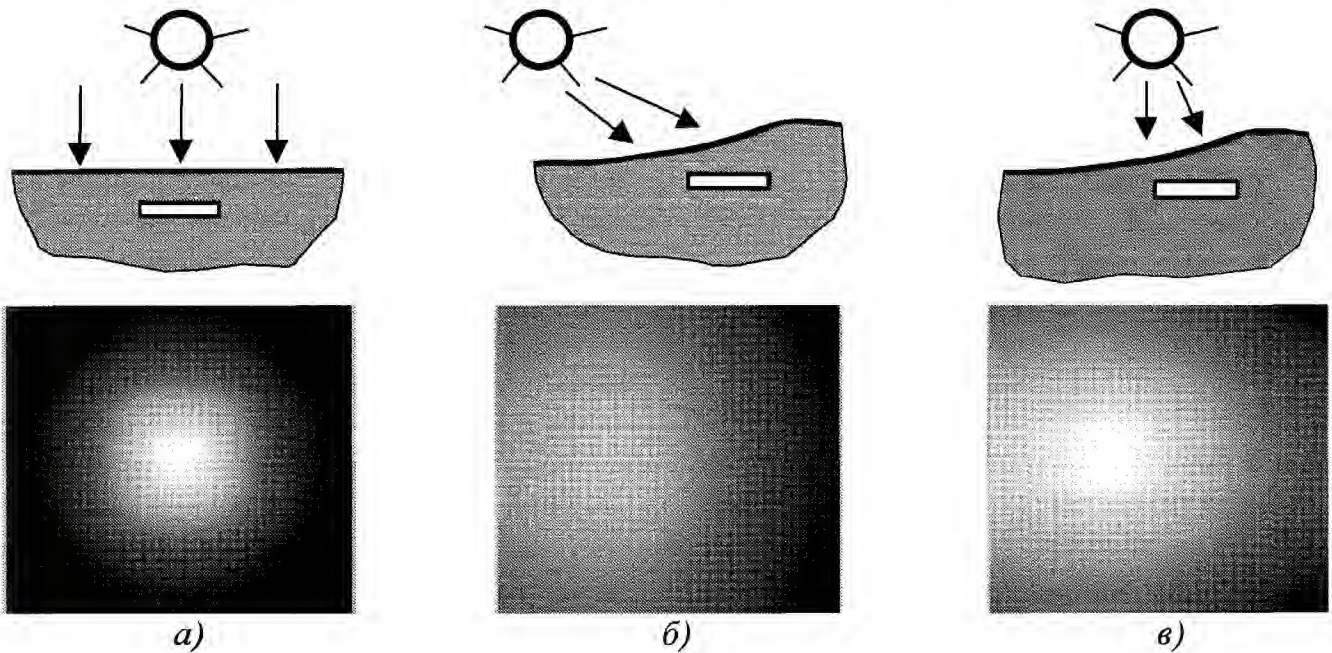
Влияние изменяющейся влажности почвы на выявляемость заглубленных в почву предметов существенно, но не изучено исчерпывающим образом, поскольку зависит от комбинации нескольких факторов, которые могут действовать на  $\Delta T$  противоположным образом, а именно:

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).



**Рис. 4.44. Модель неравномерного нагрева вследствие неровности почвы (тринитротолуол в почве):**

*a* – классическая модель; *б* – солнце низко над горизонтом; *в* – солнце в зените

Приблизительно можно считать, что в первые моменты времени после начала дождя температура поверхностного слоя почвы становится близкой к температуре выпавшей воды, что приводит к полному "смазыванию" температурных "отпечатков" заглубленных мин.

Во многих случаях, наличие влаги увеличивает *теплопроводность* пористой среды, в то время 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. Например, при увлажнении сухого песка может произойти смена знака температурного сигнала  $\Delta T$  и возрастание его по абсолютному значению благодаря существенному увеличению теплопроводности песка (см. табл. 4.15).

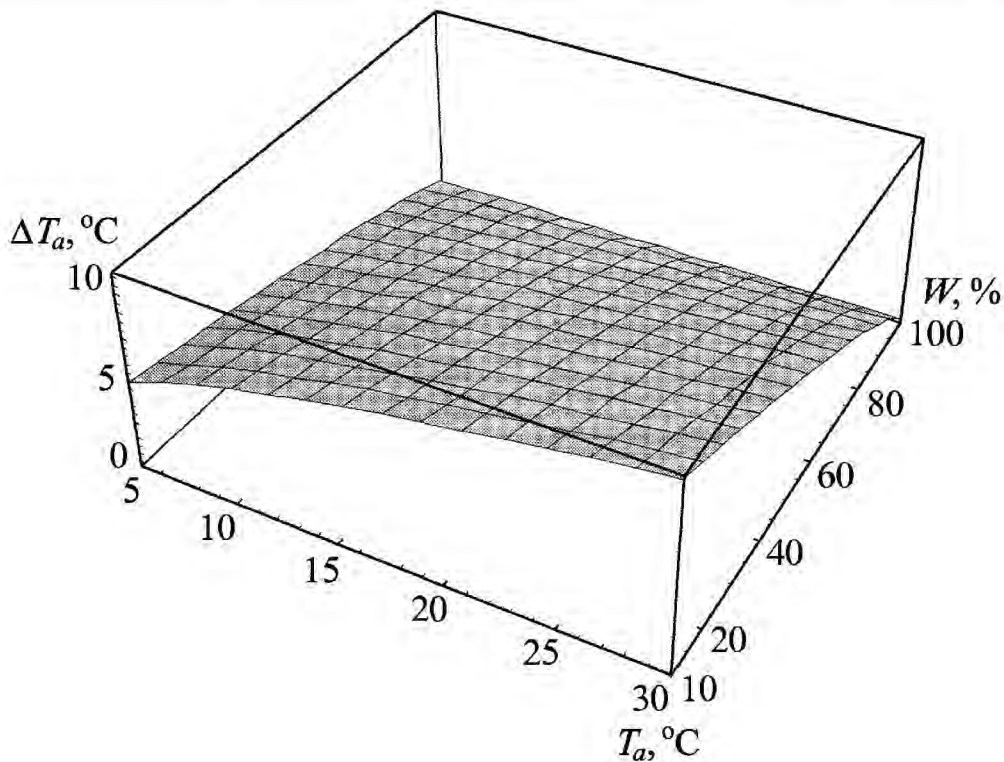
Испарение влаги на поверхности почвы снижает эффективный тепловой поток, уходящий в глубь почвы и обуславливающий формирование  $\Delta T$  над заглубленным сигналом. Анализ нагрева влажного тела окружающей средой, вы-

полненный А.В. Лыковым [17], показал, что в случае постоянной скорости испарения действие испарения эквивалентно снижению температуры среды на величину  $\Delta T_a$ , зависящую от давления, влажности и температуры среды. В рамках обсуждаемой модели ТК это означает введение в правую часть граничного условия (4.81) теплового потока испарения  $Q_{evap} = \alpha^F \Delta T_a / \lambda$ , который имеет знак, обратным знаком основного потока нагрева  $Q$ . Величины  $\Delta T_a$  можно найти из психрометрических таблиц, причем  $T_a$  – показания сухого термометра, а  $\Delta T_a$  – разность показаний сухого и влажного термометров. Для удобства расчетов значения  $\Delta T_a$  в нормальных условиях могут быть выражены аналитически со средней погрешностью около 20 %

$$\Delta T_a = 0,06544 T_a^{0,4420} (100 - W)^{0,8036}, \quad (4.82)$$

где  $W$  – относительная влажность среды, %.

График  $\Delta T_a$  представлен на рис. 4.45. Например, если  $T_a = 20$  °С,  $W = 51$  %, то  $T_a = 6$  °С. Для случая влажного песка



**Рис. 4.45. Эквивалентное снижение температуры среды при нагревании влажных тел в зависимости от температуры и влажности среды для нормальных условий**

(табл. 4.14) эквивалентное уменьшение потока нагрева равно  $Q_{evap} = \alpha \Delta T_a = 60 \text{ Вт/м}^2$  при подводимом потоке  $Q = 500 \text{ Вт/м}^2$ . Соответственно, температурный сигнал понизится на 12 % (заметим, что в целом увлажнение песка увеличивает интегральный сигнал  $\Delta T$  вследствие роста теплопроводности песка).

Таким образом, поверхностное испарение влаги тем сильнее снижает температурные сигналы над заглубленными

объектами, чем меньше стимулирующий тепловой поток, ниже влажность воздуха и выше температура среды.

Наконец, влияние влажности на изменение коэффициента излучения представляется эффектом второго порядка, поскольку действует сразу на большие участки почвы (мы здесь не рассматриваем более тонкие эффекты, связанные, например, с преимущественным накоплением влаги в слое почвы над миной вследствие разрыхления почвы).

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ (ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ)

В настоящей главе мы будем рассматривать *идентификацию* (retrieving, identification, inversion) размеров  $\{h_x, h_y, d\}$  и глубины залегания  $\{l\}$  внутренних дефектов путем решения обратной задачи

$$\{h_x, h_y, d, l\} = \{T(x, y, \tau)\}^{-1}, \quad (5.1)$$

которая эквивалентна более общей обратной задаче (2.38), 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 решения многомерных задач теплопроводности.

Предложено несколько принципов построения алгоритмов идентификации дефектов. В Главах 3 и 4 показано, что непосредственная инверсия прямых решений, как правило, невозможна. Наиболее общий подход к решению обратных задач состоит в анализе невязки функционала, образованного экспериментальными данными и соответствующим теоретическим решением, что приводит к необходимости находить глобальный экстремум функционала в многомерном пространстве параметров ТК (см. также п. 3.7.5); в публикациях по ТК этот метод называют *нелинейной подгонкой* (non-linear fitting). На практике наиболее простые решения обратных задач ТК получают путем инверсии численных результатов решения прямых задач и их аппроксимации теми или иными формулами инверсии. 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 теплопроводности. Численные коэффициенты в формулах инверсии получают, используя метод наименьших квадратов. Соответствующие опции имеются во многих стандартных математических пакетах, таких как Mathematica, MatLab и др.

### 5.1. ДЕФЕКТОМЕТРИЯ ПУТЕМ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО ОТКЛИКА НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЫ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

#### 5.1.1. Метод "кажущейся" тепловой инерции (нагрев импульсом Дирака)

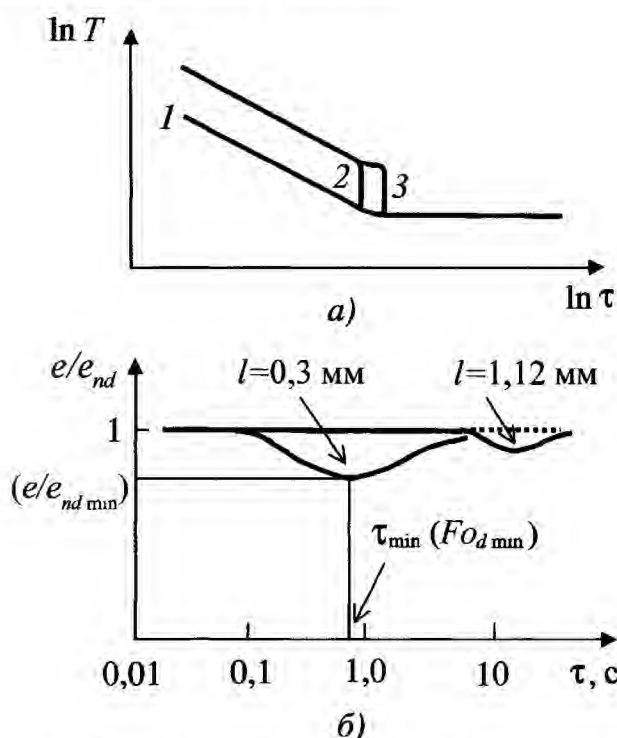
Напомним, что метод "кажущейся" тепловой инерции, описанный в п. 3.2, основан на том, что тепловая инерция полуограниченного тела, подвергнутого импульсному тепловому воздействию, в любой момент времени может быть определена по формуле (3.2):  $e = W / [T(\tau^*) \sqrt{\pi \tau^*}]$ . Аналогичная формула справедлива и для начальной стадии нагрева пластины ( $Fo < 0,1$ ).

В п. 3.2. было показано, что в случае однородного полуограниченного тела тепловая инерция, определенная по уравнению (3.2), не зависит от времени, поэтому возможные отклонения экспериментального значения  $e$  от эталонного следует трактовать как наличие в теле областей с неоднородными ТФХ [18, 58 – 60].

Кривую изменения поверхностной температуры во времени строят в координатах " $\ln T - \ln \tau$ " (см. п. 3.1). В идеальном случае однородного адиабатического тела

это должна быть прямая линия (кривая 1 на рис. 5.1, а). На практике конечная длительность импульса, конечная толщина изделия и потери тепла искажают прямолинейный вид температурной функции (см. поведение кривой 1 на рис. 5.1, а, в конце процесса). Двухслойное изделие с идеальным тепловым контактом между слоями характеризуется кривой 2, тогда как наличие внутреннего дефекта приводит к кривой 3 (рис. 5.1, а).

С целью исключить влияние возмущающих факторов рассматривают бездефектную (эталонную) зону с тепловой инерцией  $e_{nd}$ . В этом случае отношение текущего значения тепловой инерции к эталонному  $e/e_{nd}$  выражается прямой линией, параллельной оси времени везде, кроме дефектных участков.



**Рис. 5.1. Метод "кажущейся" тепловой инерции:**

а – 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  $20 \times 20$  мм

Пример экспериментальных данных приведен на рис. 5.1, б. В полном соответствии с теорией, изложенной в Главе 4, чем глубже дефект, тем позднее наступает 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  $Fo_d = a\tau/l^2$  (здесь все обозначения соответствуют ранее принятым в Главе 4). 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:

$$(e/e_{nd})_{\min} = Fo_{d \min}^{-0,528};$$

$$Fo_{d \min} = 1 + 0,62 Bi_d^{-1}. \quad (5.2)$$

Формулы для определения глубины залегания и теплового сопротивления дефекта предложены в следующем виде:

$$l = \sqrt{\alpha \tau_{\min}} (e/e_{nd})_{\min}^{0,95};$$

$$R_d = (1,161/e_{nd}) \sqrt{\tau_{\min}} (e/e_{nd})_{\min}^{0,95} \times [(e/e_{nd})_{\min}^{-1,89} - 1]. \quad (5.3)$$

Очевидно, что точка минимального значения  $(e/e_{nd})_{\min}$  в данной модели соответствует максимальному температурному сигналу  $\Delta T_m$  в "классической" теории ТК, рассмотренной в Главе 4, поэтому решение обратной задачи в виде (5.3) 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 составила 20 % по глубине залегания дефектов и 40 % по их толщине [58 – 60].

Формулы (5.3) были уточнены Ж. Крапэ и Д. Балажа [61]:



$$l = \sqrt{a_z \tau_{\min} C_{\min}^{inv 0,97}} ;$$

$$R_d = 0,0286 \frac{l}{\lambda_z} (C_m^{run})^{0,952+0,0362[\log_{10} C_m^{run}]^2} , \quad (5.4)$$

где  $C^{inv} = T_{nd}/T_d$  – инвертированный относительный контраст температуры.

Формулы (5.4) являются более общими, чем (5.3), однако и они справедливы лишь для одномерных дефектов, далеко отстоящих от задней поверхности изделия.

### 5.1.2. Использование ранних времен наблюдения

Термин "раннее время наблюдения" (early detection method) был предложен группой Д. Балажа для определения момента времени, когда развивающийся температурный сигнал  $\Delta T(\tau)$  начинает превышать уровень шума (см. также п. 6.2). Очевидно, что отношение сигнал/шум при этом ниже, чем в момент оптимального наблюдения, но форма скрытых дефектов воспроизводится лучше вследствие более слабой диффузии тепла. Кроме того, тепловое сопротивление (толщина) дефектов при ранних временах наблюдения практически не влияет на поверхностную температуру в дефектной зоне, поэтому метод раннего наблюдения особенно пригоден для оценки глубины залегания дефектов [61, 62]

$$l = \sqrt{a_z \tau (C^{run}) \ln(2/C^{run})} , \quad (5.5)$$

где  $\tau(C^{run})$  – момент времени, когда регистрируют контраст  $C^{run}$ .

Сообщается, что ошибка определения  $l$  по формуле (5.5) 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 (5.5) для сигналов, величина которых начинает превышать уровень шума, в частности, рекомендуется выбирать  $C^{run} \sim 1...3\%$ . Тем не менее, следует отметить, что во многих случаях пороговые значения шума могут существенно превышать эти значения.

Для дефектов с низким значением  $R_d$  предложена другая формула инверсии:

$$C^{run} = 200 \exp[-1/Fo^*] \left( 1 - \frac{2Fo^*}{R^* + 2Fo^*} \right) , \quad (5.6)$$

где  $Fo^* = a_z \tau / l^2$ ;  $R^* = R_d \lambda_z / l$ . Поскольку выражение (5.6) содержит  $R^*$  в неявном виде, его следует использовать в итеративном процессе совместно с формулой (5.4) для  $R_d$ . Наилучшая точность ( $\sim 2\%$ ) была получена для низких значений контраста.

### 5.1.3. Восстановление профиля коррозии

Простой алгоритм восстановления профиля толщины пластины путем сравнения расчетных и экспериментальных данных предложен С. Лугиным и У. Нетцельманном [63].

Сущность алгоритма пояснена на рис. 5.2. Используем выражения для дираковского нагрева полуограниченного адиабатического тела (см. табл. 2.4):

$$T_{si}(z, \tau) = \frac{W}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau}} e^{-\frac{z^2}{4a\tau}} ;$$

$$T_{si}(z=0, \tau) = \frac{W}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau}} . \quad (5.7)$$

Распределение температуры по глубине тела для некоторого момента времени  $\tau^*$  показано на рис. 5.2 жирной пунктирной линией. В случае пластины тол-

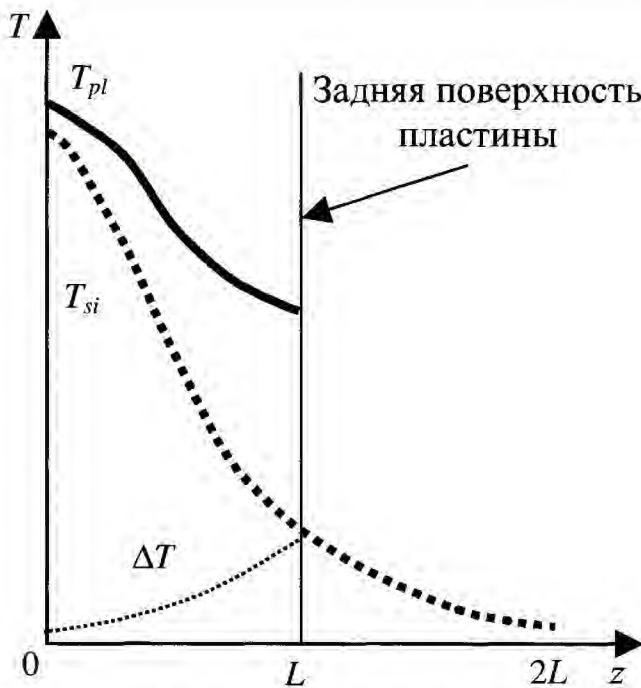


Рис. 5.2. Температурные отклики полубесконечного тела и пластины (адаптировано из [63])

щиной  $L$  импульсная тепловая волна отражается от задней поверхности, что приводит к повышению температуры в любой точке  $z \leq L$  (сплошная линия на рис. 5.2). Разность двух температур, показанная тонкой пунктирной линией, представляет собой зеркальное отражение "хвоста" кривой при  $z \leq L$  (время  $\tau^*$  мало, диффузия тепла в поперечных направлениях незначительна, учитывается только первое отражение импульсной тепловой волны от задней поверхности пластины). Тогда приращение поверхностной температуры из-за наличия отражающей поверхности равно температуре полубесконечного тела на глубине  $2L$ :

$$\begin{aligned} \Delta T(z, \tau) &= \frac{W}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau^*}} e^{-\frac{(2L)^2}{4\alpha \tau^*}} = \\ &= \frac{W}{\sqrt{\pi C \rho \lambda \tau^*}} e^{-\frac{L^2}{\alpha \tau^*}}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Нетрудно показать, что, вводя текущий контраст температуры пластины  $T_{pl}$  относительно полуограниченного тела

$C_{si} = [T_{pl}(\tau^*) - T_{si}(\tau^*)] / T_{si}(\tau^*)$ , толщину пластины можно рассчитать по выражению:

$$L = \sqrt{-\alpha \tau^* \ln[C_{si}(\tau^*)]}. \quad (5.9)$$

При экспериментальной реализации алгоритма контраст  $C_{si}$  заменяют стандартным текущим контрастом относительно выбранной бездефектной точки  $C^{run}$  и в тех точках, где его значение превышает шум, рассчитывают условную толщину изделия, которую авторы назвали *эхо-глубиной дефекта* (echo defect depth – EDD). В дальнейшем применяют итеративную процедуру определения профиля толщины изделия. Последовательные оценки EDD вводятся в расчетную модель, которая может быть одно-, двух- или трехмерной. При лабораторной проверке алгоритма был использован расчетный метод конечных элементов (5500 элементов сетки). Реконструкция двухмерного профиля коррозии по трем итерациям потребовала 3-х минут расчета на персональном компьютере.

Другой подход к оценке коррозионного уноса материала, учитывающий конечные размеры зон коррозии, будет описан в п. 5.8.

#### 5.1.4. Дефектометрия тонких теплопроводных образцов при импульсном нагреве

Ф. Делпеш и др. предложили следующую аппроксимацию решения (3.58) задачи импульсного нагрева двухслойной пластины с резистивным дефектом [40]

$$T^F(\tau) = \beta_1 e^{-\beta_2 \tau} + \beta_3 e^{-\beta_4 \tau}. \quad (5.10)$$

Вариационный анализ показал, что коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , в основном, определяемые первым корнем трансцендентного уравнения (3.58), слабо зависят от параметров внутренних дефектов, причем  $\beta_2$  связан с интенсивностью теплоотдачи  $\alpha$ . Коэффициенты  $\beta_3$  и  $\beta_4$ , опреде-

ляемые вторым корнем трансцендентного уравнения, связаны соответственно с глубиной залегания дефекта  $l_1$  и его тепловым сопротивлением  $R_d$ . Особенности итеративной оценки коэффициентов  $\beta$  в данном алгоритме описаны в п. 5.6.

## 5.2. "ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ" ФУНКЦИИ ИНВЕРСИИ

В.П. Вавилов с соавторами предложили способ решения обратных задач ТК, основанный на аппроксимации набора численных решений прямых задач полиномиальными функциями [64]. Термин "индивидуальный" в данном случае означает, что анализируют ограниченный набор материалов и процедур их испытаний (в идеальном случае, один материал и одну выбранную процедуру испытаний). Такой подход обеспечивает высокую точность оценки характеристик дефектов.

В частности, для восстановления параметров воздушных расслоений в углепластике предложены следующие формулы инверсии:

$$l [\text{мм}] = -0,005 + 0,177 \tau_m [\text{с}] + 0,00424 \tau_m^2;$$

$$d [\text{мм}] = 0,0162 \left\{ \frac{C_m^{\text{norm}}}{1 - \exp(-r_d [\text{мм}] / 6)} \right\}^{0,487} \times \left\{ \frac{\tau_m}{1 - \exp(-r_d / 4)} \right\}^{1,363}, \quad (5.11)$$

где, в отличие от формул (5.3 – 5.6), использован не текущий, а *нормализованный* контраст  $C^{\text{norm}}$  (см. табл. 1.1), максимум которого совпадает с максимумом  $\Delta T$ . Использование  $C^{\text{norm}}$  связано с тем, что в импульсных процедурах ТК часто используют операцию *нормализации* экспериментальных данных, что позволяет снизить влияние неравномерности нагрева (см. п. 6.11).

Для изделий из углепластика толщиной 5 мм погрешность инверсии составля-

ет ~5 % по  $l$  и ~25 % по  $d$ . Кроме того, в выражение для толщины расслоений введены их поперечные размеры, которые должны быть оценены дополнительно, например, измеряя видимые размеры температурных отпечатков. Тем не менее, для расслоений в углепластике, представляющих практический интерес ( $h > 10$  мм), экспоненциальным членом в формуле (5.11) можно пренебречь, придя, таким образом, к одномерному случаю.

## 5.3. ОБОБЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ИНВЕРСИИ

В софтвере ThermoFit Pro ("Инновация") формулы инверсии предложены для широкого круга материалов, 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:

$$l [\text{м}] = 0,4066 (\alpha \tau_m)^{0,4885} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,1903} \times (L / \lambda)^{0,07884} \text{Fo}_h^{0,1208} C_{\text{run}}^{-0,2869};$$

$$R_d [\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{В}^{-1}] = 1,2390 (\alpha \tau_m)^{0,4043} \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{-0,04380} (L / \lambda)^{0,1193} \text{Fo}_h^{-0,1681} C_{\text{run}}^{0,2255};$$

для нормализованного контраста температуры:

$$l [\text{м}] = 0,1694 (\alpha \tau_m)^{0,4937} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,3591} \times (L / \lambda)^{0,2699} \text{Fo}_h^{0,4137} C_{\text{norm}}^{-0,7348};$$

$$R_d [\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{В}^{-1}] = 1,9106 (\alpha \tau_m)^{0,4208} \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{-0,1341} (L / \lambda)^{0,2222} \times \text{Fo}_h^{-0,002878} C_{\text{norm}}^{-0,01405}. \quad (5.12)$$

За импульсом нагрева ( $\tau > \tau_h$ ) для текущего контраста температуры:

$$l [\text{M}] = 0,7076[\alpha(\tau_m - \tau_h)]^{0,4564} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,2849} (L / \lambda)^{0,05359} \times \\ \times \text{Fo}_h^{0,05227} C_{run}^{-0,1511};$$

$$R_d [\text{M}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{B}^{-1}] = 4,3682[\alpha(\tau_m - \tau_h)]^{0,3432} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{1,2647} (L / \lambda)^{0,2862} \text{Fo}_h^{-0,05300} C_{run}^{0,4256};$$

для нормализованного контраста температуры:

$$l [\text{M}] = 0,1694(\alpha\tau_m)^{0,4937} (1 - \lambda_d / \lambda)^{0,3591} \times \\ \times (L / \lambda)^{0,2699} \text{Fo}_h^{0,4137} C_{norm}^{-0,1269};$$

$$R_d [\text{M}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{B}^{-1}] = 4,9209[\alpha(\tau_m - \tau_h)]^{0,03140} \times \\ \times (1 - \lambda_d / \lambda)^{1,3705} (L / \lambda)^{0,2961} \text{Fo}_h^{-0,04242} C_{run}^{0,4071}.$$

В случае  $\tau \leq \tau_h$  погрешность дефектометрии по  $l$  и  $R_d$ , как правило, не превышает 1 % для обоих параметров. Если экстремумы информативных параметров наступают после окончания нагрева ( $\tau > \tau_h$ ), погрешность определения  $l$  в большинстве практических случаев 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 (5.12) состоит в том, что они справедливы для любых материалов и процедур импульсного ТК.

#### 5.4. УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ИНВЕРСИИ

##### 5.4.1. Определение глубины залегания и теплового сопротивления дефекта, расположенного между двумя высокотеплопроводными пластинами

Пусть резистивный дефект расположен между двумя высокотеплопроводными пластинами толщиной  $l_1$  и  $l_2$ . Метод тепловой дефектометрии, предложенный в Управлении по авиации Франции

(ONERA), основан на предположении, что в любой момент времени температура во всех точках каждой из пластин одинакова вследствие их высокой теплопроводности, тогда как основной температурный градиент имеет место в дефектном слое [58]. Температура передней поверхности адиабатического изделия после воздействия импульса Дирака равна

$$T(z=0, \tau) = \frac{W}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \\ \times \left[ 1 + \frac{C_2 \rho_2 l_2}{C_1 \rho_1 l_1} \exp \left( - \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau \right) \right], \quad (5.13)$$

где  $\frac{W}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} = T_\infty$  — температура изделия в конце теплового процесса.

Для прямоугольного импульса длительностью  $\tau_h$  решение получено с помощью интеграла Дюамеля

$$\frac{T(z=0, \tau)}{T_\infty} = \left\{ 1 + \frac{R_d}{\tau_h} \frac{(C_2 \rho_2 l_2)^2}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \right. \\ \times \left[ \exp \left( \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h \right) - 1 \right] \times \\ \left. \times \exp \left( - \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{R_d C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau \right) \right\}. \quad (5.14)$$

В однородном материале

$$\frac{T(z=0, \tau)}{T_\infty} = \frac{R_d C \rho (L-l)^2}{\tau_h L} \times \\ \times \left[ \exp \left( \frac{L}{R_d C \rho l (L-l)} \tau_h \right) - 1 \right] \times \\ \times \exp \left( - \frac{L}{R_d C \rho l (L-l)} \tau \right). \quad (5.15)$$

Процедура определения  $R_d$  и  $l$  состоит в следующем. Функция изменения температуры во времени представляет собой уравнение прямой линии

$$\begin{aligned} \ln [T(z=0, \tau) / T_{\infty}] &= \\ &= \ln [T(z=0, \tau=0) / T_{\infty}] + p\tau \end{aligned}$$

с наклоном

$$p = -\frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{RC_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \quad (5.16)$$

и начальным значением

$$\begin{aligned} \frac{T(z=0, \tau=0)}{T_{\infty}} &= \frac{R_d}{\tau_h} \frac{(C_2 \rho_2 l_2)^2}{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2} \times \\ &\times \left[ \exp \left( \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{RC_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h \right) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Если

$$k = \exp \left( \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{RC_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2} \tau_h \right) - 1, \quad (5.18)$$

то

$$\frac{T(z=0, \tau=0)}{T_{\infty}} \frac{p}{k} = \frac{C_2 \rho_2 l_2}{C_1 \rho_1 l_1} \frac{1}{\tau_h}. \quad (5.19)$$

Два неизвестных параметра  $l_1 = l$  и  $R_d$  связаны следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{L}{1 + \frac{C_1 \rho_1}{C_2 \rho_2} \frac{p \tau_h [T(z=0, \tau=0) / T_{\infty}]}{k}}; \\ R_d &= \frac{C_1 \rho_1 l_1 + C_2 \rho_2 l_2}{p C_1 \rho_1 l_1 C_2 \rho_2 l_2}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

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  $l_1 = L/2$  [58].

Решение для однородной пластины имеет вид:

$$l = \frac{L}{1 + \frac{p \tau_h [T(z=0, \tau=0) / T_{\infty}]}{\exp \left( \frac{\tau_h}{RC \rho l (1-l/L)} \right) - 1}};$$

$$R_d = \frac{1}{p C \rho l (1-l/L)}. \quad (5.21)$$

Описанный метод был применен для оценки параметров клеевого слоя между металлами и композитами [58]. Погрешность тепловой дефектометрии составила 10–14 % по  $l$  и 10–95 % по  $R_d$ .

#### 5.4.2. 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 (3.13)

$$l = \sqrt{a \tau_m}. \quad (5.22)$$

Выражение (5.22) рекомендовано для оценки глубины залегания газонаполненных дефектов на глубинах, значительно меньших полной толщины объекта контроля.

Если длительность нагрева соизмерима, но меньше  $\tau_m$ , то реалистичные оценки можно получить по формуле

$$l = \sqrt{a (\tau_m - \tau_h)}. \quad (5.23)$$

Отметим определенную аналогию между формулами (5.22, 5.23) и обобщенными формулами инверсии (5.11).

С. Шепард с сотрудниками получили эмпирическое выражение, связывающее момент времени  $\tau_m (\Delta T_m)$ , названного *временем пикового контраста* (peak contrast time) с глубиной залегания и диаметром дисковидного дефекта  $D$ , представляющего собой выемку материала с обратной стороны изделия (дефекты такого типа часто служат в ТК в качестве эталонных) [65]

$$l = \frac{a}{\pi D \sqrt{2}} \tau_m. \quad (5.24)$$

Авторами вышеупомянутой работы введена модель "тепловой ловушки" (heat trap), согласно которой величина  $\tau_m$  представляет собой время наполнения тепловой энергией цилиндра объемом  $V = \pi D l$ , тогда выражение (5.24) может быть представлено в виде

$$V = \frac{a}{\sqrt{2}} \tau_m. \quad (5.25)$$

Таким образом, формулами (5.22) и (5.25) представлены две различные зависимости глубины залегания дефекта и момента его оптимального наблюдения на поверхности: квадратичная (для одномерных дефектов) и линейная (для дефектов конечных размеров).

Подход к обработке данных ТК с использованием эталонной точки подвергается критике, поскольку вследствие неравномерного нагрева и других факторов положение эталонной точки может существенно влиять на результаты. В последние годы распространенной процедурой обработки однопиксельных данных ТК является представление  $\ln(T) - \ln(\tau)$ , в рамках которого считается, что все бездефектные точки ведут себя как прямые линии с наклоном  $-0,5$ . Фактически в данном случае эталоном является определенное поведение температуры бездефектных областей, обусловленное предположением, что изделие является полужограниченным телом.

### 5.4.3. Определение

#### теплового сопротивления дефектов с использованием момента температуры нулевого порядка

Алгоритм предложен Д. Боше и др. при анализе импульсного нагрева пластины [66]. Моментом температуры нулевого порядка (zero-order temporal moment)

назван интеграл  $M = \int_0^{\infty} T(\tau) d\tau$ , значение которого стремится к бесконечности в

случае адиабатического процесса  $\{T(\tau \rightarrow \infty) \rightarrow T_{\infty}\}$ . 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 (так называемого времени "видности" дефекта). Аналитически получено следующее выражение для изменения момента температуры

$$\Delta M = \int_0^{\infty} [T_d(\tau) - T_{nd}(\tau)] d\tau = W R_d (1 - l/L)^2, \quad (5.26)$$

где  $W$  – поглощенная энергия. Уравнение (5.26) содержит два неизвестных параметра  $R_d$  и  $l$ . В случае, когда  $l \ll L$  (толстый образец или неглубокий дефект):

$$\Delta M = W R_d. \quad (5.27)$$

Практическое использование последнего выражения 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 (5.27) непрактичной.

## 5.5. ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ЛАПЛАСА (резистивные дефекты)

Как отмечалось выше, применение преобразования Лапласа является основным аналитическим методом решения задач нагрева многослойных изделий. При этом решения получают в громоздком, но явном виде. Тем не менее, инверсия "многослойных" решений в пространстве оригиналов в явном виде невозможна ввиду наличия либо бесконечных рядов, либо специфических функций, например, функции ошибок. А. Деджиованни с со-

трудниками предложили определять параметры резистивных дефектов в пространстве Лапласа, т.е. без обратного перехода в пространство оригиналов (см. п. 4.1.2). Поскольку соответствующие выражения в пространстве Лапласа (см. формулы (4.17)) являются алгебраическими, то они могут быть решены относительно искомых величин  $l$  и  $d(R_d)$ .

Первоначально, для идентификации дефектных параметров были использованы дифференциальные температурные сигналы, для определения которых регистрировали изменение температуры в дефектной и бездефектной зоне.

Вид дифференциальных решений (4.18) подсказывает, что практическая процедура тепловой дефектометрии должна включать применение преобразования Лапласа к экспериментальным значениям нормализованных температурных сигналов  $\Delta T/T_\infty$  (нормализацию проводят на стационарное значение температуры образца  $T_\infty$ , считая его адиабатическим). Имея дело с двумя неизвестными параметрами дефектов, необходимо либо использовать решения для двух поверхностей изделия, либо ограничиться решениями для одной из поверхностей, но для двух моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , 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 зависимости уравнений. Авторы описываемого подхода установили, что уравнения  $\Delta\theta^F(p_1)$  и  $\Delta\theta^F(p_2)$  не являются абсолютно независимыми, что не мешает использовать их в процедуре дефектометрии при соблюдении ряда условий.

Ниже будет также описана процедура тепловой дефектометрии, основанная преимущественно на анализе не дифференциальных, а базовых температурных функций  $\theta^F(p)$  и  $\theta^R(p)$ .

### 5.5.1. Анализ дифференциальной 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 глубин дефекта; этот вывод также следует из приведенной в Главе 4 зависимости  $\Delta T^R(l)$ . Аналитически переменную  $x^*$  можно исключить для особого случая  $p_2^* = 4 p_1^*$ , используя свойства гиперболических функций, что позволяет получить выражение для определения теплового сопротивления дефекта:

$$\frac{R_d}{L/\lambda} = \frac{M_1^2 [1 + \alpha_2 \operatorname{sh}(\alpha_2) M_2]}{[1 + M_1 \alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_1)]} \times \frac{\operatorname{sh}(\alpha_1) \operatorname{th}(\alpha_1)}{[-M_1 + M_2 \operatorname{ch}(\alpha_1)] - 1,5 M_1 M_2 \alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_2)}, \quad (5.28)$$

где  $M_{1,2}$  – лапласовский образ 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 сделанный ранее вывод о том, что двухсторонняя процедура ТК позволяет оценивать тепловое сопротивление (толщину) дефекта, но не его глубину залегания. Например, в двухсторонних процедурах ТК невозможно осуществить динамическую тепловую томографию, основанную на запаздывании сигналов  $\Delta T$  во времени.

### 5.5.2. Анализ дифференциальной температурной функции на передней поверхности

Анализ формул (4.18) показывает, что односторонняя процедура ТК весьма чувствительна к глубине залегания дефек-

тов 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  $l$

$$\alpha_1 \operatorname{sh}(\alpha_2) \operatorname{sh}(u_1) [4 \operatorname{ch}(u_1) \operatorname{ch}(\alpha_1 - u_1) - \operatorname{ch}(\alpha_1)] + 2 \operatorname{sh}(\alpha_1 - u_1) \left[ \frac{1}{M_1} \operatorname{ch}^2(\alpha_1) - \frac{1}{M_2} \operatorname{ch}^2(\alpha_1 - u_1) \right] = 0, \quad (5.29)$$

где  $u_1 = \alpha_1 l / L$ . Для малых значений  $R_d$  последнее уравнение может быть записано в явном виде

$$l / L = 1 - \frac{1}{\alpha_1} \ln \left\{ \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^{1/2} \operatorname{ch}(\alpha_1) + \left[ \frac{M_2}{M_1} \operatorname{ch}^2(\alpha_1) - 1 \right]^{1/2} \right\}. \quad (5.30)$$

### 5.5.3. Покрытие на подложке: двухсторонняя процедура ТК

Примем ТФХ покрытия равными  $l_1, C_1, \rho_1, \lambda_1$ , подложки –  $l_2, C_2, \rho_2, \lambda_2$ . В одномерном приближении температурный сигнал  $\Delta T^*$  между областью с покрытием ( $d$ ) и без него ( $nd$ ), нормированный на температуру в конце адиабатического процесса, определяют по выражению:

$$\Delta T^* = T_d \left/ \frac{W}{C_1 \rho_1 \lambda_1 + C_2 \rho_2 \lambda_2} \right. - T_{nd} \left/ \frac{W}{C_2 \rho_2 \lambda_2} \right. \quad (5.31)$$

Задачу идентификации решают, используя выражение для температуры на задней поверхности пластины. Лапласовский образ  $\Delta \theta^R$  функции  $\Delta T^R$  (звездочка, обозначающая безразмерность температурного сигнала, опущена) имеет вид [26]:

$$\Delta \theta^R = \frac{l_2^2}{a_2} \Delta \theta^{R*};$$

$$\Delta \theta^{R*} = \frac{1}{s} \times \left[ \frac{1 + k_1 k_2}{k_2 \operatorname{sh}(k_1 s) \operatorname{ch}(s) + \operatorname{sh}(s) \operatorname{ch}(k_1 s)} - \frac{1}{\operatorname{sh}(s)} \right],$$

где  $s = \sqrt{p^*}$ ;  $p^* = l_2^2 p / a_2$ ;  $k_1 = \frac{l_1}{l_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$ ;

$$k_2 = \sqrt{\frac{C_1 \rho_1 \lambda_1}{C_2 \rho_2 \lambda_2}}.$$

Фактически мы имеем дело с двухпараметрической обратной задачей  $\Delta T^R(\tau, k_1, k_2)$ , 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.

Анализ коэффициентов чувствительности, выполненный в [47], показал их сильную зависимость, поэтому оценить параметры  $k_1$  и  $k_2$  из эксперимента невозможно. Тем не менее, авторы предложили использовать ряд других искусственных коэффициентов, например,  $k_2$  и  $k_3 = k_1 k_2$ , которые оказались независимыми и, следовательно, могут быть определены в результате решения обратной задачи.

## 5.6. ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛА НЕВЯЗКИ (метод нелинейной подгонки)

### 5.6.1. Использование классических решений

Как отмечалось выше, 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 эксперимен-



та, а вторая следует из теоретической модели, зависящей от подлежащих определению параметров  $q_j$  ( $j=1..M$ ). Используя итеративный процесс приближения к глобальному минимуму в  $M$ -мерном пространстве параметров  $q_j$ , можно оценить их значения. Для некоторых параметров ТК, например, для толщины дефектов, глобальный минимум соответствующего функционала является достаточно "плоским", поэтому точность их определения может быть низкой. Очевидно, что метод нелинейной подгонки требует использования разумного нулевого приближения, является времяземким 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 ТФХ материалов, параметры процесса теплообмена, а также параметры скрытых дефектов. Э. Гринцато и С. Маринетти применили метод нелинейной подгонки для анализа процесса нагрева пластины известной толщины и теплопроводности [67]. В качестве теоретической модели были использованы решения задачи нагрева неадиабатической пластины и полу-

ограниченного неадиабатического тела прямоугольным тепловым импульсом. Для итеративной минимизации среднеквадратических отклонений применен метод *Левенберга-Маркворда* (Levenberg-Marquardt), который хорошо зарекомендовал себя на практике и является стандартным приемом перемещения в пространстве признаков.

Искомым параметром при анализе двухсторонней процедуры ТК пластины из углепластикового композита был коэффициент температуропроводности, значение которого сравнивали с коэффициентом, полученным по методу Паркера. Был сделан вывод о том, что точность определения  $a$  с помощью нелинейной подгонки выше, главным образом, благодаря учету поверхностного теплообмена.

Была также продемонстрирована возможность оценки  $a$  в односторонней процедуре ТК, хотя сходимость итеративного процесса в этом случае требовала более длительного времени расчета.

В качестве иллюстрации на рис. 5.3 показано пространство двух параметров, по которым производили нелинейную подгонку: коэффициента температуропроводности  $a$  и теплообмена  $\alpha$ . Очевидно, что наиболее устойчивым и точным является анализ температуры на задней поверхности: итеративный процесс, начатый

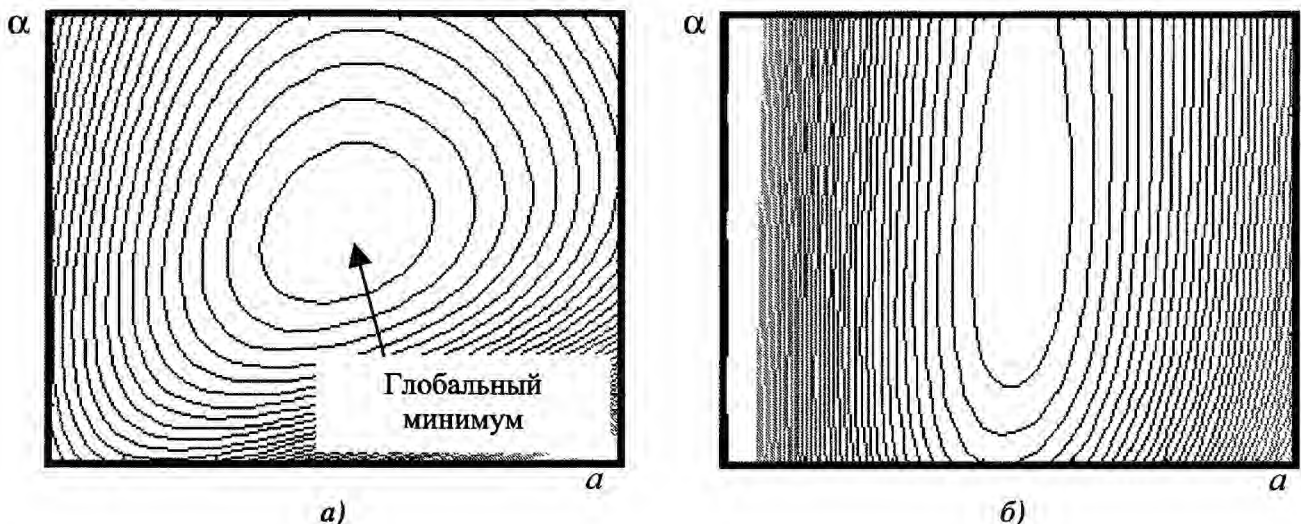


Рис. 5.3. Иллюстрация к методу нелинейной фильтрации с использованием классического решения задачи нагрева неадиабатической пластины на задней (а) и передней (б) поверхности

с любой пары начальных значений  $\{a, \alpha\}$  приводит к глобальному минимуму, который отчетливо виден на графике в виде "впадины" (рис. 5.3, а). На передней поверхности, в силу того, что минимум имеет форму "каньона", возможен пропуск корректного значения  $a$  при перемещении в вертикальном направлении вдоль значений  $\alpha$  (рис. 5.3, б).

Используя решение для полуограниченного тела, в односторонней процедуре одновременно определяли тепловую инерцию  $e$  и отношение поглощенной плотности мощности нагрева к коэффициенту теплоотдачи  $Q/\alpha$ .

Алгоритм нелинейной подгонки оказался более устойчивым к высокочастотным шумам, чем полиномиальная аппроксимация и сглаживание данных с помощью стандартных фильтров.

У. Уинфри и Дж. Заламеда [68] использовали описанный выше метод анализа в пространстве Лапласа в комбинации с процедурой, получившей название *техники ортогональной декомпозиции*, или *метода главных компонент*. Сам метод будет подробно описан в Главе 6. В плане дефектометрии его сущность заключается в том, что в пространстве Лапласа анализируются не дифференциальные решения, а непосредственно выражения (4.17) для температуры на передней или задней поверхности пластины, в которой имеется резистивный дефектный слой. Идентификации подлежит глубина залегания дефекта и его тепловое сопротивление. Поскольку в выражениях (4.17) глубина залегания дефекта  $l_1$  встречается только в комбинации с температуропроводностью  $a$ , невозможно оценить  $l_1$  без независимого измерения  $a$ . Предложено определять относительную глубину дефекта, для чего оператор должен знать бездефектные зоны (таким путем решается проблема выбора эталона). Принимая относительную глубину залегания дефектов равной  $r$ , так что  $l_1 = rL$  и

$l_2 = (1-r)L$ , выражения (4.17) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta^F(p) &= \frac{W\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{p}} \frac{2\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) + \sqrt{\frac{p}{a^*}} \times}{2\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) + \sqrt{\frac{p}{a^*}} \times} \rightarrow \\ &\times R_d^* \left[ \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) - \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}} - 2\sqrt{\frac{p}{a^*}} r\right) \right] \\ &\rightarrow \frac{\times R_d^* \left[ \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) - \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}} - 2\sqrt{\frac{p}{a^*}} r\right) \right]}{2}, \\ \theta^R(p) &= \frac{W\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{p}} \frac{2}{2\operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) + \sqrt{\frac{p}{a^*}} \times} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times R_d^* \left[ \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}}\right) - \operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{p}{a^*}} - 2\sqrt{\frac{p}{a^*}} r\right) \right]}{2}, \end{aligned} \quad (5.33)$$

где  $a^* = a/L^2$  и  $R_d^* = R_d\lambda/L$ . Применение стандартной процедуры нелинейной подгонки теоретического решения под экспериментальные данные путем минимизации соответствующих среднеквадратических отклонений требует значительных вычислительных усилий, поскольку необходимо совершать переход из области Лапласа в область оригиналов для каждой оцениваемой пары  $r$  и  $R_d^*$ . Сущность использованной техники ортогональной декомпозиции состоит в создании собственных векторов (eigenvector) из 10 тысяч значений температурных сигналов, рассчитанных для различных значений  $r$  и  $R_d^*$  [68]. Минимальное значение  $l_1$  принималось равным толщине одного слоя композита, а минимальная толщина дефекта  $d$  составляла одну пятую этой величины, причем экспериментальные данные были получены для композитов, состоящих из 10 и 20 слоев. Принцип нелиней-

ной подгонки применялся при интерполяции расчетных данных с использованием собственных векторов. В данной работе подчеркнуто, что удовлетворительные результаты дефектометрии получены при использовании трех механических затворов (shutter), которые устанавливались перед двумя импульсными лампами и тепловизором, обеспечивая требуемые характеристики протокола контроля.

Метод нелинейной подгонки был применен Ф. Делпешем и др. при дефектометрии тонких теплопроводных изделий, нагреваемых прямоугольным импульсом [40]. Используются два метода идентификации согласно упрощенному решению (5.10), в котором коэффициенты  $\beta_3$  и  $\beta_4$  связаны соответственно с глубиной залегания дефекта  $l_1$  и его тепловым сопротивлением  $R_d$ .

Метод Левенберга-Маркворда, в принципе пригодный для оценки всех четырех коэффициентов  $\beta$ , 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 такой модели при дефектометрии двух стальных пластин толщиной 1 мм, разделенных воздушным зазором толщиной 34 мкм, составила 5 % [40].

Более сложную одномерную модель двухслойной пластины с резистивным дефектом использовали Ж. Крапе и П. Съело [69]. Они моделировали равномерный нагрев пластины тепловым потоком, который проникал на определенную глубину согласно закону Ламберта-Бера. Аналитическое решение задачи  $T_i(q_j, \tau_i)$  было получено с помощью функций Грина в весьма громоздком виде, тем не менее, инверсия данных занимала всего 20 с машинного времени. Впоследствии данный подход был реализован на двухмерной модели [32].

### 5.6.2. Использование многомерных численных решений

В 1988 г. Д.В. Куш с соавторами применили метод нелинейной подгонки для анализа двухмерных температурных функций, образованных в результате строчного сканирования изделия. Примечательно, что процесс решения потребовал до 56 итераций и 168 минут процессорного времени на компьютере ЕС-1055, который в то время считался одним из лучших в СССР [70]. Погрешность определения параметров дефектов была на уровне 20 %. С целью сократить вычисления, авторы проанализировали связь температурных сигналов с параметрами ожидаемых дефектов в конкретном материале, благодаря чему удалось сократить время вычислений до 3...5 мин.

Ж. Крапе с соавторами использовали двухмерную цилиндрическую модель, подобную той, которая описана в п. 4.3 [32]. Входными экспериментальными параметрами были:

- максимальный текущий контраст  $C_m^{run}$ ;
  - 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. 4.8.4).
- Выходными (определяемыми) параметрами были:
- нормализованная глубина залегания дефекта;
  - нормализованное тепловое сопротивление дефекта;
  - поперечный размер дефекта;
  - коэффициент теплообмена.

Метод наименьших квадратов был применен в комбинации с алгоритмом Левенберга-Маркворда, который был использован ранее для решения одномерной обратной задачи ТК [69]. Погрешность определения глубины залегания и поперечных размеров дефектов составила 10 %.

Будучи примером вполне строгой реализации принципов решения многопараметрических обратных задач, описываемый подход может найти возрастающее применение, в особенности, благодаря лавинообразному увеличению мощности компьютеров.

## 5.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ

### 5.7.1. 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 (заметим, что в ТК речь, как правило, идет о дефектах значительной поперечной протяженности). В большинстве практических случаев, ошибка простой визуальной оценки поперечных размеров дефектов не превышает 15...20 %. Размещая на поверхности объекта контроля маркер известных размеров, хорошо видимый в ИК диапазоне, например, полосу алюминиевой фольги, процесс определения  $h_x, h_y$  можно автоматизировать. Однако при автоматизации этого процесса необходимо установить температурный порог принятия решения  $\Delta T_{thr}$ , амплитуда которого, как мы увидим ниже, существенно влияет на оценку  $h_x, h_y$ .

Другая процедура идентификации  $h_x, h_y$ , названная в англоязычной литературе Full Width Half Maximum – FWHM ("полная ширина на половине высоты"), предусматривает определение геометри-

ческих размеров дефекта по проекции точек, соответствующих половине максимального температурного перепада  $\Delta T_m / 2$  [71].

Наконец, 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 [72] (см. также п. 4.8.4).

Все три описанных подхода проиллюстрированы на примере расчетного профиля рис. 5.4, полученного для дефекта радиусом  $r_d = 1$  мм на глубине 0,5 мм в изделии из алюминия. Оценки радиуса дефекта, полученные различными способами для алюминия и углепластика, приведены в табл. 5.1. 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 (ниже мы увидим, что этот способ неприменим в случае зашумленных сигналов). Достаточная для практики точность обеспечивается оценкой по  $\Delta T_m / 2$ . Для алюминия точные оценки имеют место при малых временах наблюдения, в то время как при больших временах происходит существенное расплывание температурного отпечатка. Для углепластика отмечена как возможная переоценка, так и недооценка  $r_d$ ; последний эффект назван Д. Альмондом и др. "сжатием" (shrinkage) дефекта [71]. Отметим, что предлагаемый авторами прием интерполяции оценки  $r_d(\tau)$  до момента  $\tau = 0$  не приводит к повышению точности дефектометрии в случае углепластика (см. табл. 5.1). Наконец, оценка  $r_d$  по размерам зоны, занимаемой сигналом  $\Delta T(r) > \Delta T_{thr} = 0,01$  °С, приводит к существенным разбросам оценок в зависимости от времени наблюдения.

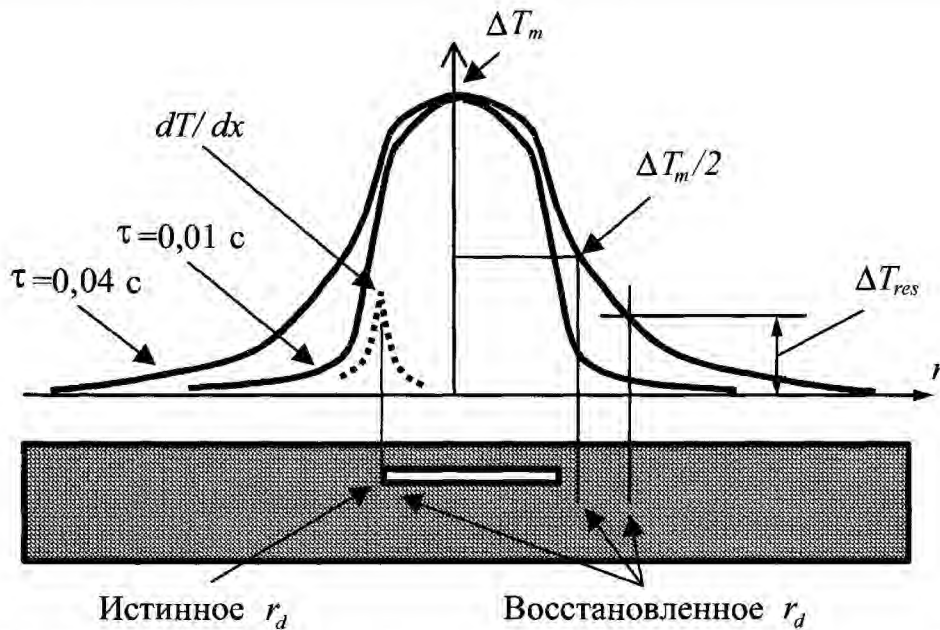


Рис. 5.4. Нормализованные профили температуры над воздушным дефектом в алюминиевой пластине

( $L = 2$  мм,  $l = 0,5$  мм,  $r_d = 1$  мм,  $d = 0,2$  мм,  $Q = 10^6$  Вт·м<sup>-2</sup>,  $\tau_h = 0,01$  с)

### 5.1. Реконструкция поперечных размеров дисковидного дефекта

Время наблюдения, с	Истинный радиус дефекта, мм	Реконструированный радиус дефекта, мм		
		по критерию $(\partial T/\partial r)_{extr}$	по критерию $\Delta T_m/2$	по критерию $\Delta T_{thr} = 0,01$ °С
<i>Алюминий: <math>L = 2</math> мм; <math>l = 0,5</math> мм; <math>d = 0,2</math> мм; <math>Q = 10^6</math> Вт·м<sup>-2</sup>; <math>\tau_h = 0,01</math> с</i>				
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>Углеродистик: <math>L = 5</math> мм; <math>l = 1,5</math> мм; <math>d = 0,5</math> мм; <math>Q = 10^6</math> Вт·м<sup>-2</sup>; <math>\tau_h = 0,01</math> с</i>				
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.

**Примеры.** На рис. 5.5 приведены результаты ТК стандартного образца из углеродистика толщиной 2 мм, содержащего 25 фторопластовых вставок размером  $3 \times 3 \dots 15 \times 15$  мм на глубинах от 0,2 до 1 мм (экспериментальные данные предоставлены В. Свицерским). В оптимальном исходном изображении операторы обнаруживали 18 дефектов из 25 (рис. 5.5, а). Размер каждого дефекта определяли непосредственно по изображению путем указания граничных

пикселей и сравнения с линейным эталоном (программа Thermo-Fit Pro, "Инновация"). Затем для всех обнаруженных дефектов определяли отклонение от истинных поперечных размеров. Средняя ошибка такой простой оценки составила всего 4,6%. В результате обработки экспериментальной последовательности по методу главных компонент число обнаруженных дефектов возросло до 22 (рис. 5.5, б) при средней ошибке измерения поперечных размеров 4,2%.

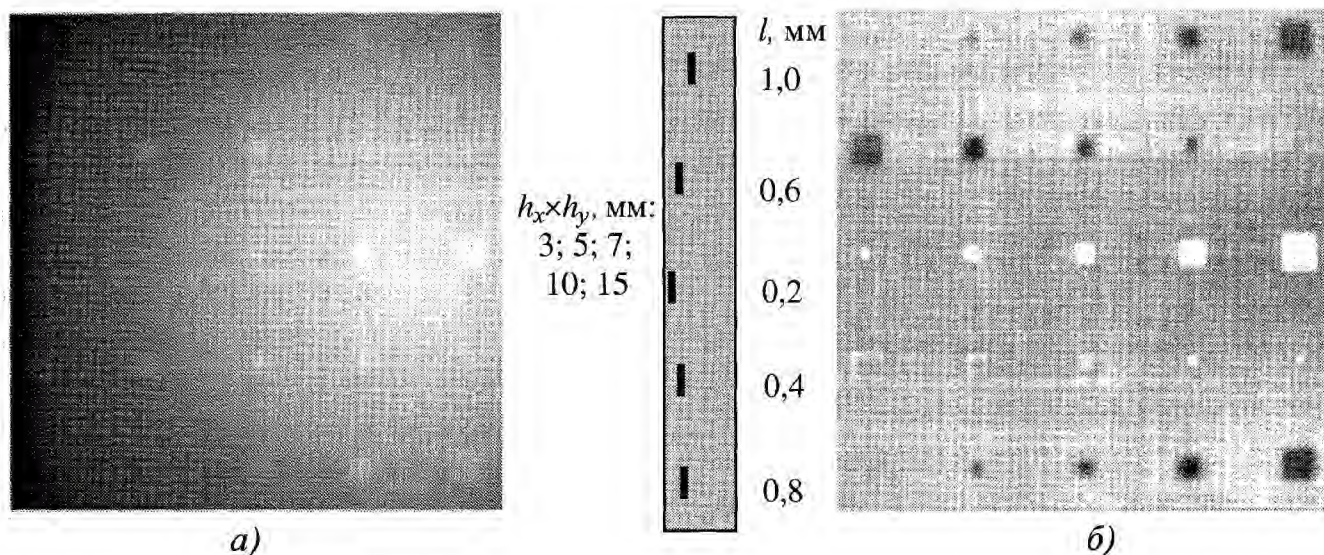


Рис. 5.5. Односторонний ТК стандартного образца из углепластика толщиной 2 мм (дефекты симулированы 25-ю фторопластовыми вставками):

*a* – оптимальная исходная термограмма; *б* – изображение 2-й главной компоненты

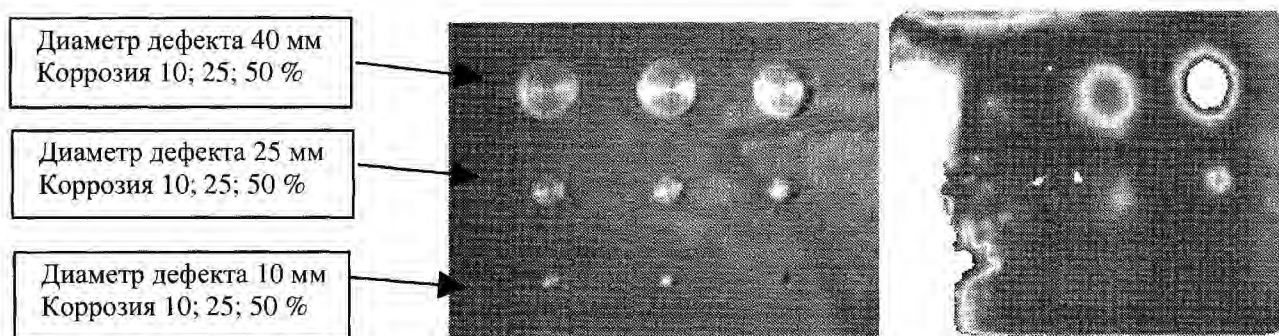


Рис. 5.6. Оценивая коррозию в стали AISI 1010 толщиной 10 мм

Поскольку высокую точность оценок в данном примере можно объяснить тем, что обнаруживались неглубокие дефекты в низкотеплопроводном материале, следующий эксперимент был проведен на образце из стали AISI 1010 толщиной 10 мм, в котором симулировали коррозию задней поверхности. В данном случае только 4 из 9 дефектов были уверенно идентифицированы в фазограмме (рис. 5.6). Соответственно, средняя ошибка определения размеров дефектов диаметром 20 и 40 мм (коррозия 25 и 50 %) составила 7,3 %, что хуже, чем в предыдущем примере, но более чем удовлетворительно для практики.

Наконец, наиболее трудный для анализа случай анализа скрытых дефектов был связан с ТК образца иконы, выполненного по средневековой технологии на деревянной доске толщиной 20 мм (обра-

зец предоставлен Э. Гринцато, Италия). Образец представлял собой многослойную конструкцию, включающую слой лака и клея на гипсовой основе, а также холст и подложку из дерева. Более подробно ТК такого изделия будет рассмотрен в Главе 11. В данном контексте ограничимся рассмотрением дефекта в виде полоски из фторопласта размером 27×4 мм, размещенной на глубине около 1 мм. ИК термограмма в оптимальный момент наблюдения показана на рис. 5.7, *a* (см. цветную вкладку). Масштаб термограммы равен 0,84 мм/пиксель. Горизонтальный профиль температуры через данный дефект показан на рис. 5.7, *б*, а его производная на рис. 5.7, *в*. Поскольку исходная термограмма весьма зашумлена, что характерно для неоднородных фонов, возникающих при контроле предметов искусства, оцен-

ка размеров дефекта непосредственно по термограмме затруднена. Протяженность дефекта по критерию  $\Delta T_m/2$  составила 45 пикселей, или 37,8 мм. Применение критерия  $(\partial T/\partial r)_{extr}$  невозможно, поскольку операция производной приводит к усилению шумов (рис. 5.7, в).

На рис. 5.7, г показана таймограмма изделия, полученная с помощью алгоритма тепловой томографии (см. п. 6.3). Известно, что распределение характеристических времен теплопередачи имеет значительно бóльшую крутизну на краях дефектов по сравнению с обычной термограммой. Этот эффект отчетливо виден на рис. 5.7, г, где определение размеров дефекта возможно простым подсчетом пикселей, занимаемых изображением дефекта:  $45 \times 8$  пикселей. Таким образом, оценка размера дефекта по таймограмме составляет  $37,8 \times 6,7$  мм, т.е. совпадает с оценкой по  $\Delta T_m/2$ .

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 весьма высокой.

### 5.7.2. 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 и др. для импульсных процедур ТК [73] и Г. Вальтером и др. для процедур с использованием тепловых волн [74, 75]. Данный подход заимствован из астрономии и оптики и предполагает независимость оценок от времени и параметров дефектов.

Пусть форма внутреннего дефекта в направлении, параллельном контроли-

руемой поверхности, описывается функцией  $F(x, y, l)$ . Поверхностный температурный отклик от точечного дефекта, расположенного на той же глубине  $l$ , при нагреве импульсом Дирака, назовем функцией точечного источника (ФТИ)  $G(x, y, l, \tau)$ , которая является аналогом функции Грина, широко используемой для решения дифференциальных уравнений. 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 следующих функций:

$$\Delta T(x, y, l, \tau) = W(x, y, \tau) ** F(x, y, l) ** \times G(x, y, l, \tau), \quad (5.34)$$

где  $W(x, y, \tau)$  – функция источника нагрева.

Если определить ФТИ для конкретного типа нагрева, последнее уравнение приобретает более простой вид

$$\Delta T(x, y, l, \tau) = F(x, y, l) ** G(x, y, l, \tau). \quad (5.35)$$

Свертку в пространстве оригиналов можно заменить произведением в пространстве Фурье

$$\Theta(u, \zeta, \tau, l) = \Phi(u, \zeta, l) \Gamma(u, \zeta, \tau, l). \quad (5.36)$$

Здесь функции-оригиналы заменены соответствующими образами Фурье. Функция формы дефекта может быть определена обратным преобразованием Фурье, примененным к отношению  $\Theta(u, \zeta, \tau, l) / \Gamma(u, \zeta, \tau, l)$

$$F(x, y, l) = \text{Fourier}^{-1}[\Theta(u, \zeta, \tau, l) / \Gamma(u, \zeta, \tau, l)]. \quad (5.37)$$

При практическом применении уравнения (5.37) возникают следующие проблемы:

- ФТИ должна быть определена "наилучшим" образом для конкретных

дефектов (например, неясно как  $G$  должна учитывать толщину дефектов);

- отношение двух Фурье-образов в выражении (5.37) является функцией времени, однако функция  $F$  не должна зависеть от времени;

- деление на значения  $\Gamma$ , близкие нулю, должно вызвать появление значительного шума в спектре Фурье функции  $F$ ;

- любые шумы в исходных изображениях имеют тенденцию к усилению при использовании вышеописанных преобразований.

ФТИ можно определить 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 [73]

$$G(x, y, \tau, l) = -\frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\pi a \tau}} \frac{\partial}{\partial l} \times \exp \left\{ -\frac{\left[ \sqrt{x^2 + y^2 + l^2} + l \right]^2}{4a\tau} \right\} \times \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + l^2}}, \quad (5.38)$$

где  $C$  – постоянный коэффициент (производная по  $l$  не выполнена для компактности представления). Авторы метода полагают, что формула (5.38) удовлетворительно описывает распространение и рассеяние импульсных тепловых волн. Тем не менее, проблема выбора оптимального момента времени для выполнения операции (5.37) остается нерешенной (авторы предлагают выбирать  $\tau$  эмпирически).

Для случая точечного гармонического нагрева (фототермический метод ТК), Г. Вальтер и др. предложили выражение для ФТИ, записанное в цилиндрических координатах [74, 75]:

$$G(r, \tau, l) = \frac{\pi \sigma^2}{2\sqrt{r^2 + l^2}} \exp \left[ -\sigma \left( l + \sqrt{r^2 + l^2} \right) \right] \times \left[ B + \frac{Al}{\sqrt{r^2 + l^2}} \left( 1 + \frac{1}{\sigma \sqrt{r^2 + l^2}} \right) \right], \quad (5.39)$$

где  $A = \Delta \lambda / \lambda$  и  $B = \Delta(C\rho)/(C\rho)$  названы параметрами "тепловой мощности" (thermal strength) точечной неоднородности;  $\sigma^2 = 2i/\mu$  – волновое число;  $\mu$  – длина тепловой диффузии;  $r, l$  – расстояния между дефектной точкой и точкой нагрева соответственно по горизонтали и вертикали. По структуре выражения (5.38) и (5.39) подобны, однако в формуле (5.39) отсутствует время в силу квазистационарного характера испытаний.

В заключение, заметим, что как отыскание ФТИ, так и всю процедуру инверсии согласно выражению (5.37), целесообразно проводить в численном виде. Описанный метод позволяет получить более резкие изображения размытых дефектных отпечатков, однако при этом возрастает высокочастотный шум; фильтрацию шума можно выполнить в пространстве Фурье.

### 5.7.3. Лапласиан и восстановление размытых границ

Определение контуров внутренних дефектов, будь то простое дифференцирование (п. 5.7.1) или использование ФТИ (п. 5.7.2) может быть объяснено с позиций обработки изображений лапласовским фильтром, обладающим свойством "обострения" (sharpening) границ областей, которые размываются вследствие процессов диффузии (см. монографию А. Розенфельда и А. Кака [76]).

Лапласиан является линейным дифференцирующим оператором

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (5.40)$$



который инвариантен относительно вращения, поэтому, в отличие от дифференцирующих фильтров первого порядка, применение лапласиана инвариантно в отношении направления прохождения границ  $\Delta T(x, y)$ .

Продемонстрируем связь лапласиана и процесса диффузии, описываемого уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T. \quad (5.41)$$

Будем полагать, что температурное распределение в нулевой момент времени  $T(x, y, \tau = 0)$  отображает форму скрытого дефекта (в Главе 4 показано, что воспроизведение формы дефектов улучшается при малых 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  $\tau^*$ , имеем:

$$T(x, y, 0) = T(x, y, \tau) - \tau^* \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\tau^{*2}}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial \tau^2} - \dots \quad (5.42)$$

Игнорируя члены ряда второго порядка и выше, получим

$$T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau = 0) - a \tau^* \nabla^2 T.$$

В цифровой форме следует выполнить фильтрацию следующего вида

$$T(i, j) - \nabla^2 T(i, j) = 5T(i, j) - [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)]. \quad (5.43)$$

#### 5.7.4. Использование решения трехмерной адиабатической задачи ТК

Метод "*теплого четырехполюсника*", предложенный А. Деджиованни для решения одномерных задач теории теплопроводности, был распространен на случай трехмерных задач [51]. Это позволило ввести в рассмотрение, помимо глубины

залегания  $l$  и теплового сопротивления  $R_d$  дефектов, также их поперечные размеры  $b \times c$ . Принципы решения прямой задачи ТК с использованием преобразования Лапласа и Фурье описаны в п. 4.5. В плане дефектометрии наиболее простые алгебраические выражения получают для дефектов с малым  $R_d$ . Для определения размеров дефекта необходимо использовать результаты как одно-, 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*, упоминавшийся в п. 4.1.3. Затем вводят концепцию *пространственно-усредненного контраста Лапласа*, который определяют по экспериментальным данным. Как показано в [51], 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.

### 5.8. ОБОБЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ИНВЕРСИИ ПРИ КОНТРОЛЕ СКРЫТОЙ КОРРОЗИИ

При рассмотрении ТК скрытой коррозии в п. 3.7.3 был введен коэффициент, учитывающий трехмерную диффузию тепла для определенного момента времени ( $Fo = 0,68$ ). В.П. Вавилов и С. Маринетти разработали обобщенный подход к оценке коррозии в металлических изделиях толщиной более 3...5 мм.

Приближенная оценка оптимального времени наблюдения коррозии получена как функция безразмерного времени нагрева  $Fo_h$ , ожидаемой степени коррозии  $\Delta L/L$  и характерного размера дефектных зон  $D/L$ :

$$Fo_m = 0,540303 Fo_h^{0,284477} (\Delta L / L)^{-0,205735} \times (D / L)^{0,463687} \quad (5.44)$$

Данная формула справедлива для дефектов круглой или квадратной формы при нагреве прямоугольным импульсом любой длительности и обеспечивает погрешность оценки  $Fo_m$  около 15 %. Важным моментом описываемого подхода является то, что нагрев не должен длиться дольше времени наступления максимального текущего контраста температуры, то есть  $Fo_h \leq Fo_m$ . Из формулы (5.44) следует, что существуют комбинации  $\Delta L / L$  и  $D / L$ , которые обеспечивают  $Fo_m = Fo_h$ :

$$Fo_m = Fo_h = 0,422999 (\Delta L / L)^{0,287531} \times (D / L)^{0,64804} \quad (5.45)$$

Следует заметить, что максимальные температурные контрасты создаются короткими импульсами нагрева, однако продолжительный нагрев может потребоваться, если необходимо увеличить дифференциальные температурные сигналы за счет более сильного прогрева изделия.

Оценку степени коррозии производят по следующим формулам:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left[ 1 - \frac{T_{nd}^{ap}(\tau_m)}{T_d^{ap}(\tau_m)} \right] / k(D / L, \tau); \quad (5.46)$$

в случае кратковременного нагрева –

$$k(D / L, \tau) = 0,114792 Fo_m^{-0,94743} \times (D_{max}^{ap} / L)^{0,166544} (D_{min}^{ap} / L)^{0,898941} \times (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})_{min}^{-0,034607}; \quad (5.47)$$

в случае продолжительного нагрева –

$$k(D / L, \tau) = 0,161392 Fo_h^{-0,319918} Fo_m^{-0,371239} \times (D_{max}^{ap} / L)^{0,262664} (D_{min}^{ap} / L)^{0,842875} \times (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})_{min}^{-0,316916}, \quad (5.48)$$

где индекс "ap" обозначает "кажущиеся" (apparent) значения,  $D_{max}^{ap}$ ,  $D_{min}^{ap}$  соответствуют видимым максимальным и минимальным размерам дефектных зон,  $Fo_h = Fo_m$ , если оптимальное время наблюдения коррозии имеет место в ходе нагрева, в противном случае  $Fo_h < Fo_m$ . Погрешность оценок по формулам (5.46 – 5.48) составляет 2...25 %.

Для квадратных дефектов ( $D_x = D_y$ ):

в случае кратковременного нагрева –

$$k(D / L, \tau) = 0,114792 Fo_m^{-0,94743} \times (D^{ap} / L)^{0,065485} (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})^{-0,034607}; \quad (5.49)$$

в случае продолжительного нагрева –

$$k(D / L, \tau) = 0,161392 Fo_h^{-0,319918} Fo_m^{-0,371239} \times (D^{ap} / L)^{1,10554} (T_{nd}^{ap} / T_d^{ap})_{min}^{-0,316916}. \quad (5.50)$$

Алгоритм применения формул инверсии – следующий. Вначале по формуле (5.44) определяют оптимальное время ТК, после чего проводят эксперимент и регистрируют последовательность термограмм. Затем оператор или автоматическое устройство идентифицирует участки коррозии и для каждого участка определяет минимум функции  $T_{nd}^{ap} / T_d^{ap}$  и оценивает максимальный и минимальный размер участка. Степень коррозии определяют, подставляя экспериментальные значения в формулы (5.46 – 5.48).

Вышеприведенные аналитические выражения позволяют оценить предельные возможности ТК коррозии, которые ограничены текущим контрастом шума  $C_n$  на поверхности объекта контроля. Подставляя выражение (5.44) в формулы

$$(5.47-5.48) \text{ и используя } r = \left\{ \frac{T_{nd}}{T_d} \right\}_{min} =$$

$$= \frac{1}{1 + C_n}, \text{ получим следующие выражения}$$

для  $\{\Delta L / L\}_{min}$ :

в случае кратковременного нагрева –

$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 3,75623 Fo_h^{0,225557} (D/L)^{-0,52403} \times \\ \times r^{0,0289617} (1-r)^{0,836876}; \quad (5.51)$$

в случае продолжительного нагрева –

$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 4,40248 Fo_h^{0,395323} (D/L)^{-0,867169} \times \\ \times r^{0,294428} (1-r)^{0,929043}. \quad (5.52)$$

В предельном случае  $Fo_m = Fo_h$

$$\{\Delta L/L\}_{\min} = 3,62736 (D/L)^{-0,689343} \times \\ \times r^{0,332188} (1-r)^{1,04819}. \quad (5.53)$$

Формулы инверсии (5.46 – 5.48) были проверены экспериментально при контроле пластины из стали толщиной 10 мм, содержащей два участка 50 %-й коррозии

диаметром 20 и 40 мм (рис. 5.8). Длительность нагрева составила 20 с, однако максимальные контрасты в  $C_m = 0,66$  (Д1) и  $C_m = 0,36$  (Д2) наблюдались соответственно при 11 и 6 с (см. термограммы на рис. 5.8). Температуропроводность стали ( $a = 13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) была определена по методу Паркера. Видимые размеры дефектов составили 43 мм ( $D/L = 4,3$ ) и 21 мм ( $D/L = 2,1$ ). Подстановка экспериментальных значений в формулу (5.48) при условии  $Fo_m = Fo_h$  привела к оценке  $\Delta L/L$  на уровне 53 и 55 % по сравнению с истинным значением 50 %. Заметим, что "одномерная" оценка коррозии по формуле (3.11) приводит соответственно к заниженным значениям 40 и 26 % вследствие существенной трехмерной диффузии тепла.

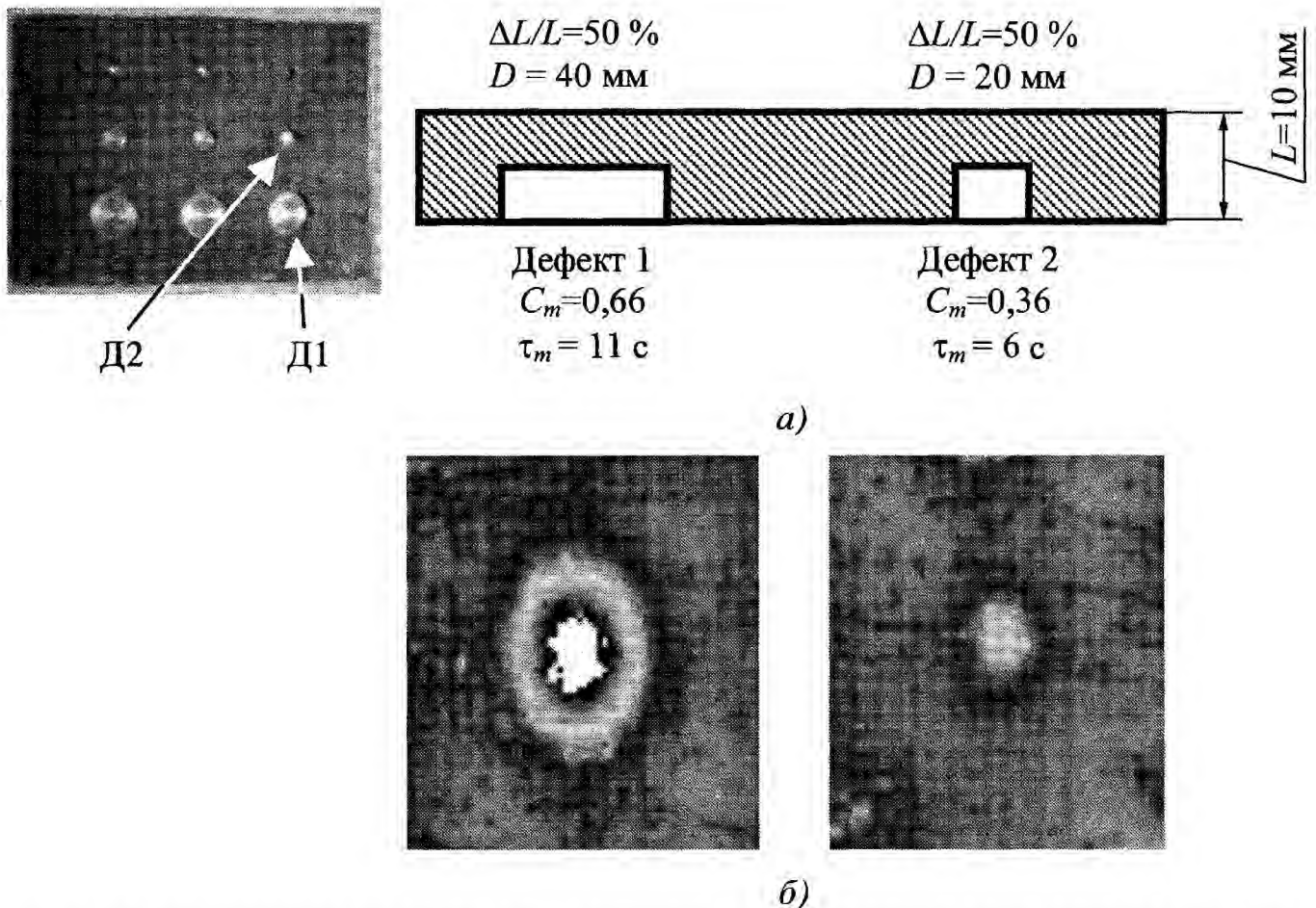


Рис. 5.8. ТК коррозии стали AISI 1010 толщиной 10 мм (длительность нагрева до 20 с): а – схема дефектов; б – оценивая размеры дефектов Д1 и Д2

## Глава 6

# ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТЕПЛОМ КОНТРОЛЕ

Алгоритмы обработки информации в активном ТК связаны с анализом изменения температуры в бездефектной и дефектной областях (рис. 6.1), для чего необходимо обрабатывать пиксельные функции  $T(i, j, \tau)$  в последовательностях ИК термограмм. Стандартный под-

ход состоит в выборе *временных интервалов* (time gate), в которых регистрируют дифференциальный сигнал  $\Delta T(\tau)$ , причем положение выбранного интервала зачастую определяет способ ТК (некоторые способы ТК представлены на рис. 6.1).

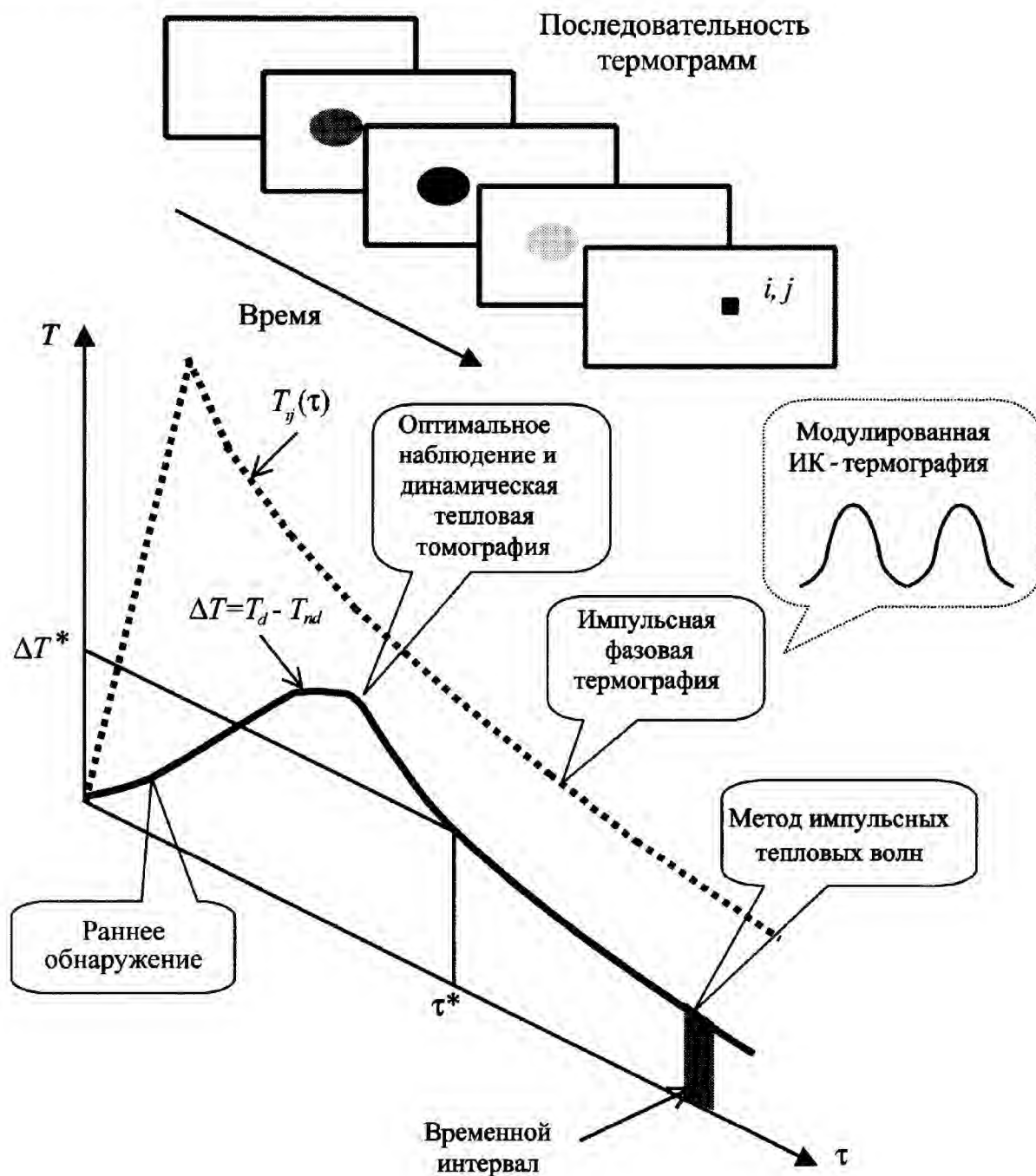


Рис. 6.1. Способы ТК

## 6.1. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В импульсном ТК используют различные вариации метода, который может быть назван *оптимальным наблюдением*. Его сущность очевидна и сводится к тому, что температурное поле объекта контроля следует наблюдать в момент  $\tau_m$  максимума сигнала  $\Delta T_m$  или другого выбранного информативного параметра (более корректно выбирать  $\tau_m$  в момент максимального отношения *сигнал/шум*). При этом "оптимальную" термограмму либо выбирают из записанной последовательности, либо непосредственно фиксируют в момент  $\tau_m$ , 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*).

Существенное значение имеет положение оптимального момента наблюдения относительно момента окончания нагрева  $\tau_h$ . Типичной рекомендацией импульсного ТК является необходимость соблюдать условие  $\tau_m > \tau_h$ ; в противном случае при использовании оптического нагрева отраженное излучение нагревателя может существенно исказить результаты контроля. Для борьбы с этим видом помех в рамках метода радиометрии с временным разрешением, разработанного в Университете Джонса Гопкинса (США), предложено нагревать изделие лазерным излучением с длиной волны, находящейся вне диапазона спектральной чувствительности тепловизора, например, нагревать объект излучением видимого диапазона, а температуру регистрировать в диапазоне 7 – 14 мкм [50]. 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.

## 6.2. МЕТОД РАННЕГО НАБЛЮДЕНИЯ

Метод раннего наблюдения, предложенный Ж. Крапэ и др. [61, 62], предусматривает регистрацию сигнала  $\Delta T$  в моменты времени  $\tau \ll \tau_m$  (см. п. 5.1.2). Очевидно, что при этом отношение *сигнал/шум* меньше, чем при оптимальном наблюдении; следовательно, данный способ применим для дефектов, создающих значительные сигналы  $\Delta T(\tau)$  (при выявление 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 термограмм, близкое к УЗ изображениям, которые получают методом С-сканирования.

## 6.3. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ

### 6.3.1. Физические принципы

В научно-технической литературе двух последних десятилетий комбинации терминов "инфракрасный", "теповизионный", "тепловой" и "томография" обозначают различные процедуры реконструкции структуры исследуемых объектов, которые объединяются стремлением расширить информативность соответствующих базовых методов контроля по аналогии с компьютерной рентгеновской томографией.

Наиболее близкой к классической вычислительной томографии, реализующей принцип прямолинейного распространения носителя информации (электромагнитного и корпускулярного излучения, распространяющегося в средах), является *эмиссионная тепловизионная*

*томография* полупрозрачных газов и плазмы, а также *инфракрасная томография* параметров носителей заряда в полупроводниках.

Первый метод представляет собой разновидность малоракурсной *оптической томографии*, развиваемой, в частности, в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [77, 78]. В стандартных оптических томографах вместо устройств, работающих в видимом или ближнем ИК диапазоне, например, ПЗС-камер, используют быстродействующие тепловизоры, что позволяет получать *пространственные сечения температуры* при числе ракурсов от 2 до 12.

Второй метод разработан для анализа времени жизни и диффузионной длины носителей заряда в слитках кремния размером до 1 м. В его основе лежит зондирование объекта скрещенными лазерными лучами [79]. Луч накачки (твердотельный импульсный лазер на длине волны 1,17...1,18 мкм) осуществляет инъекцию электронов и дырок, а тестирующий луч (гелий-неоновый лазер непрерывного действия на длине волны 3,39 мкм) отслеживает пространственно-временную эволюцию числа избыточных носителей заряда. Точность определения координат в этом случае составляет ~ 1 см.

Для непосредственного измерения температуры внутри биологических тканей используют метод *радиотермометрии (СВЧ-тепловидения)*, который был впервые применен А. Барретом с соавторами при исследованиях молочных желез [80]. В России основополагающие работы в данной области были выполнены В.С. Троицким с сотрудниками [81].

Различают *дистанционное* и *аппликаторное* СВЧ тепловидение. Первый метод, называемый также *радиотепловидением*, аналогичен *ИК тепловидению (ИК термографии)*, обеспечивая определение глубинных интегральных температур при отсутствии контакта с объектом. Результаты измерений зависят от коэффициента излучения исследуемого объек-

та и условий эксперимента. Наибольшее распространение получил аппликаторный способ, который реализуют с помощью приемников СВЧ излучения и накладных антенн-зондов (рупоров). В зависимости от режимов калибровки, частотного диапазона и конструкции приемника излучения СВЧ тепловидение позволяет определять абсолютные и относительные температуры по глубине биологических объектов. С точки зрения томографии представляет интерес тот факт, что глубина проникновения СВЧ излучения в биологические ткани зависит от его частоты. В России значительный объем исследований выполнен на базе радиотермографа РТ-20, созданного в ИРЭ РАН. В 1997 г. фирмой РЭС при Всероссийском институте радиотехники разработан компьютерный радиотермометр РТМ-01-РЭС. Данные приборы в комплексе со специализированными компьютерными программами обработки данных могут быть использованы в качестве теплового томографа для послойного зондирования материалов, прозрачных в СВЧ диапазоне.

В последние годы бурно развивается дистанционное *терагерцовое тепловидение*, позволяющее решать задачи обеспечения антитеррористической деятельности путем оперативного "просвечивания" людей, например, в аэропортах.

Разновидностью метода определения глубинной температуры биологических объектов является *пассивная акустическая термотомография*, разработанная Ю.В. Гуляевым, В.И. Пасечником, К.М. Бограчевым и др. Восстановление профиля температуры на глубине нескольких сантиметров в биологической ткани представляет типичную обратную задачу, решаемую, например, методом регуляризации по А.Н. Тихонову, методом "стандартного источника" и др. [82].

В настоящей книге термин "*динамическая тепловая томография*" (ДТТ) связан с исследованием ТФХ твердых тел путем регистрации нестационарных поверхностных температурных полей, т.е. с

использованием процедур активного ТК. Принципиальное отличие ДТТ от вычислительной томографии состоит в том, что разноразмерные изображения заменены последовательными ИК термограммами, зарегистрированными в различные моменты времени.

Первоначально термин "тепловая томография" появился в 80-х годах прошлого века в исследованиях по *фототермии*, или методу *тепловых волн*. Как отмечалось выше, концепция тепловых волн и их проникновения в глубь твердых тел восходит к ранним работам Ж. Фурье [41] и М. Ангрема [42]. Современная методология и аппаратная база фототермии заложены А. Розенцвейгом с сотрудниками [83]. Оценкой глубины обнаружения дефектов в одностороннем ТК при стимуляции объекта тепловыми волнами различной частоты является длина тепловой диффузии  $\mu = \sqrt{a/\pi f}$ . Классическая фототермия использует высокочастотные тепловые волны, для которых глубина проникновения не превышает долей мм. Последние исследования в этой области связаны с использованием относительно низкочастотных тепловых волн и тепловизионного принципа регистрации тепловых полей, а также применением импульсного теплового возбуждения, которое создает пакет гармонических волн различной частоты и, следовательно, не требует перестройки частоты при зондировании тела до различных глубин [44]. Недавно А. Манделисом и др. предложены алгоритмы томографии на тепловых волнах, основанные на трехмерной модели дифракции тепловых волн; при этом используют как одно-, так и двусторонний способ ТК [84, 85]. В данных исследованиях речь идет об обнаружении микроскопических дефектов на небольших глубинах.

В 1983 г. Г. Буссе и К. Ренк предложили *стереоскопический* принцип анализа структурных неоднородностей материалов, использующий двусторонний

метод ТК [86]. Одна из поверхностей изделия возбуждается двумя источниками тепловых волн, сигнал от которых воспринимается температурным датчиком на противоположной поверхности изделия, причем датчик расположен симметрично относительно источников. При движении объекта возникают характерные максимумы сигнала (используется фазовый анализ), обусловленные структурными неоднородностями. Если  $\delta$  – расстояние между максимумами сигнала, то глубина неоднородности (дефекта) определяется из простых геометрических соотношений:  $x = L(1 - \delta/b)$ , где  $L$  – толщина образца;  $b$  – расстояние между источниками. В последующие годы данный способ ТК, который можно рассматривать как одну из реализаций тепловой томографии, не получил распространения.

В СССР в 80-е годы прошлого века Д.А. Рапопорт с сотрудниками предложили получать тепловые томографические изображения макродефектов в конструкционных материалах путем решения двумерных обратных задач ТК [70]. Вследствие трудоемкости вычислений и малой мощности тогдашних компьютеров, реализовать идею ДТТ на этом направлении не удалось, однако в настоящее время, как отмечалось выше, метод итеративного решения обратных задач ТК становится все более популярным [32]. По сути дела, развивается подход к тепловой томографии на основе решения двух- и трехмерных задач идентификации. Результатом решения являются оценки глубины залегания, толщины и поперечных размеров внутренних неоднородностей. Другим направлением исследований является профилирование ТФХ материалов по глубине и идентификация границ между слоями разнородных материалов [59, 74, 87].

В 1984 г. В.П. Вавилов и В.В. Ширяев получили авторское свидетельство на тепловой томограф, принцип действия которого основан на обработке последовательности ИК изображений, зарегист-

рированных в процессе одностороннего импульсного ТК [88]. Основная идея заключалась в том, что более глубокие дефекты проявляются на нагреваемой поверхности с запаздыванием во времени, поэтому картину распределения временных задержек (таймограмму) можно перестроить в картину распределения глубин дефектов ("тепловые томограммы").

Первые эксперименты по реализации алгоритма ДТТ были выполнены В.П. Вавиловым в Университете Уэйна (США) [89]. Основные особенности метода были описаны в работах [43, 90]. Опция "Тепловая томография" включена в компьютерную программу ThermoFit Pro ("Инновация"). На Украине в аналогичном направлении развиваются исследования В.А. Стороженко и С.И. Мельника [91]. В частности, этими авторами разработана компьютерная программа "Thermo-2000", которая осуществляет решение обратной задачи ТК на базе аппарата передаточных функций. На основе явного численного метода решения одномерного уравнения теплопроводности был предложен алгоритм *адаптивной томографии*, заключающийся в попеременном определении температуропроводности и координат слоев, начиная от нагреваемой поверхности; дальнейшего развития этот алгоритм не получил из-за быстрого расхождения решения [87], см. п. 6.4.

Из теории ТК, изложенной в Главах 4 и 5 следует, что при равномерном нагреве ДТТ возможна только в односторонней процедуре (в двухсторонней процедуре ТК, как показано в п. 4.8, зависимость  $\Delta T(\tau)$  от  $l$  неоднозначна). Тепловую томографию следует рассматривать как способ особого представления результатов ТК, в котором использована зависимость  $l(\tau^*)$ , где  $\tau^*$  обозначает характерное время теплопередачи, выбранное в качестве информативного параметра.

Тепловая томография позволяет:

- выполнить послойный анализ объекта контроля, хотя при этом происходит

"затенение" более глубоких дефектов (см. п. 4.8);

- уменьшить влияние поверхностных шумов на качество термограмм;

- улучшить выявляемость скрытых дефектов;

- определить глубину залегания дефектов с приемлемой точностью (до 15 %).

Тепловая томография использует стандартную процедуру ТК. На нагреваемой поверхности оператор выбирает эталонную (бездефектную) точку  $(i_{ref}, j_{ref})$ , после чего все другие точки (пиксели) термограмм проверяются относительно эталонной точки (пикселя) на предмет их принадлежности к дефектным зонам. Иными словами, каждый пиксель термограмм характеризуется температурным сигналом  $\Delta T(i, j, \tau^*) = T(i, j, \tau^*) - T(i_{ref}, j_{ref}, \tau^*)$ , определенным для любого характерного времени  $\tau^*$ .

Рассмотрим, например, случай  $\tau^* = \tau_m$ . Каждый пиксель  $(i, j)$  можно охарактеризовать двумя параметрами  $\Delta T_m(i, j)$  и  $\tau_m(i, j)$ , которые формируют изображения, названные В.В. Ширяевым соответственно *максиграммой* и *таймограммой*. В зависимости от типа дефекта и амплитуды эталонного сигнала величина  $\Delta T_m(i, j)$  может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Существенной особенностью такого подхода является то, что исходную последовательность экспериментальных термограмм заменяют двумя изображениями, причем максиграмма показывает дефекты в их оптимальном проявлении, а таймограмму можно рассматривать как закодированное изображение глубин слоев.

Наилучшие результаты по точности определения координат отдельных слоев получают путем предварительного расчета калибровочной функции  $\tau_m(l)$ , после чего любому интервалу оптимальных времен наблюдения  $\Delta \tau_m$  ставят в соот-



ветствие интервал глубин дефекта  $\Delta l$  и строят тепловую томограмму. Простые оценки координат слоев можно также получить, используя приближенную формулу (5.19). Следует отметить, что, строго говоря, калибровка  $\tau_m(l)$  привязана к определенному типу дефектов, а использование формулы (5.19) возможно в случаях, когда коэффициент отражения тепловой волны от поверхности дефекта близок к единице (воздушные дефекты в твердых материалах).

**Пример.** Рассмотрим ТК образца из углепластика толщиной 4,9 мм, содержащего 3 пары воздушных дефектов, расположенных на глубинах 1, 2 и 3 мм (рис. 6.2, а). Все дефекты имеют поперечный размер  $10 \times 10$  мм и толщину 50 и 100 мкм в каждой паре. Численное решение соответствующей трехмерной задачи ТК выполнено с помощью программы ThermoCalc-6L. Пример расчетной термограммы приведен на рис. 6.2, б (вытягивание поверхностных температурных отпечатков внутренних дефектов в направлении координаты  $X$  вызвано анизотропией композита).

В ДТТ используются следующие характерные особенности активного ТК, представленные на рис. 6.3 и 6.4 (см. также п. 4.8):

1) любой дефект характеризуется оптимальным временем наблюдения  $\tau_m$  и максимальным значением  $\Delta T_m$  (рис. 6.3);

2) величина  $\tau_m$  возрастает с ростом глубины залегания дефектов  $l$ ;

3) толщина дефектов  $d$  существенно влияет на  $\Delta T_m$  и слабо – на  $\tau_m$ ;

4) амплитуда  $\Delta T_m$  прямо пропорциональна поглощенной энергии нагрева.

Зависимость  $\tau_m(l)$ , представленная на рис. 6.4, а, является калибровочной характеристикой при определении глубины залегания дефектов и используется в ДТТ. Максиграмма рис. 6.4, б показывает внутренние дефекты в моменты их оптимального проявления независимо от момента наблюдения. Таймограмма на рис. 6.4, в отражает распределение оптимальных моментов наблюдения. Выделяя диапазон значений  $\tau_{m1} \dots \tau_{m2}$ , строят тепловую томограмму рис. 6.4, г, которая

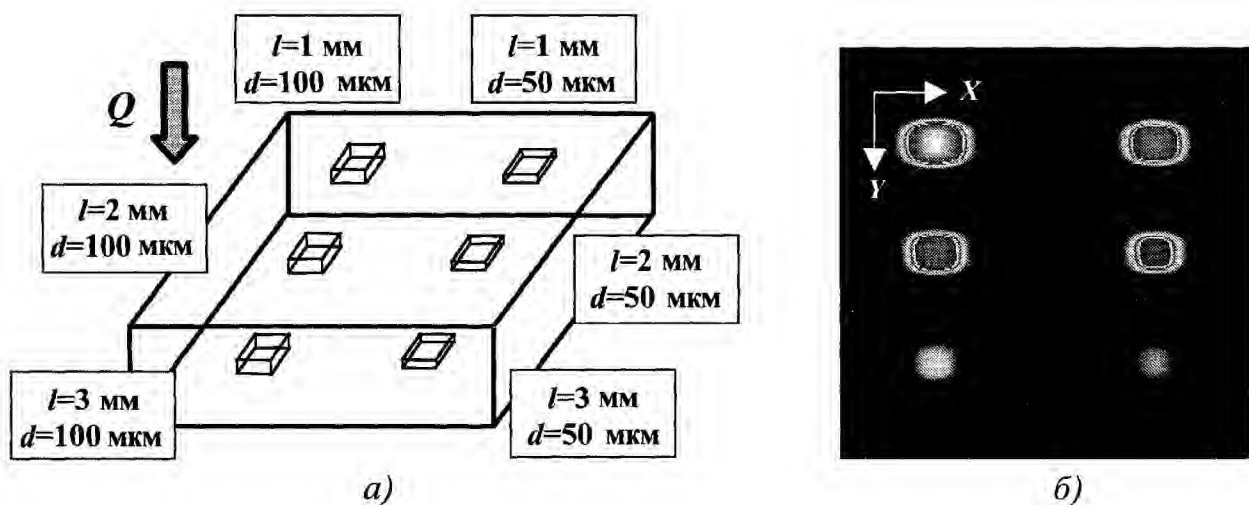


Рис. 6.2. Односторонний импульсный ТК образца из углепластика толщиной 4,9 мм с воздушными дефектами (ТФХ углепластика: теплопроводность  $\lambda_x = 3,2$  Вт/(м·К);  $\lambda_{y,z} = 0,64$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a_x = 2,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $a_{y,z} = 5,2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $Q = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_h = 10$  мс):

а – схема расположения дефектов; б – термограмма при 4,6 с





































никновения которых не превышает долей миллиметра [100]. Снижение частоты и получение тепловых изображений большого формата при поточечной схеме сканирования потребовало бы недопустимо длительного времени контроля: например, получение изображения изделия, состоящего из  $320 \times 240$  точек, при реалистичном времени анализа каждой точки 10 секунд составило бы 9 суток.

С появлением компьютерной ИК термографии стал возможным ТК достаточно больших площадей путем синхронизации полученных пиксельных отсчетов с периодической функцией нагрева при равномерном нагреве больших зон. Метод тепловых волн в ИК термографическом контроле была предложен Д. Карломаньо и П. Берарди еще в 1976 г. [101] и усовершенствован другими исследователями [102 – 106]. Метод получил название *синхронной оптической термографии* (optical lock-in thermography). Очевидно, что его наилучшие возможности реализуются при обработке данных в фазовой области. Фазограммы обычно получают с помощью преобразования Фурье, однако запатентованная Г. Буссе и др. технология контроля предусматривает выбор на одном периодическом цикле всего четырех эквидистантных термограмм  $S_{1-4}$ , после чего фазограммы и амплитграммы синтезируют согласно выражениям [106]:

$$\Phi = \arctg \frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2}; \quad (6.22)$$

$$M = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2}.$$

Использование отношения пиксельных амплитуд позволяет существенно снизить влияние неоднородного нагрева и поглощения 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 по различным причинам большого распространения не получила, в том числе и ввиду отсутствия явных преимуществ этого метода по сравнению с процедурой импульсного ТК. Тем не менее, лабораторные исследования ИК термографии на тепловых волнах продемонстрировали ряд ее полезных свойств, например, способность оценивать структурную целостность больших участков фюзеляжей самолетов, которые в силу непланарной геометрии подвержены влиянию неоднородного нагрева при стандартной процедуре импульсного нагрева [106] (следует отметить, что обработка сигнала во временной области приводит к тем же результатам, что и частотный анализ). Для нагрева использовали 6 ламп каждая мощностью 1 кВт, излучение которых модулировали с частотой 0,015 Гц. Расслоение между стрингерами и корпусом обнаруживали в течение 4-х минут при обследовании зоны площадью до нескольких кв. м. Данный метод обеспечил 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: чугун (2 мм) – алюминий (3 мм) [107]. 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.

В настоящее время метод тепловых волн реализован на коммерческом уровне фирмой EDEVIS (Германия).

### 6.9.2. Синхронная ультразвуковая стимуляция (периодическая и импульсная)

Оптимальная стимуляция объекта в ТК должна повышать его температуру только в случае наличия дефекта. В 90-х годах прошлого века получил распространение термин "вибротермография" (vibrothermography), обозначающий процедуру ТК скрытых структурных неоднородностей материалов по их поверхностным температурным полям при циклическом механическом нагружении. Подобную процедуру можно реализовать при звуковом или УЗ возбуждении материалов, поскольку источником существенного повышения температуры является внутреннее трение стенок дефектов при их облучении механическими волнами.

Чаще всего используют УЗ стимуляцию. 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 (Штуттгартский университет, Германия) под названием "синхронная УЗ термография" (ultrasonic lock-in thermography)

[108 – 111], а также Р. Томасом, Р. Фавро и др. (Университет Уэйна, США) [112], которые используют термин "звуковое ИК видение" (sonic IR imaging), или "термозвуковой метод" (thermosonics). В последние годы в США для обозначения соответствующей процедуры используется термин VibroIR или SonicIR (Ливерморская национальная лаборатория) [113].

Различие в способах поверхностного оптического и объемного УЗ нагрева проиллюстрировано на рис. 6.18. 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. УЗ 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). Важно отметить, что форма температурного сигнала при УЗ

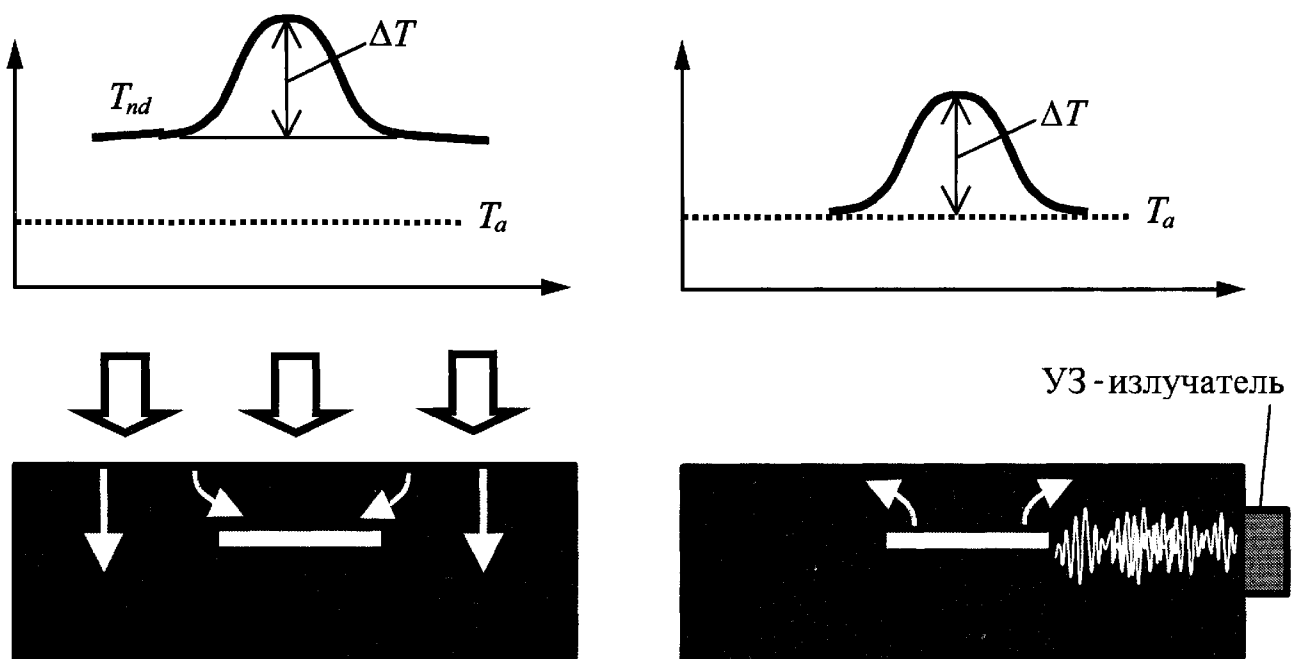


Рис. 6.18. Метод тепловых волн (ультразвуковая стимуляция)

стимуляции далеко не всегда совпадает с формой сигнала, возникающей при поверхностном нагреве (см. рис. 6.18): 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 "сформировавшиеся" дефекты.

Авторами метода [110, 111] описана экспериментальная установка, в которой УЗ возбуждение изделий осуществлялось упругими волнами частотой 20 кГц и мощностью несколько сотен Вт, амплитуду которых модулировали с частотой до 1 Гц. Для регистрации температуры был использован тепловизор Jade II фирмы CEDIP (ныне FLIR Systems), который обеспечивал запись термограмм форматом  $320 \times 240$  с частотой кадров до 200 Гц в спектральном диапазоне 3...5 мкм. Время одного теста достигало 3 минут. Объектами исследования были композиционные материалы (угле- и стеклопластики) и керамики, для которых продемонстрированы такие преимущества УЗ стимуляции как селективность в отношении дефектов и эффективность использования энергии возбуждения. В частности, весьма эффективным оказалось обнаружение трещин и расслоений в стрингерах элеронов, изготовленных из углепластика, на модулирующей частоте 0,4 Гц. Другим контролируемым материалом был усиленный 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 [110] 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 закле-

почным соединениям алюминиевых листов, широко применяемым в авиации, установлено, что обычные термограммы отражают влияние заклепок на передачу 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 вихревого контроля, обнаружившего трещину вдоль ряда заклепок, УЗ термография показала, что та же трещина хорошо выявляется на частоте 0,06 Гц (мощность УЗ стимуляции 600 Вт) и по сравнению с вихревым контролем ее отметка имеет большую длину как на фазограмме, так и на амплитуде.

Дальнейшее повышение конкурентоспособности метода УЗ термографии связано с увеличением вводимой энергии и, соответственно, расширением зоны контроля, которая в настоящее время составляет около  $1 \text{ м}^2$ . При выборе параметров УЗ нагревателя необходимо предотвращать образование стоячих волн, в узлах которых возможен пропуск дефектов (на термограммах стоячие волны видны в виде регулярных полос).

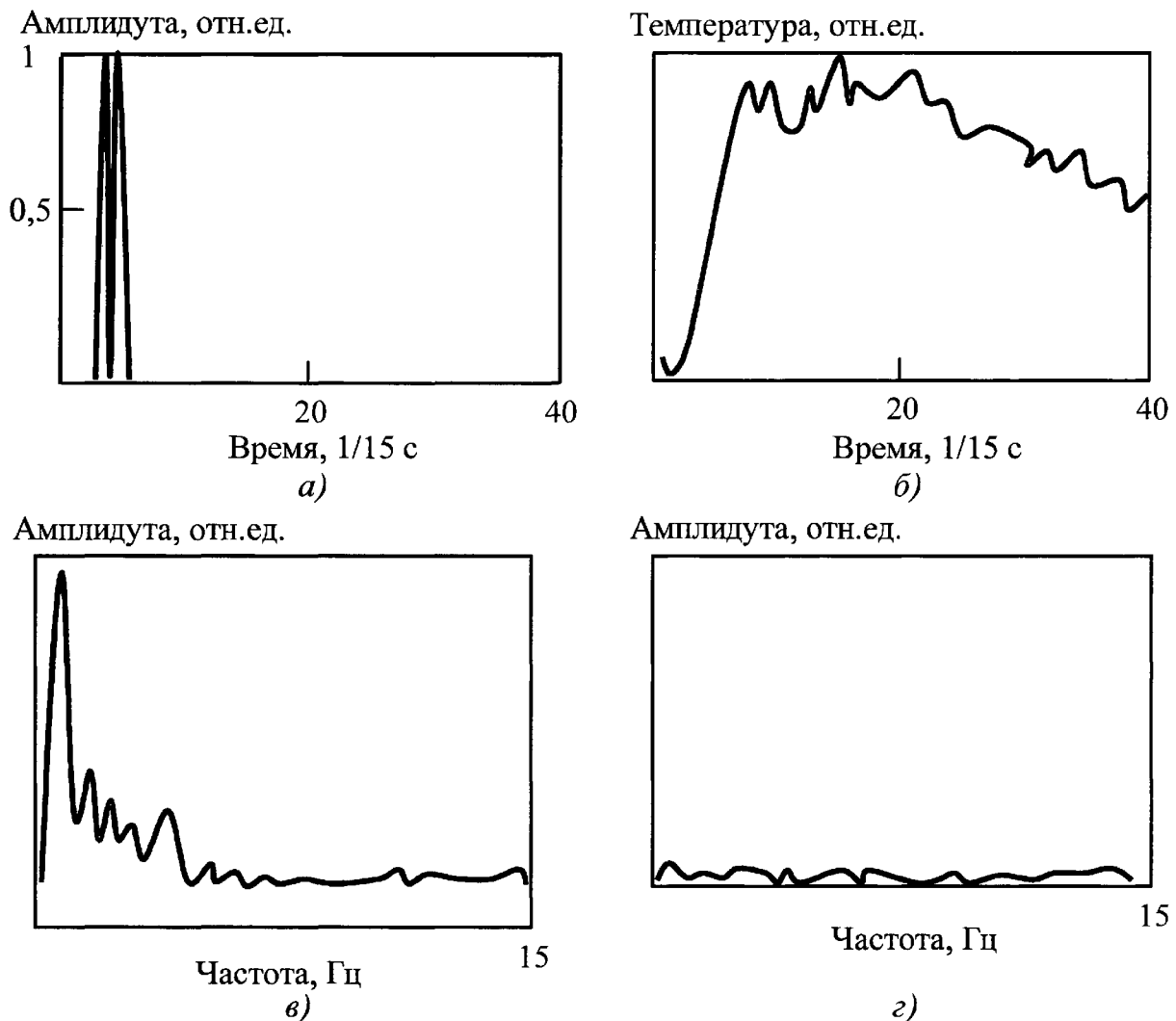
Одним из основных недостатков метода периодической УЗ стимуляции является необходимость сохранять хороший контакт между изделием и УЗ стимулятором в течение нескольких минут, необходимых для проявления достаточно глубоких дефектов. Для решения этой проблемы по аналогии с оптическим возбуждением предложено 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) [108, 111]. 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 через 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. Профили соответствующих сигналов и их спектры показаны на рис. 6.19.

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 амплиграмм, 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.

В работе [111] приведены сравнительные данные по оптическому и импульсному УЗ возбуждению при испытаниях изделий авиакосмической техники.



**Рис. 6.19. Импульсная УЗ стимуляция (адаптировано из [94]):**

*а* – УЗ-импульс; *б* – поверхностный температурный сигнал; *в* – спектр температурного сигнала в области дефекта (трещина в заклепочном соединении алюминиевого стрингера); *г* – то же, что *в*) в бездефектной области

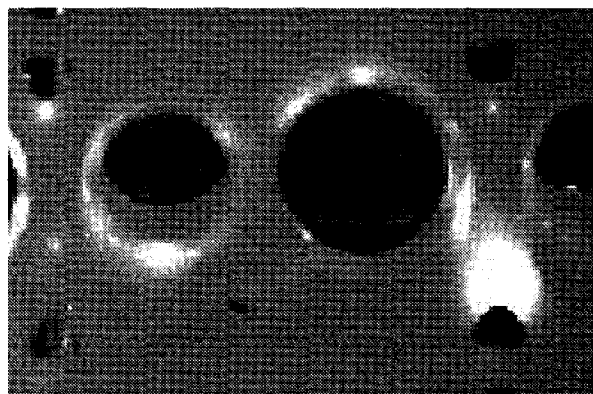
Использованы УЗ импульсы мощностью до 600 Вт и длительностью 100 мс (несущая частота 20 кГц). Результаты УЗ термографии признаны наиболее информативными при контроле композиционных материалов, керамических покрытий на турбинных лопатках и заклепочных соединений.

Исследования в Университете Уэйна сфокусированы на обнаружение трещин при импульсном УЗ возбуждении [112]. 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. 6.20, 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. 6.20, б).

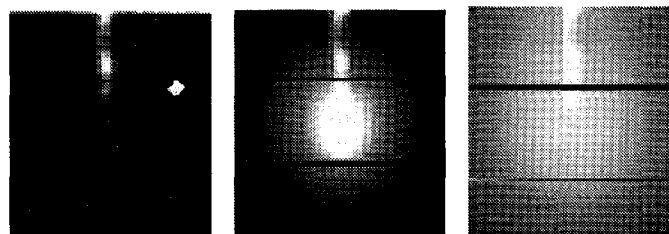
В Ливерморской национальной лаборатории США выполнены исследования

по применению УЗ вибротермографии для обнаружения дефектов паяных соединений в изделиях сложной формы, в частности, в зоне соединения трубок и пластин. Установлено, что дефектные паяные соединения проявляют специфические сигнатуры теплового поля при нагружении изделия в течение 0,1 с пакетом УЗ импульсов мощностью 300 Вт на частоте 30 кГц [113]. Преимуществом метода является слабая зависимость результатов от точки ввода ультразвука. Недостаток – возможность индуцирования новых дефектов при достаточно большой мощности УЗ импульсов. В той же лаборатории были проведены сравнительные испытания акустической микроскопии, радиографии, УЗ метода и вибротермографии при обнаружении дефектов различного типа в носовой панели космического "челнока", выполненной из 36-слойного углепластика и покрытой карбидом кремния. Результаты вибротермографических испытаний оказались весьма многообещающими.

В целом, следует констатировать, что метод ИК термографии при УЗ стимуляции изделий является перспективным, однако его особенности до сих пор изучены слабо; например, во многих случаях, где интуитивно ожидалось возникновение динамических температурных сигналов, такие сигналы не регистрировались. Ди-



а)



б)

**Рис. 6.20. Импульсная ультразвуковая ИК термография (данные Р. Томаса):**

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)

намический отклик объекта контроля зависит от энергии возбуждения, способа закрепления объекта контроля, в особенности, тонких изделий, и свойств материала. Частота УЗ стимуляции должна быть близкой к собственным частотам изделия с целью повысить эффективность генерации тепла.

### 6.10. АППРОКСИМАЦИЯ И СГЛАЖИВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФУНКЦИЙ

Техника аппроксимации (fitting) пиксельных функций развития температуры во времени  $T_{ij}(\tau)$  популярна в силу следующих факторов:

- полностью подавляется высокочастотный шум;
- облегчается применение таких математических операций как деление, вычисление производных; преобразование Фурье и т.д.;
- последовательности ИК изображений произвольной длительности заменяются изображениями коэффициентов разложения, число которых, как правило, не превышает шести; при этом сохраняется возможность восстановления исходной последовательности, но не содержащей высокочастотного шума;
- глубина залегания дефектов может быть связана с отдельными коэффициентами разложения подобно аналогичным зависимостям компонент Фурье-спектра.

Идея подгонки температурных экспериментальных данных под соответствующие математические модели была использована еще П. Верно в 1937 г. в экспериментах по определению ТФХ человеческой кожи [13]. Процедуры нелинейной фильтрации позволяют получить оптимальные оценки сразу нескольких параметров ТК, таких как размеров и глубины залегания дефектов, ТФХ, поглощенной энергии и интенсивности поверхностной теплоотдачи (см. п. 5.6).

В качестве аппроксимирующих функций используют полиномы различной степени [114] и комбинации экспоненциальных функций [40].

#### 6.10.1. Полиномиальная аппроксимация

Вид аппроксимирующих функций заимствуют из классических решений теории теплопроводности (см. табл. 6.1).

Можно ожидать, что формулы в табл. 6.1 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. 5.1 (см. также рис. 5.1) было показано, что изменение температуры в адиабатической бездефектной области после воздействия импульса Дирака описывается прямой линией в координатах  $\ln T - \ln \tau$ , а отклонения от прямой линии трактуется как сигналы от внутренних дефектов. Тем не менее, при использовании любой аппроксимации из табл. 6.1, можно считать что функции изменения температуры в бездефектных областях хорошо описываются всего лишь несколькими членами соответствующих полиномов. В дефектных областях может потребоваться больше полиномиальных членов для достижения той же точности аппроксимации.

Точность аппроксимации при использовании метода наименьших квадратов определяется критерием "хи-квадрат"  $\chi^2$ :

6.1. Полиномиальная аппроксимация в ТК

Классическое решение, используемое в качестве ядра аппроксимации	Полиномиальное представление временного развития температуры
<p><b>Логарифмическая аппроксимация (ЛА)</b>                      Адиабатический импульсный нагрев полуограниченного тела</p> $\frac{T}{W} = \frac{1}{e\sqrt{\pi\tau}},$ <p><math>T</math> – поверхностная температура;  <math>W</math> – плотность поглощенной энергии;  <math>e = \lambda/\sqrt{a}</math> – тепловая инерция;  <math>\lambda</math> – коэффициент теплопроводности;  <math>a</math> – коэффициент температуропроводности;  <math>\tau</math> – время</p>	<p><math>T(\tau) \rightarrow \ln T(\tau) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots</math> (<math>x = \ln \tau</math>)</p> $T = e^{A_0 + A_1x \dots} \quad (6.23)$
<p><b>Квадратичная аппроксимация (адиабатический случай) (КАА)</b>                      Адиабатический нагрев полуограниченного тела прямоугольным импульсом</p> $\frac{T}{Q/\lambda} = 2\sqrt{\frac{\alpha\tau}{\pi}} - 2\sqrt{\frac{\alpha(\tau - \tau_h)}{\pi}},$ <p><math>\tau_h</math> – длительность нагрева</p>	$T(\tau) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 \dots \left( t = \sqrt{\frac{\tau}{\tau_h}} - \sqrt{\frac{\tau}{\tau_h} - 1} \right) \quad (6.24)$
<p><b>Квадратичная аппроксимация (неадиабатический случай) (КАНА)</b>                      Неадиабатический нагрев полуограниченного тела прямоугольным импульсом</p> $\frac{T}{Q/\lambda} = e^{H^2\alpha(\tau - \tau_h)} \operatorname{erfc}(H\sqrt{a(\tau - \tau_h)}) - e^{H^2\alpha\tau} \operatorname{erfc}(H\sqrt{a\tau}),$ <p><math>\alpha</math> – коэффициент теплоотдачи;  <math>H = \alpha/\lambda</math></p>	$T(\tau) = A_0 + A_1 \frac{1}{\sqrt{\tau}} + A_2 \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau_h}} + A_3 \frac{1}{(\sqrt{\tau})^3} + A_4 \frac{1}{(\sqrt{\tau - \tau_h})^3} + A_5 (\sqrt{\tau})^3 + A_6 (\sqrt{\tau - \tau_h})^3 + A_7 (\sqrt{\tau})^5 + A_8 (\sqrt{\tau - \tau_h})^5 \dots \quad (6.25)$

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{T_k - T_f(\tau = \tau_k)}{\sigma_k} \right]^2, \quad (6.26)$$

где  $T_k$  – экспериментально измеренное значение температуры в  $k$ -й точке;  $T_f$  – значение аппроксимирующей функции в момент времени  $\tau_k$ ;  $\sigma_k$  – 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

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N [T_k - T_f(\tau = \tau_k)]^2. \quad (6.27)$$

Неочевидно, что аппроксимирующая функция, обеспечивающая минимальное



значение  $\chi^2$ , является оптимальной для ТК. Проведено сравнение алгоритмов ЛА и КАА из табл. 6.1 по параметру  $\chi^2$  для различных значений критериев Био и Фурье. Зависимости  $\chi^2$  от числа полиномиальных коэффициентов показаны на рис. 6.21. Основными выводами являются:

1) с небольшими исключениями, использование большего числа полиномиальных коэффициентов обеспечивает большую точность аппроксимации;

2) ЛА алгоритм обеспечивает минимальные значения  $\chi^2$  для Случая 1 (Тон-

кая пластина, Короткий импульс) и максимальные значения  $\chi^2$  для Случая 4 (Толстая пластина, Длинный импульс);

3) КАА алгоритм наиболее пригоден при анализе Случая 2 (Тонкая пластина, Длинный импульс) и неэффективен для Случая 3 (Толстая пластина, Короткий импульс).

Как и следовало ожидать, в целом более эффективным при анализе пластины является алгоритм КАА, который лучше других отражает действующий механизм теплопередачи.

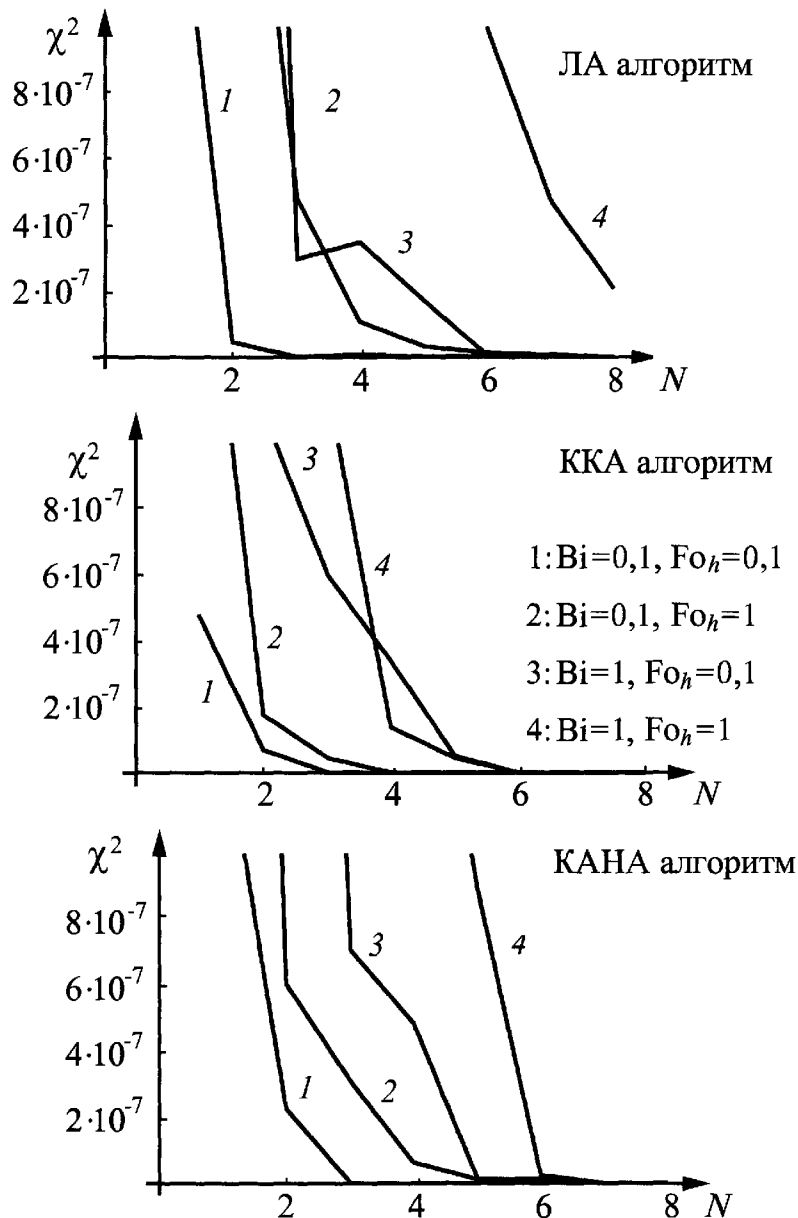


Рис 6.21. Зависимость критерия  $\chi^2$  от числа полиномиальных коэффициентов  $N$ , используемых при аппроксимации по алгоритмам табл. 6.1

Данные рис. 6.21 справедливы для бездефектных образцов. В табл. 6.2 приведены данные, как для бездефектных, так и для дефектных зон углепластикового образца толщиной 1 мм (воздушное расслоение на глубине 0,5 мм). Видно, что для трех проанализированных алгоритмов не существует системы формирования знака и величины полиномиальных коэффициентов для обеих зон, поэтому применение этих коэффициентов для тепловой дефектометрии является затруднительным.

При анализе 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  $T_{ij}(\tau)$  от "нормального" поведения.

#### Нормализация данных

Важной характеристикой алгоритма ЛА является автоматическая нормализация данных при формировании изображений полиномиальных коэффициентов порядка выше  $A_0$ . На рис. 6.22 (см. цветную вкладку) приведены результаты логарифмической аппроксимации данных, полученных при моделировании ТК иконы на дереве. Красная зона на поверхно-

сти образца моделирует двойной уровень поглощения излучения нагрева по сравнению с черной зоной (рис. 6.22, а). Шесть дефектов расположены на двух глубинах: 1 и 2 мм. Интерпретация результатов ТК таких изделий затруднительна вследствие "пятнистого" характера обычных термограмм. В частности, изображение коэффициента  $A_0$  (рис. 6.22, б) сохраняет все особенности исходных термограмм, тогда как изображение  $A_1$  выравнивает амплитуды 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. 6.23, а, б, см. цветную вкладку). Все шесть дефектов лучше всего видны в изображении  $A_2$  (рис. 6.23, б), тогда как изображение коэффициента  $A_6$  на рис. 6.23, в характеризуется искаженными "отпечатками" дефектов, иллюстрируя такую важную особенность полиномиальных коэффициентов как изменение знака сигналов от дефектов, расположенных на различных глубинах.

#### 6.2. 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 $\chi^2 = 2,2 \cdot 10^{-7}$	Д*	-0,056	-0,145	0,0359	0,0156	-0,0099	-0,002	0,00082
	БД**	-0,231	-0,045	0,0266	-0,015	-0,0024	0,0012	-0,0001
КАА $\chi^2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$	Д	-0,241	13,9	-73,2	197	-271	182	-46,5
	БД	0,148	6,82	-31,7	82	-126	111	-42,8
КАНА $\chi^2 = 1,3 \cdot 10^{-9}$	Д	4,98	-0,0094	0,575	-48,7	-39,5	4,48	0,225
	БД	-0,49	0,00676	-0,348	42,0	33,7	-2,43	-3,12

Д\* – дефектная зона; БД\*\* – бездефектная зона.

### 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 полиномиальных коэффициентов. Как отмечалось выше, полиномиальные коэффициенты можно до некоторой степени отождествить с компонентами спектра частот, поэтому следует ожидать, что выявление дефектов определенного вида можно улучшить, анализируя изображения определенных коэффициентов. При этом результат будет зависеть не только от выбранного коэффициента, но и от общего числа коэффициентов, использованных для аппроксимации. Трехмерный график на рис. 6.24 (см. цветную вкладку) показывает зависимость отношения *сигнал/шум*  $S$  от степени полинома и номера коэффициента при обнаружении самого глубокого Дефекта 1 в иконе, термограмма которой показана на рис. 6.25, а (см. цветную вкладку). Использован нагрев в течение 5 с тепловым потоком с плотностью энергии 3 кВт/м<sup>2</sup>, что повышало 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 рис. 6.24, оптимальные условия обнаружения обеспечиваются изображением ко-

эффициента  $A_1$  полинома 3-й степени (соответствующее изображение приведено на рис. 6.25, б).

Выше отмечалось, что полиномиальная аппроксимация низкой степени хорошо описывает эволюцию температуры в бездефектных зонах, тогда как полиномы более высокой степени пригодны для анализа дефектных зон. Отсюда следует, что, согласно выражению (6.27), изображение, содержащее значения критерия  $\chi^2$  в отдельных пикселях, также должно показывать дефекты. Очевидно, что значения  $\chi^2$  должны быть больше в зоне более "мощных" дефектов вследствие более сильных отклонений от "бездефектного" поведения. Изображение  $\chi^2(i, j)$  на рис. 6.25, в соответствует максимальному значению  $S = 9,9$  при выявлении наиболее глубокого Дефекта 1. В данном случае критерий  $\chi^2$  определен для разности между экспериментальной последовательностью и аппроксимирующим полиномом 1-й степени.

В отличие от обычных термограмм, сигналы от физически однотипных дефектов на изображениях полиномиальных коэффициентов могут иметь различные знаки в зависимости от глубины дефектов. Это создает трудности при оценке степени оптимальности изображений коэффициентов. Например, в табл. 6.3 приведены

### 6.3. 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 $\chi^2$ (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.

значения отношения *сигнал/шум*  $S$  для всех трех дефектов, которые в принципе обнаруживаются с помощью ТК в иконе на дереве (рис. 6.25, а). Видно, что:

1) разница в значениях  $S$  для изображений  $\chi^2$  и  $A_2$ , хорошо заметная на рис. 6.25, уменьшается, если рассматривать 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  $\Delta T$  (см. рис. 6.26, а, цветовую вкладку);

3) самое большое значение  $S$  обеспечено максиграммой (рис. 6.26, б).

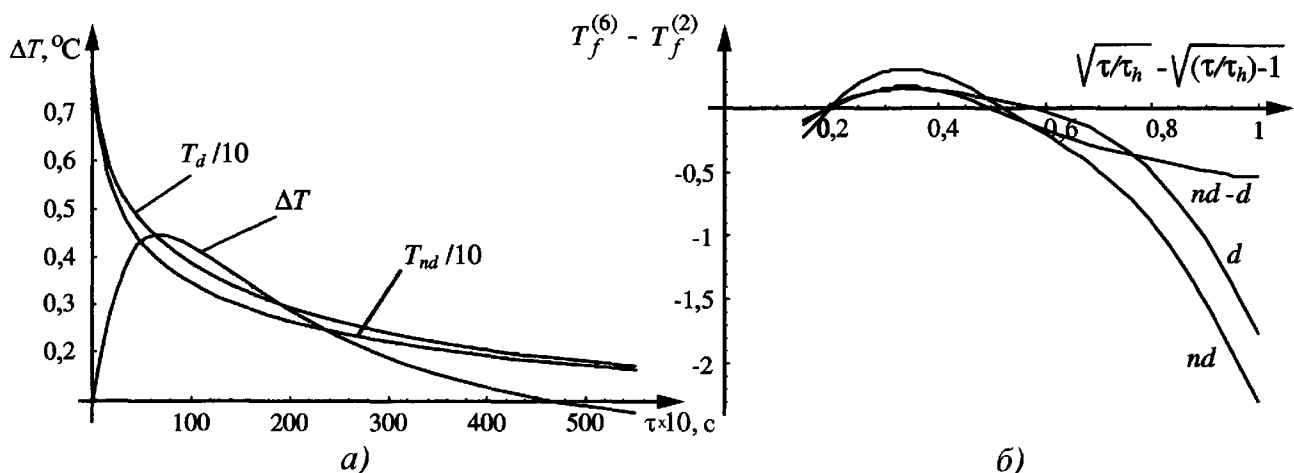
"Безэталонная" томография

Эффективность "классической" тепловой томографии, описанной в п. 6.3, существенно 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 од-

ной и той же для всех пикселей изображения. При этом анализу подлежат только отклонения экспериментальных значений температуры от значений, предписанных моделью.

Рассмотрим модель ТК иконы на дереве (рис. 6.25). На рис. 6.27, а показаны "классические" значения температурных сигналов  $T$  и  $\Delta T$ , рассчитанные для косинусоидального импульса нагрева. Максимальное значение  $\Delta T_m = 0,45^\circ\text{C}$  имеет место при  $\tau^* = \tau_m = 6,8$  с. Аппроксимируем эволюцию бездефектных и дефектных сигналов во времени с помощью двух полиномов: 2-й и 6-й степени и определим дифференциальный сигнал как  $\Delta T_{iff} = T_{iff}^{(6)} - T_{iff}^{(2)}$ , где верхний индекс 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 девиации сигнала в дефектных областях). Соответствующие кривые показаны на рис. 6.27, б, включая значение  $\Delta[\Delta T_{df} - \Delta T_{ndf}]$ , максимум которого, равный  $0,16^\circ\text{C}$ , имеет место при  $\sqrt{\tau/\tau_h} - \sqrt{(\tau/\tau_h) - 1} = 0,34$ , что соответствует  $\tau = 13,5$  с, если считать от начала



**Рис. 6.27. Изменение дифференциальных сигналов во времени (ТК иконы на дереве;  $Q = 3000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\tau_h = 5$  с,  $L = 20$  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)**

нагрева, или  $\tau = 8,5$  с, если считать от окончания импульса нагрева. Поскольку во временном развитии дифференциального сигнала возникают локальные экстремумы (см. рис. 6.27, б), обусловленные наличием скрытых дефектов, данный подход может быть использован для осуществления "безэталонной" томографии.

Рассмотрим применение принципа безэталонной томографии при анализе искусственной последовательности рис. 6.22. Термограммы данной последовательности отличаются существенной неоднородностью нагрева. Алгоритм  $\Delta T_{ijf} = T_{ijf}^{(6)} - T_{ijf}^{(2)}$  был применен к каждому пикселю, причем полученные зависимости сигнала от времени были аналогичны рис. 6.27, б. На рис. 6.28, а (см. цветную вкладку) показана тепловая томограмма слоя, который содержал два дефекта на различных глубинах. Эталонным значением служил нулевой уровень сигнала, поскольку соответствующие функции, аналогично рис. 6.27, б, уже являлись дифференциальными. Затем выбранный слой был разделен на два слоя, чтобы показать семейства дефектов, расположенных на различных глубинах (рис. 6.28, б, в). Следует отметить, что данные на рис. 6.28, а, б были получены без введения амплитудного порога. Томограммы рис. 6.28, г – е были получены с помощью классического алгоритма тепловой томографии с использованием пороговой отсечки сигнала, что является стандартной процедурой при анализе зашумленных данных. Томограмма рис. 6.28, г аналогична томограмме рис. 6.28, а.

Видно, что "классическая" томограмма содержит артефакты, которые имеют место как вокруг дефектов ("короны"), 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. 6.28, д аналогична томограмме рис. 6.26, б. Данная термограмма содержит большое число ложных сигналов, поскольку при ее формировании не был введен амплитудный порог. Использование порога существенно улучшило качество изображения (см. рис. 6.28, е).

### 6.10.2. Экспоненциальная аппроксимация (тонкие теплопроводные изделия)

Температурный отклик на передней поверхности тонких теплопроводных изделий после воздействия прямоугольного импульса (или импульса Дирака) может быть аппроксимирован функцией (5.7):

$$T^F(\tau) = \beta_1 e^{-\beta_2 \tau} + \beta_3 e^{-\beta_4 \tau}, \quad (6.28)$$

причем коэффициенты  $\beta_3$  и  $\beta_4$  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 [40].

### 6.10.3. Временные производные и синтетическая обработка данных импульсного ТК (метод реконструкции термографического сигнала)

При одностороннем импульсном ТК температурные сигналы над дефектами на стадии охлаждения изменяются медленнее, чем в бездефектных зонах, из-за менее интенсивного отвода тепла в глубь изделия через дефект. По этой причине, наряду с анализом температурных функций  $T(\tau)$ , представляет интерес анализ изменения во времени первой  $(\partial T(\tau)/\partial \tau)$  и второй  $(\partial^2 T(\tau)/\partial \tau^2)$  производной от температуры по времени. Преимущества производной как чисто математической операции очевидны, тем не менее, С. Шепард и другие сделали попытку объяснить

их роль с точки зрения анализа диффузии тепла [114]. Разработанный авторами подход не является строгим, однако он лег в основу концепции *синтетической обработки* (synthetic processing) данных импульсного ТК, который реализован в коммерческой аппаратуре фирмы Thermal Wave Imaging. В последнее время также используется термин "*реконструкция термографического сигнала*" (Thermographic Signal Reconstruction – TSR) [115, 116].

Согласно авторам концепции, в бездефектных зонах тепловой поток, не возмущенный влиянием дефектов, является одномерным и описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (6.29)$$

решение которого для поверхности равномерно нагреваемого полуграниченного тела имеет канонический вид (см. табл. 2.4):

$$T(z=0) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi\tau}}. \quad (6.30)$$

Над слаботеплопроводным дефектом тепловой поток попадает в "ловушку" и начинает преимущественно распространяться в поперечных направлениях в сторону более низких "бездефектных" температур. Тогда диффузию тепла в дефектных зонах можно считать двухмерной согласно уравнению:

$$\nabla_{x,y}^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (6.31)$$

Таким образом, процесс трехмерной диффузии тепла можно условно разделить на "нормальную" и "поперечную" фазу. 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 вычисление производной от зашумленной функции увеличивает шум (за счет расширения частотного спектра сигнала), существенным момен-

том метода является полиномиальная аппроксимация экспериментальных функций  $T(\tau)$  с использованием ЛА аппроксимации (см. п. 3.1). 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 частот, подавляя высокочастотный шум ИК системы и оставляя неизменным низкочастотные эффекты, связанные с дефектами.

Вторым шагом процедуры является восстановление последовательности с помощью определенных полиномиальных коэффициентов по формуле (6.23). Это дает следующие преимущества:

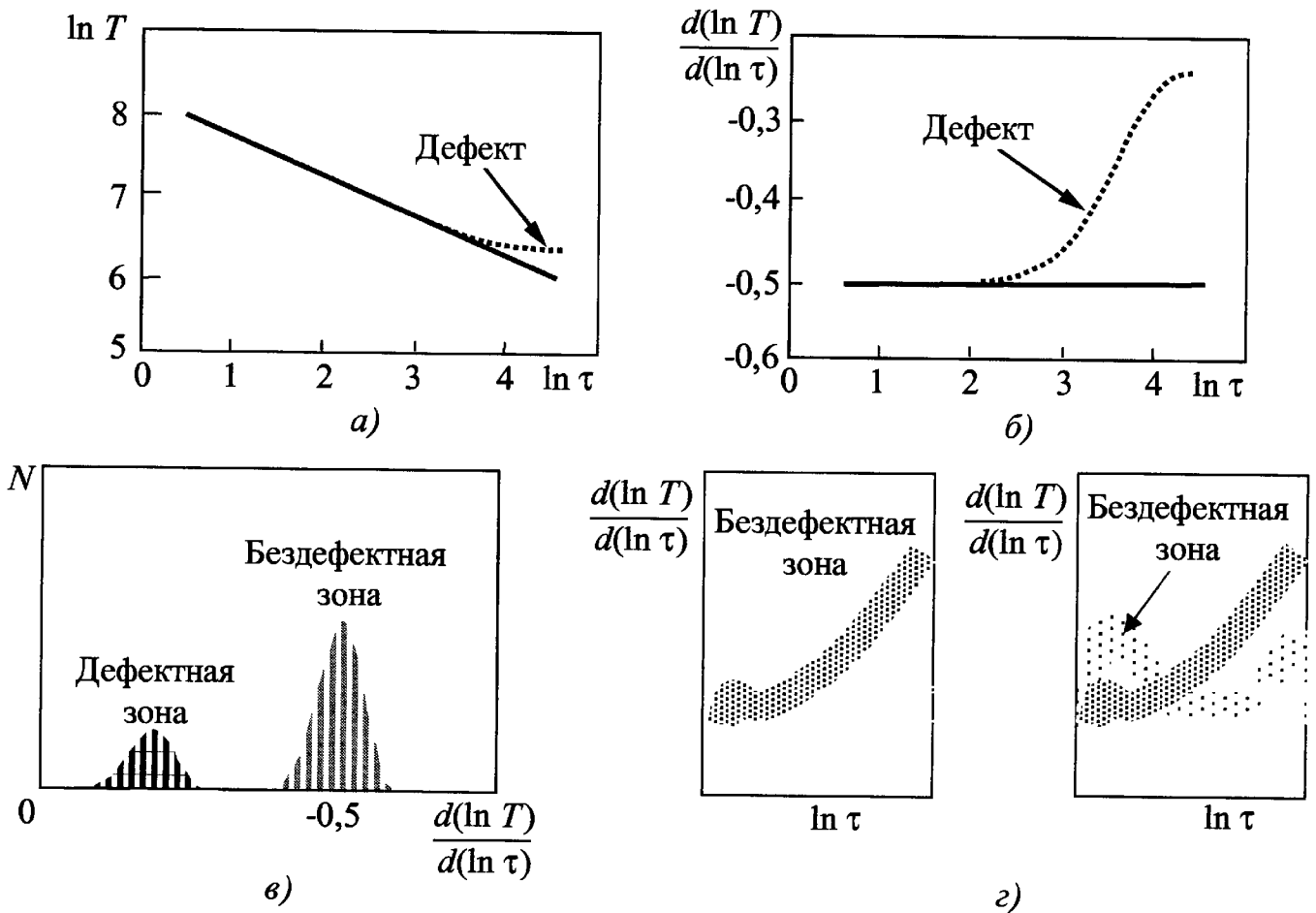
1) "синтетические" функции  $T(\tau)$  свободны от высокочастотных шумов;

2) к ним легко применимы операции взятия производных, интегрирования, преобразования Фурье и т.п.;

3) характерные точки во временном развитии синтетического сигнала могут анализироваться алгебраически;

4) за счет использования небольшого числа полиномиальных коэффициентов обработка данных проходит быстрее и сами данные требуют меньше компьютерной памяти.

В одном из запатентованных фирмой Thermal Wave Imaging вариантов метода реконструкции термографического сигнала предложено анализировать динамические гистограммы логарифмических температурных производных в различных участках объекта контроля. Переход от температурной функции  $T(i, j, \tau)$  к гистограммам функции  $d[\ln(T)]/d[\ln(\tau)]$  позволяет реализовать вышеупомянутые преимущества синтетической обработки сигнала и сделать результаты обработки независимыми от случайных смещений тепловизора и поворотов зон контроля по



**Рис. 6.29. Метод реконструкции термографического сигнала фирмы Thermal Wave Imaging (адаптировано из [115]):**

*a* – представление  $\ln(T) - \ln(\tau)$ ; *б* – изменение логарифмической производной во времени, представление  $[\ln(T)/d(\ln(\tau)) - \ln(\tau)]$ ; *в* – гистограмма дефектной и бездефектной зоны; *г* – "отпечатки" логарифмической температурной производной

сравнению с эталоном. На рис. 6.29, *a* показано изменение поверхностной температуры во времени после импульсного нагрева в логарифмических координатах; первая производная этой функции представлена на рис. 6.29, *б*. Наличие газонаполненного дефекта приводит к отклонению графика температуры от прямой линии, что подчеркивается производной. Гистограммы логарифмических производных в дефектных и бездефектных зонах хорошо разделяются, причем гистограмма бездефектного участка центрируется относительно значения  $-0,5$  (рис. 6.29, *в*). Если выбрать характерные моды гистограмм и показать их в зависимости от  $\ln(\tau)$  для всей последовательности ИК термограмм, то можно получить специфические изображения, показанные на рис. 6.29, *г* для

дефектной и бездефектной зоны и названные "отпечатками" гистограмм логарифмических производных.

Левое изображение на рис. 6.29, *г* может служить эталоном при принятии решения о качестве отдельных участков изделия, причем, как упоминалось выше, "отпечатки" гистограмм инвариантны относительно смещений и поворотов зон контроля.

Несмотря на то, что описанный выше метод обработки данных ТК применим, в основном, к металлическим изделиям, с покрытиями и без них, а прохождение исходного отношения сигнал/шум через цепочку предлагаемых операций до конца не исследовано, "синтетическая" обработка сигналов позволила получить весьма качественные изображения внутренней

структуры ряда объектов контроля, например, турбинных лопаток, панелей самолетов и т.п.

### 6.11. НОРМАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕРМОГРАММ

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

Различают два типа нормализации:

1) нормализацию всех изображений в последовательности на выбранное изображение, которое называют "нормализующим";

2) трехмерную (3D) нормализацию, которую предусматривает деление двух последовательностей, из которых одна является экспериментальной, а вторая – расчетной.

#### 6.11.1. Нормализация на одно изображение

Рассмотрим последовательность ИК изображений  $T(i, j, \tau)$ , полученных в импульсной процедуре ТК (длительность нагрева  $\tau_h$ ). 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:

$$C_{norm}(i, j, \tau) = \frac{T(i, j, \tau) - T_{init}(i, j)}{T_{norm}(i, j, \tau_{norm}) - T_{init}(i, j)}, \quad (6.32)$$

где  $C_{norm}(i, j, \tau)$  – нормализованный контраст;  $T_{init}(i, j)$  – начальная температура изделия, которая в общем случае может изменяться от точки к точке (при нагреве равна температуре окружающей среды  $T_a$ );  $T_{norm}(i, j, \tau_{norm})$  – 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 представлять собой равномерный фон с температурными отпечатками от дефектов в моменты времени, близкие к  $\tau_m$ . Например, при кратковременном (импульсном) нагреве в качестве нормализующей часто выбирают термограмму в конце нагрева. Схема нормализации на одно изображение показана на рис. 6.30.

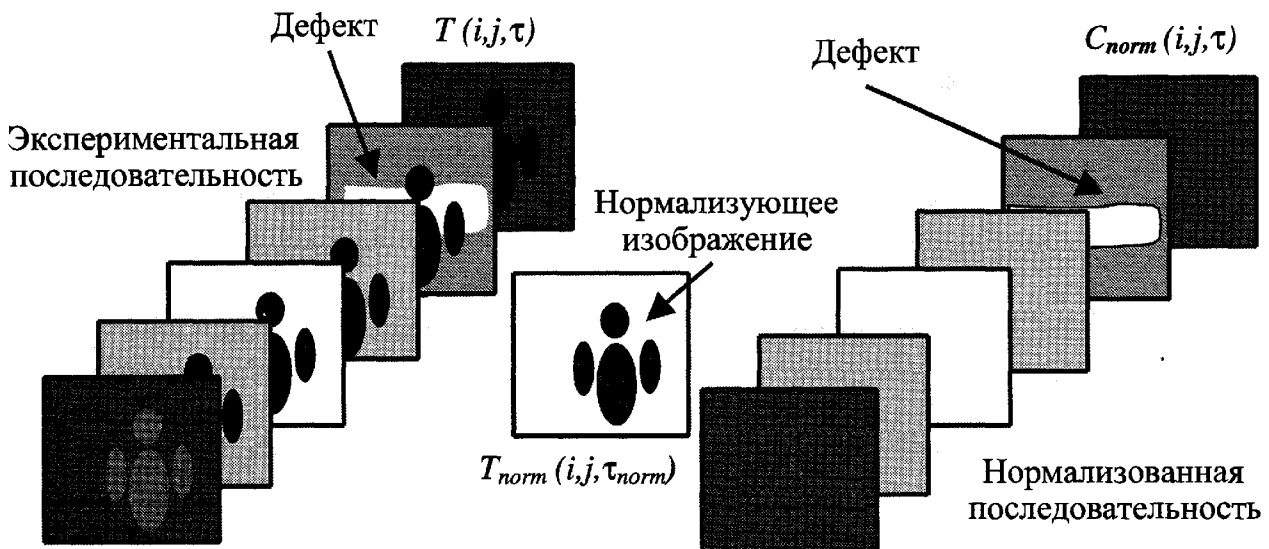


Рис. 6.30. Нормализация динамической последовательности на одно изображение



Пример нормализации последовательности термограмм, полученной при импульсном ТК углепластикового композита, представлен на рис. 6.31 (см. цветную вкладку). В конце нагрева исходная термограмма отчетливо показывает неравномерный нагрев двумя лампами, из которых более мощный поток создавался левой лампой (см. верхнюю левую термограмму на рис. 6.31). 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.

### 6.11.2. Трехмерная нормализация

Процедура нормализации дает приемлемые результаты в тех случаях, когда поверхность объекта контроля является более или менее однородной, а неоднород-

ным является сам поток нагрева. В тех случаях, когда на контролируемой поверхности имеются области с различной поглощающей способностью, на их границах имеет место диффузия тепла в "поперечном" направлении, что снижает эффективность стандартной нормализации. Вышесказанное проиллюстрировано температурными профилями на рис. 6.32. 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 профиль 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. 6.32 пунктиром.

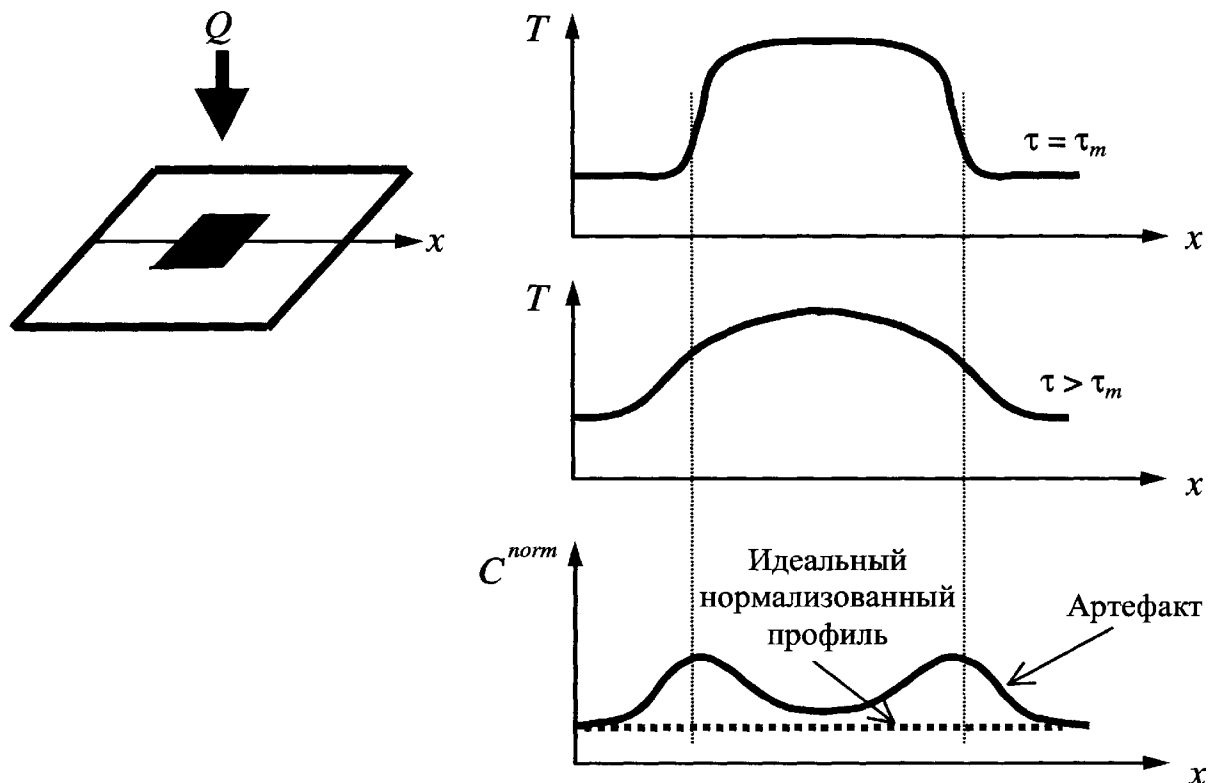
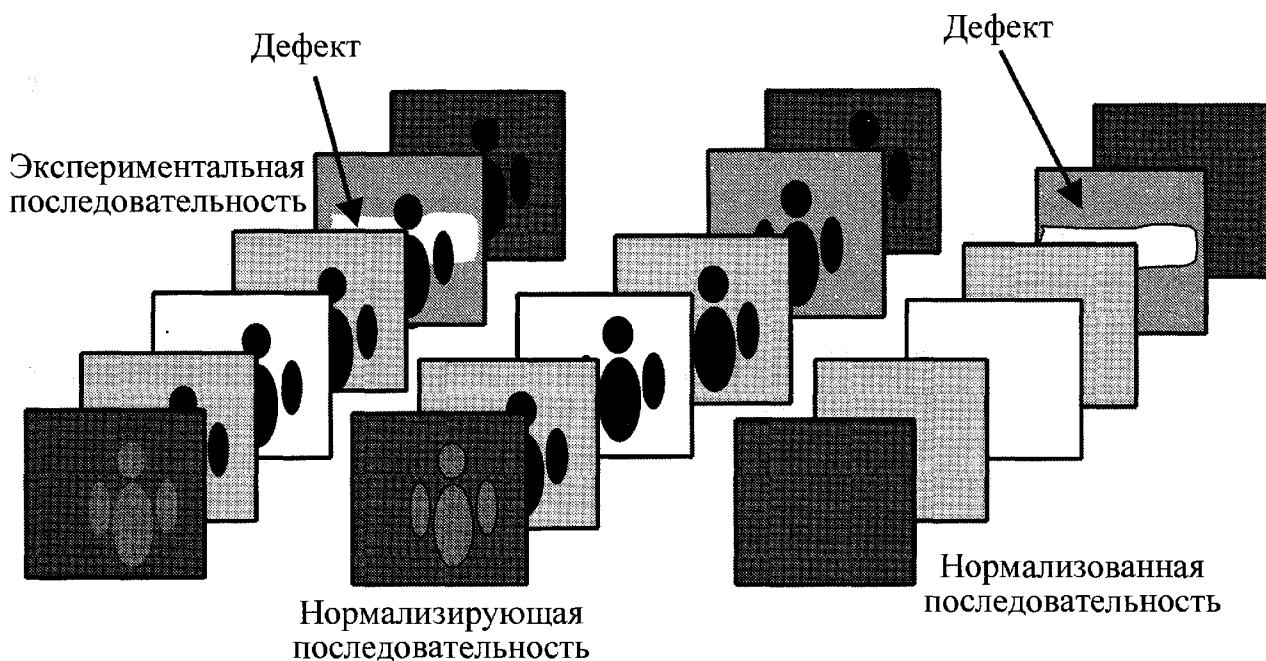


Рис. 6.32. Влияние трехмерной диффузии тепла на эффективность стандартной нормализации



**Рис. 6.33. Нормализация динамической последовательности на другую последовательность (трехмерная нормализация)**

Сущность предложенного В.П. Вавиловым способа *трехмерной нормализации* состоит в том, что используется 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 качестве маски нагрева  $Q(i, j)$  используется одно из изображений экспериментальной последовательности, в котором скрытые дефекты еще не проявились; например, при импульсном нагреве в качестве маски нагрева выбирают термограмму  $T(i, j, \tau_h)$ . 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 содержит только эффекты

неоднородного поглощения и диффузии тепла (см. рис. 6.33).

Трехмерная нормализация доказала свою эффективность в ТК настенных фресок, оптический нагрев которых приводит к существенно неоднородным термограммам (см. пример в Главе 11).

## 6.12. МЕТОД ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

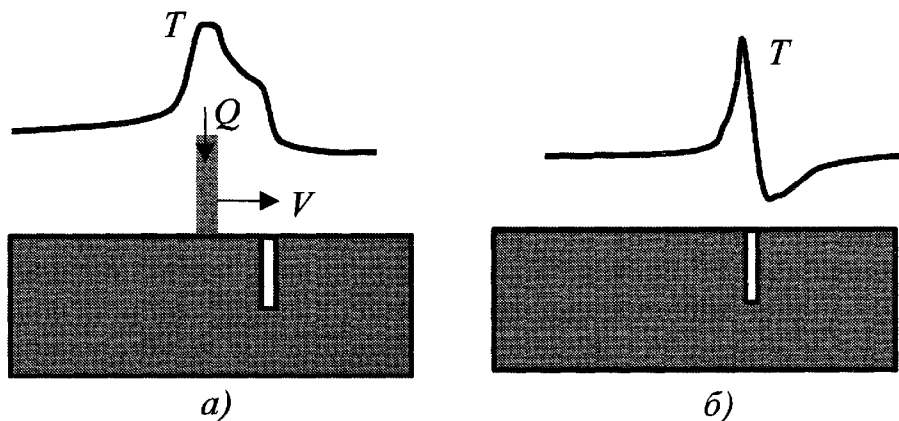
### 6.12.1. Непрерывный нагрев

Метод непрерывно-действующего движущегося источника разработан в нескольких 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 исследуемой поверхности. В НК чаще используют непрерывный мощный нагрев в зоне малого размера или в полосе, причем измерение температуры также производят либо в точке (рис. 1.3, а), либо вдоль строки ска-

нирования (рис. 1.3, б). Профили температуры по оси движения источника можно рассматривать в системе координат, связанной как с объектом контроля (рис. 6.34, а), так и с источником нагрева (рис. 6.34, б). В качестве дефектограммы используют термограмму, привязанную к движущемуся источнику (рис. 6.34, 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 приповерхностные трещины, расположенные перпендикулярно поверхности нагрева, накапливают тепловую энергию и повышают температуру перед трещиной; соответственно за трещиной возникает дефицит тепловой энергии и температура понижается (рис. 6.34, б).

Аналогично случаю равномерного нагрева прямоугольным импульсом, в методе движущегося источника существует оптимальный момент наблюдения (время задержки)  $\tau_m$ , 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:

$$b = V \tau_m. \quad (6.33)$$



**Рис. 6.34. Профили температуры в методе движущегося источника:**  
 а – система координат объекта контроля; б – система координат источника нагрева

Значение времени задержки  $\tau_m$  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 движущимся источником тепла (см. п. 4.4). В качестве кажущегося парадокса заметим, что в теплопроводных материалах с неглубоко лежащими дефектами оптимальная точка наблюдения может лежать *впереди* источника нагрева (за счет опережающей теплопередачи); при этом значения времен задержки  $\tau_m$ , 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" дистанционный нагрев и дистанционную регистрацию температуры осуществляют синхронно с помощью качающихся зеркал [117]. В качестве нагревателя используется 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" [118]). При ТК композиционных материалов скорость сканирования может составлять несколько сантиметров в секунду.

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.

Наилучшей чувствительностью к внутренним дефектам обладает способ с использованием мощного сосредоточенного пучка нагрева по схеме рис. 1.3, *a*, незаслуженно забытый в силу низкой производительности испытаний. Компромиссным способом является сочетание полосового нагрева со строчным сканированием. В СССР этот способ с успехом разрабатывался В.А. Стороженко, Д.А. Рапопортом и другими применительно к испытаниям стеклопластиковых цилиндрических изделий, выполненных способом намотки [119]. При этом обнаруживались расслоения между слоями композита на глубинах до 10...15 мм.

В последние годы интерес к движущемуся полосовому нагреву вновь возрос, главным образом, благодаря исследованиям У. Уинфри, К. Крамера и др. (NASA, США) [120]. Последние исследования этой группы направлены на разработку концепции так называемого "теплого фотокопира" (thermal photocopier), получившего такое название благодаря сходству принципа действия с копировальными машинами Xerox [121]. Фактически предложено отказаться от жесткой связи

полосового нагревателя (кварцевой лампы) и тепловизора и при неподвижном тепловизоре с помощью компьютерной обработки синтезировать термограммы при одном проходе нагревателя вдоль поверхности и различных временах задержки. Отметим, что такой способ ТК был запатентован В.В. Ширяевым и другими еще в 1984 г. [122].

Преимущества полосового нагрева:

- 1) высокая эффективность ввода тепла за счет близкого расположения нагревателя к контролируемой поверхности;
- 2) большая равномерность нагрева;
- 3) более низкая стоимость системы регистрации температуры, если используют строчно-сканирующие устройства.

Как отмечено выше, 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, включает тепловизор формата  $256 \times 256$  на базе охлаждаемого фотодетектора из антимонида индия. Прибор обеспечивает температурное разрешение  $0,025 \text{ }^\circ\text{C}$  при частоте кадров до 60 Гц [121]. В качестве полосового нагревателя применена кварцевая лампа мощностью 1 кВт с эллиптическим рефлектором. Максимальная скорость контроля составляет 30,5 см/с; при этом типичная избыточная температура нагрева не превышала  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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 дополнительно модулировать температурный сигнал [123]. 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. 6.35). Пространственно-временные частоты маски можно оптимизировать для дефектов определенного типа. Тепловой поток, обусловленный движущимся линейчатым нагревателем, описывается формулой [123]

$$Q(x, \tau) = \frac{I}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x + \omega\tau)], \quad (6.34)$$

где  $I$  – плотность мощности излучения нагревателя;  $\eta$  – плотность линий в маске;  $\omega$  – временная частота. Тепловой поток на расстоянии  $x$  осциллирует с частотой  $\omega$  и сдвигом фазы  $2\eta\pi x$ .

Пространственный градиент теплового потока также подвержен гармоническим колебаниям вида

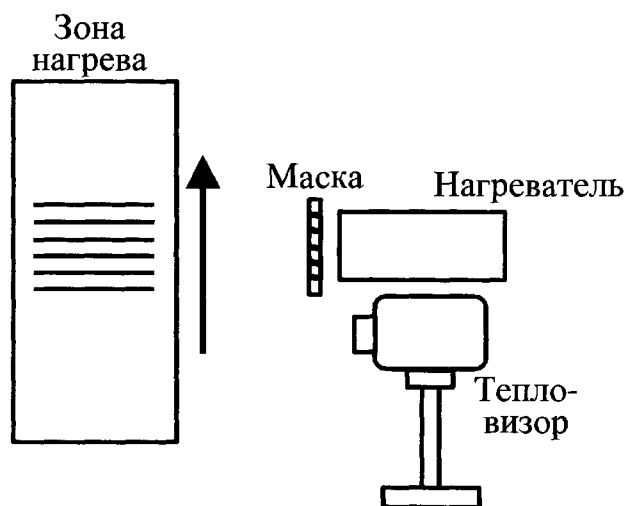


Рис. 6.35. Метод ИК термографии при вынужденной диффузии тепла

$$\frac{\partial}{\partial x} Q(x, \tau) = \eta\pi I \cos(2\eta\pi x + \omega\tau). \quad (6.35)$$

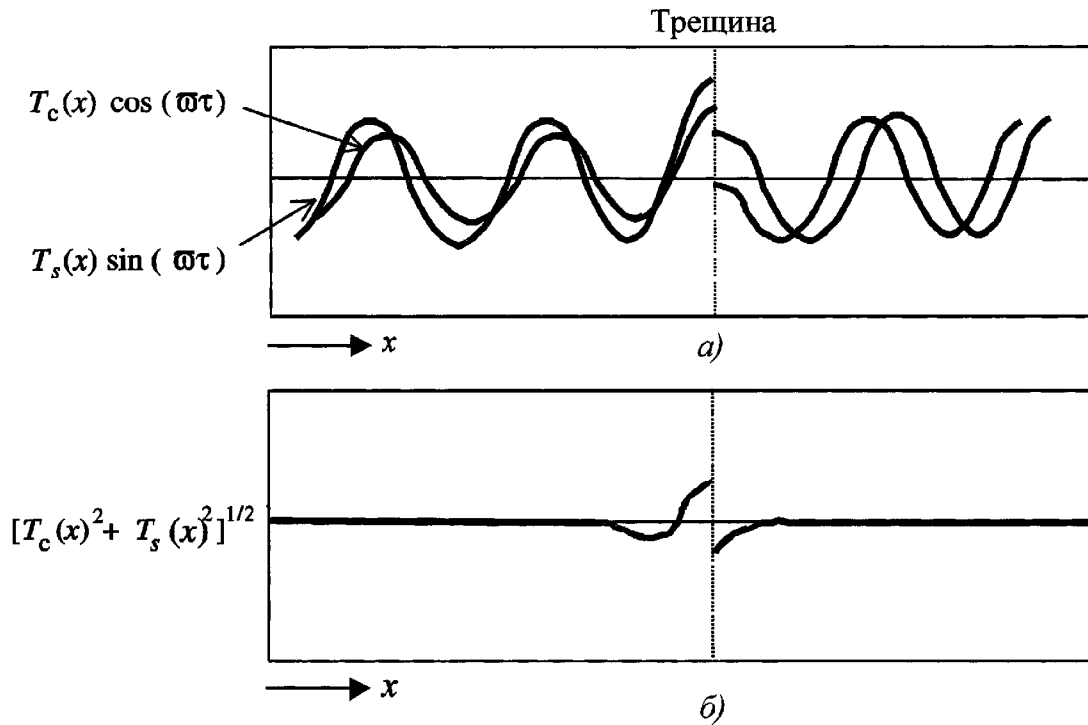
Движущееся температурное распределение линейчатого типа анализируют с помощью дифференциальных ИК камер, которые регистрируют приращения температуры относительно среднего уровня. Все точки получаемого изображения характеризуются определенной фазой. Разлагая гармоническую функцию в (6.35), можно показать, что линейчатое температурное распределение есть суперпозиция синфазной пространственной косинусоидальной компоненты и внефазной временной синусоидальной компоненты

$$Q(x, \tau) = \frac{I}{2} [1 + \cos(2\eta\pi x) \cos(\omega\tau) + \sin(2\eta\pi x) \sin(\omega\tau)]. \quad (6.36)$$

При появлении в движущемся поле нагрева трещины все компоненты температурного поля испытывают отклонения от регулярного характера, что обеспечивает ее обнаружение (рис. 6.36). Сравнение температурных профилей на рис. 6.34 и 6.36 показывает, что способы ТК движущимся локализованным источником и вынужденной диффузии соотносятся так же, как распределенный импульсный и гармонический нагрев.

### 6.12.2. 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 10 периодов тепловых волн. Этот метод применяют для тонких высоко-теплопроводных материалов, где частота тепловых волн может достигать нескольких кГц. Глубина проникновения волн таких частот составляет десятки микрон, размер анализируемых зон – того же порядка, а размер зоны нагрева может



**Рис. 6.36. Способ вынужденной диффузии тепла в применении к ТК пластины с трещиной (адаптировано из [123]):**

*a* – временная компонента; *б* – амплитудная компонента

быть на порядок больше для того, чтобы создать планарные тепловые волны и использовать решения соответствующих одномерных задач. В результате анализируются лишь небольшие участки изделий.

Фототермический метод сочетает преимущества трехмерного зондирования и фазового анализа, позволяя профилировать ТФХ изделий по глубине. Основные области применения:

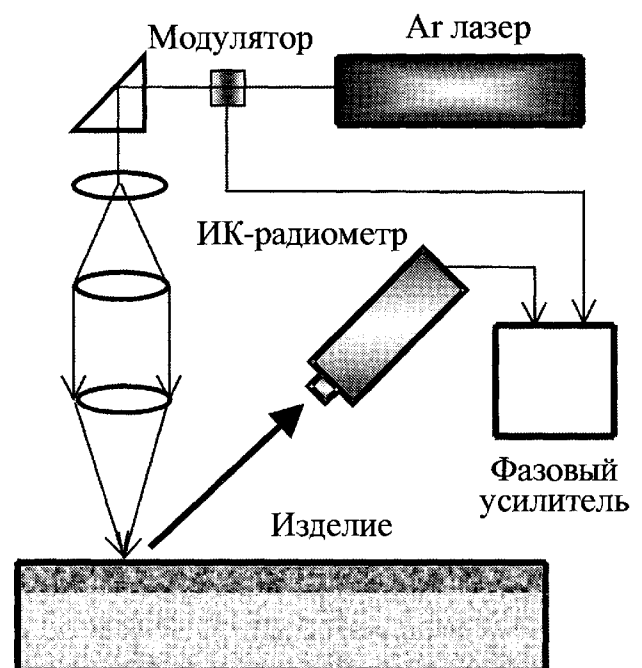
- 1) НК покрытий различного типа (лакокрасочных, гальванических и т.п.);
- 2) измерение толщины слоя закалки сталей.

Пример фототермической микроскопической системы представлен на рис. 6.37 [124]. Нагрев изделия в пятне площадью 1 мм<sup>2</sup> производят аргоновым 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 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. 6.37 может быть реализован импульсный поточечный нагрев изделия с заменой частотного анализа фазовым в Фурье-пространстве.



**Рис. 6.37. Схема фототермического микроскопа**

В последнее время разработана комбинация классической фототермии и ИК термографии [125]. Схема экспериментальной установки аналогична рис. 6.37, но вместо ИК радиометра используют тепловизор, например, с растром  $320 \times 240$  пикселей и размером отдельной точки на поверхности изделия  $30 \times 30$  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.

### 6.13. КОМБИНИРОВАНИЕ ТК И ДРУГИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (СИНТЕЗ ДАННЫХ)

Комбинирование ТК с другими видами (методами) НК целесообразно в следующих случаях:

- 1) ТК исполняет роль скринингового метода, предваряя испытания с помощью более эффективных 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 выявлении воды в авиационных сотовых панелях, а также ударных повреждений и расслоений в композитах. С помощью ТК локализируют подозрительные зоны, после чего более тщательный контроль проводят, например, с помощью ультразвука. Аналогичным образом контролируют заклепочные соединения алюминиевых авиационных панелей, причем в качестве основного метода испытаний выступает вихретоковый контроль.

Комбинирование второго типа имеет место, например, при использовании ТК и *лазерной интерферометрии*, одна из разновидностей которой получила в англоязычной литературе название "*широгра-*

*фии*", или "*записи смещений*" (shearography). Информативные изображения получают путем смещения двух спекл-изображений, слегка сдвинутых друг относительно друга. Процедура НК с использованием широкографии подобна лазерной интерферометрии, при которой фиксируют механические смещения поверхности объекта контроля, вызванные скрытыми дефектами. Первое широкографическое изображение получают для ненагруженного изделия. Затем изделие нагружают, создавая перепад давления, а также применяя тепловую или механическую (вибрационную) стимуляцию, после чего фиксируют второе широкографическое изображение. Суперпозиция двух "широграмм" производит муаровую картину, обусловленную распределением величины  $\partial z / \partial x$ , где  $\partial z$  – разность смещений двух точек и  $\partial x$  – контролируемое смещение камеры. Бездефектные зоны являются более жесткими, поэтому в дефектных областях возникает типичное интерферометрическое изображение, в котором пиксельные амплитуды пропорциональны смещениям. В целом, эффективность широкографии 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 интерферометрии позволяют разрабатывать аппаратуру испытаний, в которой объект контроля нагружают оптическим импульсом и одновременно регистрируют по двум каналам тепловое и голографическое изображение. В табл. 6.4 приведено сравнение двух методов применительно к изделиям авиакосмической техники, которое, несмотря на существенную субъективность, доказывает преимущество комбинированной техники. Коммерческая аппаратура, комбинирующая оба метода НК, разрабатывается фирмой Laser Technology, США. В России данный метод, получивший название *теплоголографического*, разрабатывался Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадидным и Е.В. Абрамовой.

**6.4. 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.

Комбинирование данных третьего типа связано с новым подходом к НК в областях, характеризующихся сложностью и разнообразием объектов контроля. Подразумевается, что результат *синтеза данных* (data fusion) не является простым суммированием результатов по отдельным методам, а создает новое качество. Концепция слияния данных, полученных с помощью различных сенсоров, хорошо известна в военной технике. В НК первые работы датированы 1994 г. [126], однако наибольшее число публикаций относится к последней декаде [127, 128].

В авиакосмической промышленности синтез данных был применен для трех взаимодополняющих методов НК: ультразвукового, радиографического и ширографического [128]. Поскольку эти методы различны по реализуемым физическим

принципам, расшифровка изображений должна осуществляться обученными операторами, которые способны квалифицировать 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. Предложен автоматический алгоритм слияния данных, который основан на сравнении изображений, полученных с помощью каждого метода НК, с моделью изделия, созданной методом *компьютерного проектирования* (Computer-Aided Design – CAD). Основные шаги процедуры:



- предварительная обработка индивидуальных изображений с целью исключить их возможные искажения;
- анализ компьютерной модели с целью получить набор базовых признаков для последующего сравнения индивидуальных изображений и модели;
- обнаружение признаков в каждом индивидуальном изображении согласно набору, полученному на основе компьютерной модели;
- предварительная подгонка 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-образов (см. п. 6.6).

Кратко рассмотрим особенности этапов слияния данных на конкретном примере.

Искажение изображений может происходить в процессе испытаний, как вследствие определенной геометрии контроля, так и в силу факторов электронного происхождения. Кроме того, из-за значительной площади объектов НК в авиакосмической промышленности, испытания выполняют от зоны к зоне с последующим составлением мозаичных изображений, что также требует использования специфических компьютерных программ. В работе [127] приводятся УЗ (единичное), радиографическое (3 подобласти) и широкографическое (32 подобласти) изображения сотовой панели самолета. В УЗ изображении хорошо наблюдаются участки панели различной толщины, слабо проявляются отслоения внешней обшивки от сот и 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, испытания которой описаны в [127], 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 Хью (Hough). Затем набор прямолинейных сегментов, полученных 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 выделялись отдельные зоны, соответствующие участкам объекта контроля, которые различались 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 легко идентифицировались 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 другими. Можно предположить, что весьма эффективным будет сопоставление тепловых и интерферометрических изображений, полученных в единой процедуре контроля (теплоголография). Как отмечалось выше, такой метод применим к изделиям авиакосмической техники, причем нагружение 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 лучше выявляет более глубокие дефекты.

В работе [128] описан ряд алгоритмов слияния данных вихретокового и ИК контроля ударного повреждения в углепластике, которые были 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 [128], не является оптимальной ввиду чрезмерно длительного нагрева. Поэтому, более надежными явились результаты вихретокового контроля, что проявилось при статистическом слиянии данных. В качестве простейшего алгоритма слияния данных отметим способ *максимальной амплитуды*: из двух изображений выбирают пиксель с 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.

## 6.14. ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

При механическом сжатии или растяжении, а также при разрушении в твердых телах возникают температурные градиенты, обусловленные процессами преобразования механической энергии в тепловую. Выделение тепла может происходить либо вследствие механического гистерезиса, либо за счет пластической деформации при возникновении и распространении трещин и разрушении. Первый механизм носит как интегральный, так и локальный характер и имеет место при циклическом нагружении материалов, поэтому статические (монотонные) нагрузки в пределах упругости материала не приводят к существенным температурным эффектам. Второй механизм связан с образованием зон пластической деформации вследствие концентрации механических напряжений на структурных неоднородностях материалов (трещинах) и носит локальный характер.

### 6.14.1. Вибротермография и анализ термоупругих напряжений

Если циклическая 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  $10^{-3}$  °С. Соответствующий метод НК получил название вибротермографии, кроме того, сходные принципы используются в методе УЗ ИК термографии.

В 90-х годах прошлого века появился метод "анализа нагрузок по тепловой эмиссии" (Stress 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. 6.38.

Впервые связь динамических изменений температуры и механических нагрузок была получена У. Томсоном еще в 1853 г.

$$\frac{\delta T}{T_0} = -\frac{\beta \delta \sigma}{\rho C_p} = -K \delta \sigma, \quad (6.37)$$

где  $\delta T$  – циклическое изменение температуры;  $T_0$  – абсолютная температура образца;  $\beta$  – коэффициент линейного расширения,  $K^{-1}$ ;  $\delta \sigma$  – изменение суммы основных механических напряжений (stress);  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $K$  – коэффициент (константа) термоупругости, равный, например,  $0,86 \cdot 10^{-11}$  1/Па для алюминия и  $28 \cdot 10^{-11}$  1/Па для стали. Упругие материалы с положительными коэффициентами линейного расширения имеют отрицательный коэффициент термоупругости, т.е. при адиабатическом нагружении поверхностная температура тел из таких материалов уменьшается с ростом механических напряжений, поэтому другая запись уравнения (6.37) содержит знак минуса в правой части.

Важным преимуществом анализа термоупругих эффектов является то, что он позволяет измерять не деформации, а непосредственно напряжения. Данный

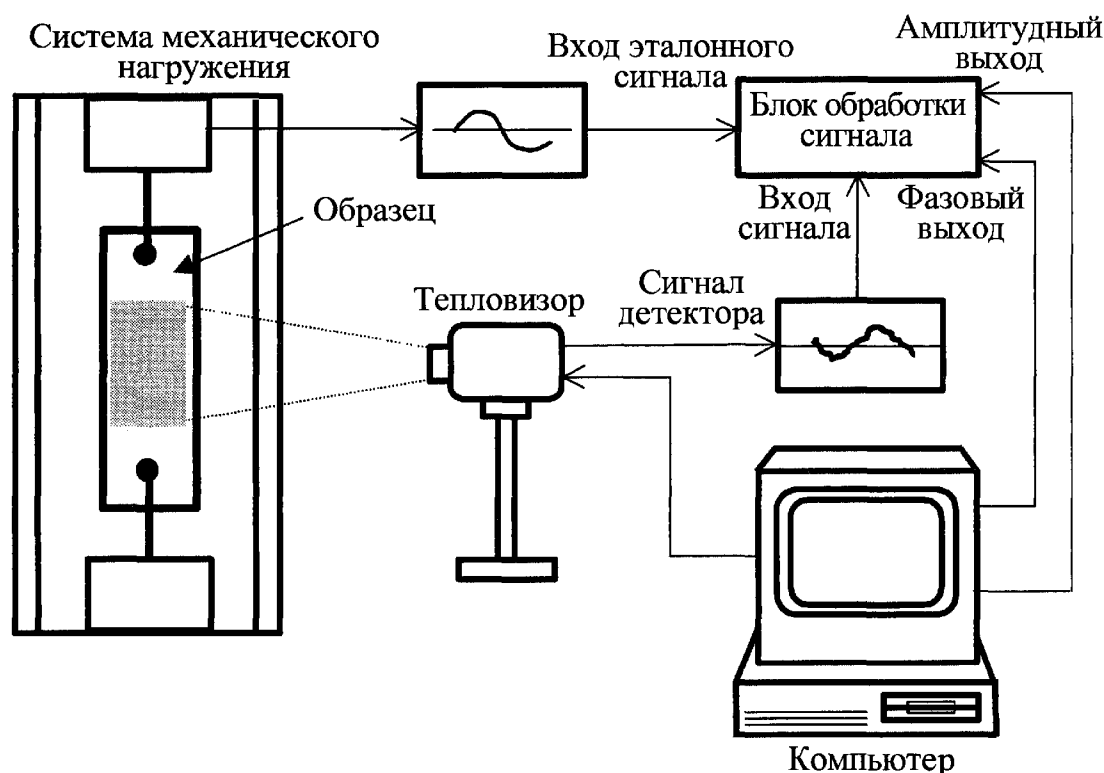


Рис. 6.38. Схема метода термографического анализа механических нагрузок (TSA) (адаптировано из [123])

метод неприменим для анализа процессов статического нагружения, а частотный диапазон измеряемых переменных напряжений составляет от долей Гц до нескольких килогерц. Амплитуда температурных сигналов, обусловленных термоупругостью, составляет от тысячных до сотых долей градуса, причем эти сигналы определяются только суммой главных нагрузок  $\sigma$ . Минимальное определяемое механическое напряжение в изделиях из алюминия ( $\sigma = 2$  МПа) соответствует относительной деформации 5 мкм/м.

Для анализа механических напряжений используют дифференциальные ИК термографические системы. Изменение температуры материала за счет термоупругого эффекта определяют, анализируя переменную составляющую теплового поля. Для повышения чувствительности метода дифференциальные температурные сигналы усредняют во времени, а также применяют принцип синхронизации, причем эталонный сигнал генерируется датчиком механических напряжений. Тогда тепловизионная система синтезирует два типа изображений, находящихся как в фазе, так и вне фазы с эталонным сигналом. Очевидно, что карта механических напряжений соответствует синфазному изображению.

Поскольку изменение температуры пропорционально сумме деформаций и не зависит от их направления, анализ термоупругости не в состоянии обеспечить информацию о компонентах и направлениях деформаций. Из уравнения (6.37) видно, что  $\delta T$  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 [129].

Уточненный вид уравнения термоупругости, связывающего скорости изменения температуры и нагрузки в однородном "туковском" материале при адиабатических граничных условиях, был предло-

жен А. Вонгом с соавторами в 1988 г. [130]

$$\rho C_\varepsilon \frac{\partial T / \partial \tau}{T} = - \left[ \beta + \left( \frac{\nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) I_1 \right] \times \\ \times (\partial I_1 / \partial \tau) + \left[ \frac{(1 + \nu)^2}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right] \times \\ \times \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} (\partial \sigma_{ii} / \partial \tau), \quad (6.38)$$

где  $T$  – термодинамическая температура, К;  $\sigma_{ii}$  – главные напряжения;  $I_1$  – сумма главных напряжений, Па;  $C_\varepsilon$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $E$  – модуль Юнга, Па;  $\nu$  – коэффициент Пуассона. В отличие от классического уравнения термоупругости (6.37), в уравнении (6.38) модули упругости являются функцией температуры, в результате чего эффективное значение величины  $K$  дается выражением [130]

$$K = \left( \beta - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma_m \right) (\rho C_\varepsilon)^{-1}, \quad (6.39)$$

где  $\sigma_m$  – средняя нагрузка.

Важным выводом, полученным на основе анализа уточненного уравнения термоупругости (6.38), является то, что температурный отклик материала, подвергнутого чисто гармоническому нагружению с частотой  $\omega$ , содержит две компоненты с частотами  $\omega$  и  $2\omega$ . 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 [130].

Процесс возникновения температурных градиентов зависит от частоты механического нагружения, что приводит к концепции *локального механического ре-*

зонанса [131]. 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.

### 6.14.2. Анализ разрушения материалов

Метод термографического анализа напряжений весьма полезен при исследовании процессов возникновения и развития трещин, как при циклической, так и при статической нагрузке. С ростом нагрузки происходит концентрация напряжений на микродефектах материала, что приводит, вначале, к появлению микротрещин, которые, при достижении критического уровня нагрузки, объединяются в магистральные трещины, вызывающие разрушение материала. В головке растущих трещин и в других зонах пластической деформации выделяется тепловая энергия, которая может служить индикатором как наличия трещин, так и направления их роста. Элементы теоретического анализа напряжений в головке трещины и экспериментальные результаты описаны в работах [131, 132].

Согласно теории Гриффитса разрушение есть процесс энергетической нагрузки структуры, то есть образование трещин приводит к изменению полной энергии структуры. При этом вводят понятие поверхностной энергии разрушения  $\gamma$ , а также характерного размера трещины  $l$ , равного половине длины трещины  $L$ . Основная формула Гриффитса определяет вклад в энергию системы упругой энергии в зависимости от длины трещины [133]

$$\Delta W = -\pi\sigma^2 l^2 / E, \quad (6.40)$$

где  $E$  – модуль Юнга и  $\sigma$  – приложенное на границе напряжение.

Критическое напряжение, вызывающее рост трещины, определяют по формуле

$$\sigma_{cr} = \sqrt{(2E\gamma)/(\pi l)}. \quad (6.41)$$

Будем считать, что площадь разрушения  $S = LH$ , где  $H$  – глубина трещины, и  $\gamma = \Delta W/S$ . Тогда длину трещины можно связать с выделившейся энергией в виде:

$$L = \frac{1}{\sigma_{cr}} \sqrt{\frac{2E\Delta W}{H}}. \quad (6.42)$$

### Металлы

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 [134], во Франции – М. Люонг [135].

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)  $\Delta W$  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  $\Delta W$  существенно не изменяется с увеличением числа циклов. Тем не менее, если циклическая нагрузка полностью обратима, деформация зависит от предыстории образца, поэтому величина  $\Delta W$  также изменяется в течение времени жизни изделия. Для размягчающихся материалов величина пластической деформации и энергия деформации  $\Delta W$ , 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 напря-

жений, выделяется энергия и повышается температура. Рост температуры в зоне локального сдвига плоскостей скольжения сопутствует инициации усталостной трещины. 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 при исследовании механизма усталостного разрушения конструкционных материалов, а также для обнаружения области пластической деформации в головке трещины при монотонном нагружении образца из стали [135].

В той же работе [135] 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.

### Строительные материалы

В последние годы в России и других странах произошли катастрофические разрушения ряда строительных сооружений, таких как здания, тоннели, мосты и т.п. Во многих случаях разрушения были связаны с действием внешних факторов (тектонических 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 имели место 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 аппарату-

ры 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 при 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. Оценки по формуле Томсона приводят к незначительным температурным сигналам в случае даже полного разрушения строительных материалов. В то же время, лабораторные исследования М. Люонга, показали, что при определенных типах и величинах нагрузок температурные градиенты могут достигать нескольких градусов [136]. На практике этот вывод не был подтвержден надежными экспериментальными результатами, а имеющиеся разрозненные данные (см. Главу 11) позволяют предположить, 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, то есть при действии солнечного нагрева, дождя, ветра, а также внутренних источников тепла.

**Пример.** Совместно с В.Н. Илюшенным автором выполнено ИК термографическое исследование процесса разрушения костной ткани человека при статическом нагружении. Анализировали разрушение 10-ти образцов диафиза бедренной кости толщиной 7 мм, подверженных нарастающей механической нагрузке постоянного знака (сжатию при постоянной скорости). Нагрузку прикладывали перпендикулярно к поверхности образцов с помощью цилиндрического стального пуансона диаметром 2,4 мм. Давление на цилиндрический пуансон создавали винтовым прессом, позволявшим регулировать величину нагрузки вплоть до разрушения образцов. Температурное поле регистрировали с частотой 6 термограмм в секунду с помощью тепловизора Thermovision 570. Динамика изменения температурного поля в одном из образцов показана на рис. 6.39 (пунктиром отмечен сам образец, зоны темного цвета слева и справа соответствуют губкам прессы).

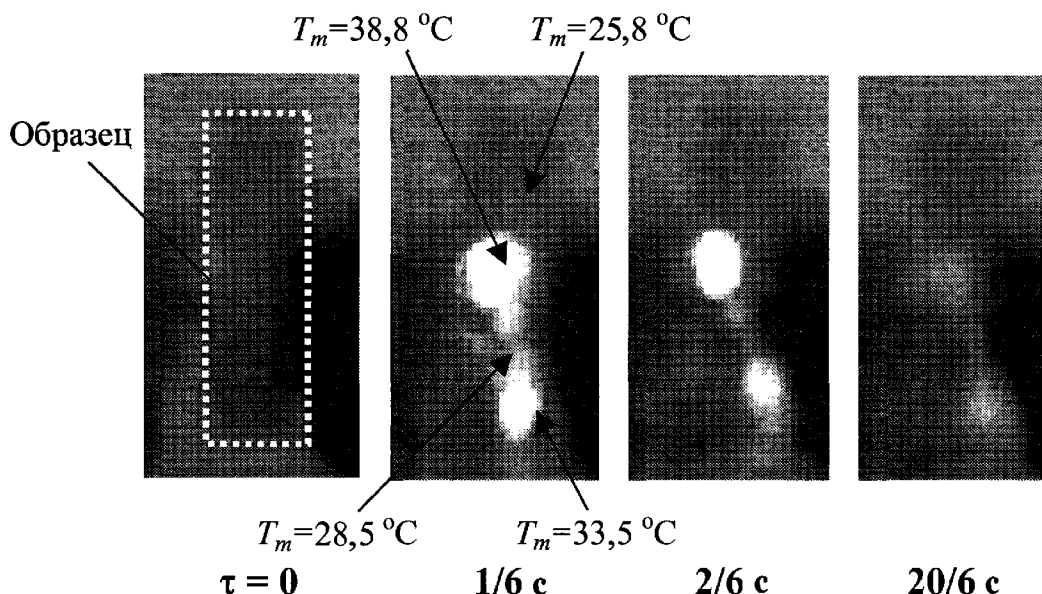


Рис. 6.39. Динамика разрушения образца костной ткани (указаны максимальные температуры в бездефектной зоне и зонах разрушения)

С нарастанием механических напряжений в материале кости начинают возникать микротрещины, что практически не вызывает изменений в температурном распределении на поверхности образца (см. первую термограмму на рис. 6.39). Затем, в структурно-слабых местах материала происходит слияние микротрещин в макротрещины с выделением тепловой энергии, что приводит к локальному повышению температуры уже через  $1/6$  с после приложения нагрузки; именно в этот момент времени наблюдаются максимальные температурные сигналы в очагах разрушения (соответственно,  $13\text{ }^\circ\text{C}$  и  $7,7\text{ }^\circ\text{C}$  на второй термограмме рис. 6.39). Используемая частота записи термограмм не позволила детально визуализировать процесс разрушения во времени. Феноменологически, уже в следующей термограмме ( $2/3$  с после появления видимых очагов разрушения) температура в очагах постепенно снижается, что соответствует энергетической "разгрузке" материала (см. две последние термограммы на рис. 6.39). Следует отметить наличие "мостика" микротрещин, который соединяет два более мощных очага разрушения и характеризуется более слабым повышением температуры (до  $3\text{ }^\circ\text{C}$  на рис. 6.39).

Покажем, что наблюдаемые величины температурных сигналов не могут быть обусловлены механическим гистерезисом даже при оптимальном циклическом нагружении кости. Значение константы упругости  $K$  для костной ткани в литературных источниках обнаружить не удалось, поэтому в соответствии с известными рекомендациями в теоретических оценках ниже принято, что костная ткань аналогична стеклу со следующими ТФХ:  $\rho = 2442\text{ кг/м}^3$ ,  $C = 837\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ,  $\lambda = 0,88\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$  и  $a = 0,43\cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ . Величина модуля упругости принята равной  $E_1 = 18\text{ ГПа}$  (большая берцовая кость человека) [137]. Следовательно, оценочное значение константы термоупругости для костной ткани равно  $K \sim 4,4\cdot 10^{-12}\text{ 1/Па}$ .

Согласно литературным данным, напряжение разрушения сжатием для кости составляет около  $128\text{ МПа}$  [137]. Тогда, по формуле (6.37), температурный сигнал, соответствующий разрушению костной ткани, равен  $\Delta T \sim 0,17\text{ }^\circ\text{C}$  при температуре образца  $300\text{ К}$ . Сигналы такого уровня могут быть уверенно зарегистрированы современными тепловизорами, но значительно ниже тех, что наблюдались в экспериментах по разрушению кости.

Выполним оценку величин  $L$  и  $\gamma$  на основе теории Гриффитса, исходя того, что повышение температуры в одном из очагов разрушения (рис. 6.39) составило  $\Delta T \approx 13\text{ }^\circ\text{C}$  в момент времени  $\tau \approx 1/6\text{ с}$  ( $\sigma_{cr} = 128\text{ МПа}$ ). Будем считать, что появление трещины эквивалентно появлению импульсного точечного источника тепла с энергией  $\Delta W$ , которое вызывает следующее температурное распределение

$$\Delta T = \frac{\Delta W / \rho C}{4(\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}}. \quad (6.43)$$

Используя (6.43), можно показать, что для приведенных выше ТФХ (точка  $r = 0$ , момент времени  $\tau \approx 1/6\text{ с}$ ) величина  $\Delta T = 13\text{ }^\circ\text{C}$  обусловлена выделением энергии  $\Delta W = 11,4\cdot 10^{-3}\text{ Дж}$ . Если принять глубину трещины равной толщине образца в зоне разрушения, то есть  $H = 7\text{ мм}$ , то формула (6.42) дает оценку размера трещины  $L \sim 2,7\text{ мм}$ . Соответственно, величина поверхностной энергии разрушения  $\gamma \approx 0,6\cdot 10^3\text{ Дж/м}^2$ , или  $6\cdot 10^5\text{ эрг/см}^2$ , что совпадает по порядку величин с данными, приведенными в [138] для материалов типа полиметилметакрилата и полистирола.

## 6.15. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИК ТЕРМОГРАФИЯ

Техника *электромагнитной ИК термографии* (ElectroMagnetic InfraRed – EMIR) была предложена Д. Балажа и другими в Управлении по авиации Франции в начале 1990-х годов [139]. "Фото-



тепловая" мишень (пленка из диэлектрика толщиной 10...25 мкм, покрытая субмикронным электропроводным слоем) поглощает часть энергии падающего на нее электромагнитного излучения миллиметрового/сантиметрового (СВЧ) диапазона и преобразует ее в тепло в результате фото-теплого эффекта. Таким образом, распределение температуры в пленке, фиксируемое тепловизором, отражает распределение энергии СВЧ излучения. Приращение температуры пленки оценивают по следующей формуле

$$\Delta T = \frac{W}{C\rho L + 2\alpha}, \quad (6.44)$$

где  $W$  – плотность поглощенной мощности;  $C$ ,  $\rho$ ,  $L$  – ТФХ и толщина пленки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности пленки.

Техника EMIR разработана, главным образом, для исследований распределения энергии в мощных СВЧ пучках (заметим, что близкий метод разрабатывался в СССР для анализа излучения мощных импульсных лазеров). Схема ее применения в одностороннем НК была представлена на рис. 1.2, *е*. Температурное распределение на поверхности пленки является результатом взаимодействия падающей и отраженной электромагнитной волны. Очевидно, что такая схема пригодна для испытаний ограниченного круга изделий и дефектов. Экспериментальные результаты получены для металлических вкладышей в углепластике и имитаторов мин в грунте, изготовленных из металлов и пластмасс. В последнем случае был использован СВЧ источник мощностью 150 Вт, работавший на частоте 2,45 ГГц [140].

### 6.16. ВИХРЕТОКОВАЯ (ИНДУКЦИОННАЯ) ИК ТЕРМОГРАФИЯ

Отличие метода *вихретоковой ИК термографии* (eddy current, induction thermography) от обычного ТК с оптической тепловой стимуляцией состоит лишь

в способе нагрева, который, тем не менее, также может быть как импульсным, так и периодическим. Согласно схеме контроля, представленной на рис. 1.2, *в*, индукционная катушка возбуждает вихревые токи в электропроводном материале. Тепловая энергия, генерируемая в результате резистивного эффекта, распространяется в изделии и обеспечивает обнаружение скрытых дефектов, как и в случае традиционного ТК.

Первые отечественные работы по данному методу, получившему название "вихретоко-теплого", были выполнены еще в бывшем СССР. Практически он был реализован в 1989 г. Й. Хартикайненом, Р. Лехтиниemi и др. (Университет г. Хельсинки, Финляндия), которые применили тепловую стимуляцию в диапазоне частот от 1 до 30 МГц и мощностью до 200 Вт в комбинации со строчно-сканирующим ИК радиометром, выполненным на базе фотодетектора HgCdTe [141]. Строчная развертка осуществлялась с частотой 100 Гц параллельно индукционной катушке, а объект контроля перемещался перпендикулярно направлению сканирования. Такой тепловой дефектоскоп с успехом применялся при испытаниях изделий из нержавеющей стали и углепластика (см. п. 8.2).

Для реализации принципа *индукционного синхронного детектирования* (induction lock-in thermography – ILT) несущая частота вихревых токов, составляющая, например, 100 кГц, модулируется с частотой 0,01...1 Гц. Мощность индуктора может достигать нескольких киловатт. К записанным последовательностям ИК термограмм применяют Фурье-анализ, в результате чего получают изображения амплитуд и фаз с отношением сигнал/шум выше, чем в случае оптического нагрева. Помимо металлов, данный метод применим также к углепластику и керамике, армированной углеродными волокнами (C/C-SiC керамика).

Методом вихретоковой термографии обнаруживали трещины в лопатках компрессоров, зубчатых шестернях и образ-

цах из стали, предназначенных для усталостных испытаний [142]. При контроле расслоений и ударных повреждений в керамике и углепластике данный метод обеспечивал результаты сходные со стандартной импульсной ИК термографией.

Диапазон контролируемых толщин материалов (глубин залегания дефектов) определяется несущей и модулирующей частотой. В металлах глубина проникновения вихревых токов  $l_{в.т}$  мала вследствие скин-эффекта и может быть рассчитана по следующей формуле [142]

$$l_{в.т} = \sqrt{\frac{2}{\pi f \mu k}} = \sqrt{\frac{2}{\pi f \mu_r \mu_o k}}, \quad (6.45)$$

где  $f$  – угловая частота;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость;  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  В·с/(А·м) – магнитная постоянная;  $k$  – проводимость, См/м. Например, принимая для стали  $k = 10^6$  См/м,  $\mu_r = 500$ , на частоте 100 кГц получаем  $l_{в.т} = 0,07$  мм, что существенно меньше длины тепловой диффузии. В углепластике глубина проникновения вихревых токов может достигать 50 мм ( $k = 10^3$  См/м,  $\mu_r = 1$ ,  $f = 100$  кГц), что обеспечивает объемный, а не поверхностный нагрев. В керамике наличие углеродных волокон приводит к анизотропии  $k$ , в результате чего на термограммах отчетливо видна ориентация волокон.

Разновидностью метода является нагрев движущимся индуктором (рис. 6.40), который был реализован при ТК авиационных сотовых конструкций, изготовлен-

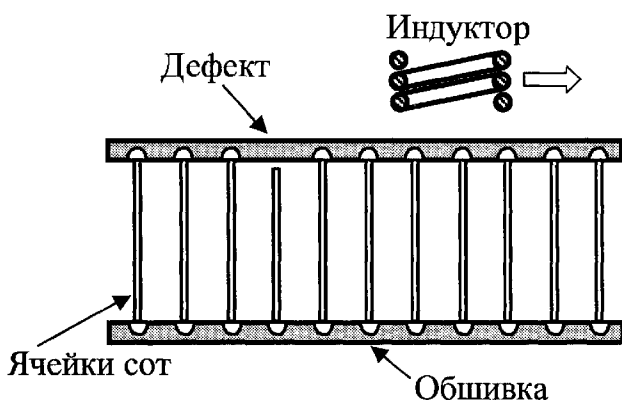


Рис. 6.40. Индукционная (вихретоковая) ИК термография сотовой конструкции

ных из алюминия и бора. Глубина проникновения вихревых токов частотой 100 кГц составляет 5 мм для алюминиевых сот и до 300 мм для бора [143]. Вертикальный стабилизатор самолета F-15 включает боро-эпоксидную обшивку и алюминиевые соты. Регулируя частоту, можно обеспечить преимущественный нагрев части алюминиевых ячеек, прилегающих к обшивке, в результате чего ИК термограммы показывают весьма отчетливое изображение отслоений обшивки на уровне отдельных ячеек.

### 6.17. 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. 6.41 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  $w_1 \dots w_n$  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 нулевым, пока его значение не превысит пороговое значение  $y_{thr}$ , которое активизирует нейрон:  $y = f_{sig}(S - y_{thr})$ , где  $f_{sig}$  – сигмоидная функция, например, вида

$y = 1/[1 + \exp(-kx)]$ . Нейрон, показанный на рис. 6.41, 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. 6.41 позволяют классифицировать относительно простые задачи. Более сложные нейронные сети должны содержать дополнительные слои. Например, на рис. 6.42 изображена трехслойная сеть, принадлежащая к семейству многослойных перцептронов. В структуру сети на рис. 6.42 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, применяя 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 сигналов 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 выбранных соответствующим образом тренировочных данных, которые можно получить экспериментально или теоретически.

Интуитивно можно предположить, что ТК с его зашумленными результатами испытаний представляет широкое поле для применения нейронных сетей. Нейронная сеть может быть эффективным инструментом тепловой дефектотрии: 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 другими из NASA (США) [144, 145]. Работа [144] посвящена обнаружению расслоений между алюминиевыми листами, соединенными внахлест. Нагрев панелей производили с помощью кварцевых ламп, последовательность зарегистрированных термограмм форматом  $256 \times 256$  вначале усредняли, после чего попиксельно вычисляли производную от температуры по времени.

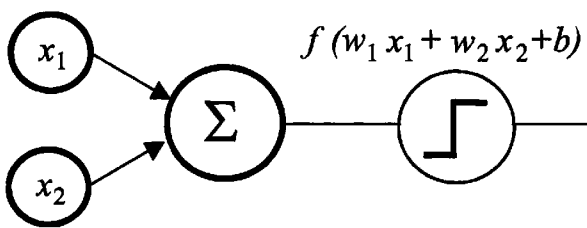


Рис. 6.41. Простой перцептрон с двумя входами и одним выходом

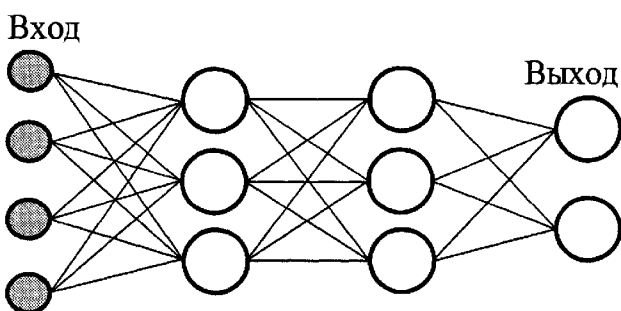


Рис. 6.42. Пример трехслойной нейронной сети

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. *Выключенное* состояние выходного нейрона (значение 0,75) соответствовало бездефектным зонам, а *включенное* (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 обучающих данных, процесс тренировки был весьма 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 "детектора дефектов" (flaw detector network), а вторая – "оценщика коррозии" (corrosion estimator network) [145]. Первая нейронная сеть, аналогичная описанной в работе [144], 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 поставляла 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 [146] описана нейронная сеть для обработки данных ТК, полученных по методу фазовой термографии. Обучение 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 были получены на сети с тремя слоями типа  $8 \times 21$ , в которой значения пиксельной фазы в 32-х изображениях, что соответствовало 32-м входам, подавали вначале на 8 нейронов, а затем на 21 нейрон, замкнутый на выход. При экспериментальной проверке возможностей этой сети ошибка определения глубины дефектов не превысила 10 %.

## 6.18. МЕТОД ФАКТОРИЗАЦИИ МАТРИЦ (АНАЛИЗ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ)

Основная задача факторизации матриц сводится к представлению данной матрицы в виде произведения двух других матриц. Применительно к ТК это требует преобразования трехмерной матрицы (последовательности) ИК изображений в двухмерную, причем колонки двухмерной матрицы отражают развитие температуры во времени, а строки содержат развернутые двухмерные термограммы. Предпочтение временным функциям отдается потому, что именно они содержат "отпечатки" дефектов контролируемого объекта. Задачи факторизации не всегда имеют точное решение, поэтому чаще всего рассматривают приближенные решения. В ТК исследовались три метода приближенной факторизации последовательностей ИК изображений: анализ *главных компонент* (principal component analysis – PCA), *факторизация неотрицательных матриц* (non-negative matrix factorization – NNF) и *анализ архетипов* (archetypal

analysis – АА) [147]. Ниже подробно рассмотрен метод анализа главных компонент (ГК), который был предложен К. Пирсоном еще в 1901 г., но приобрел популярность в НК только в последние годы. Как показал опыт автора (с использованием софтвера ThermoFit Pro), метод анализа ГК весьма пригоден для улучшения выявляемости дефектов, производя результаты, близкие к фазовому анализу; недостатком этого метода является трудность физической интерпретации изображений ГК. Два других метода факторизации находятся в стадии разработки. Предварительные исследования показали, что многообещающим является метод анализа архетипов, предложенный А. Катлером и Л. Брейманом в 1994 г. Данный метод сводится к выбору значимых комбинаций исходных данных, служащих в качестве архетипов. В ТК архетипами являются пиксельные функции изменения температуры во времени, и результаты применения метода поддаются интерпретации с точки зрения физики теплопередачи.

Анализ ГК основан на декомпозиции (разложении) сингулярных значений температурных сигналов. Например, преобразование Фурье переводит сигнал из пространственно-временной области в фазо-частотную. Однако использование базовых гармонических функций может быть неоптимальным для некоторых нестационарных сигналов. Декомпозиция

сингулярных значений, легко осуществляемая, например, с помощью программы MatLab, является альтернативным методом извлечения пространственно-временной информации из матрицы данных в компактной (упрощенной) форме. Пусть исходные данные представлены матрицей  $A$  размером  $M \times N$  ( $M > N$ ). Декомпозиция основана на следующей форме представления данных

$$A = USV^T, \tag{6.46}$$

где  $S$  – диагональная матрица  $N \times N$ , причем сингулярные значения  $A$  являются диагональными,  $U$  – матрица размером  $M \times N$ ,  $V^T$  – транспонированная матрица  $N \times N$  (характеристическое время). Преобразование (6.46) иллюстрируется рис. 6.43. Колонки матрицы  $U$  представляют собой набор эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), описывающих пространственную вариацию данных. С другой стороны, так называемые главные компоненты (ГК), представляющие собой вариацию сигнала во времени, являются строчными значениями матрицы  $V^T$ . Указанные особенности метода декомпозиции представляют интерес для анализа термографических данных.

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) использует метод декомпозиции для извлечения пространственной (ЭОФ) и временной (ГК)

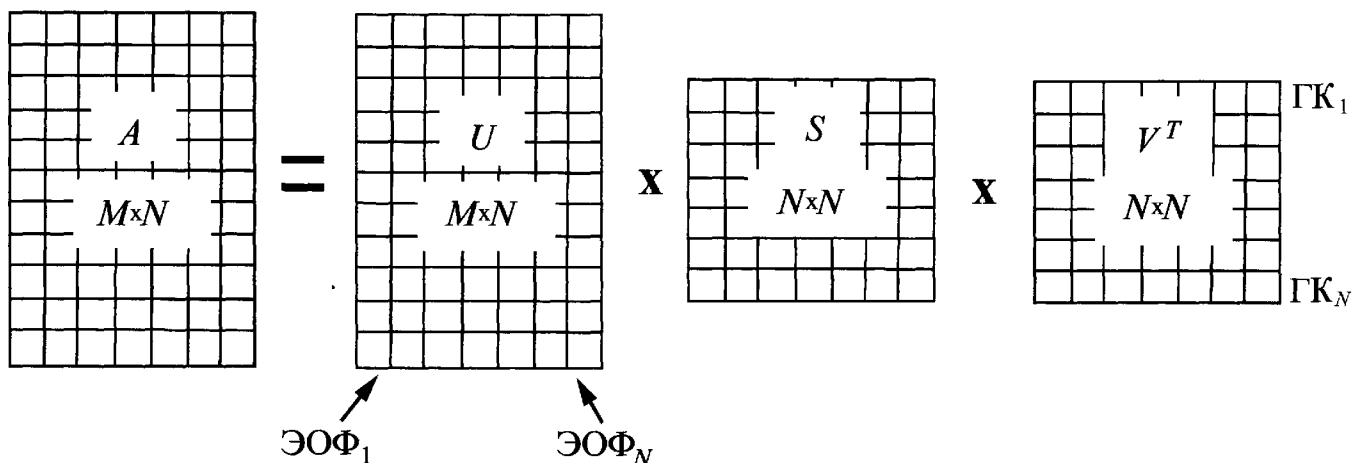


Рис. 6.43. Декомпозиция (разложение) сингулярных значений матрицы  $A$  на матрицы  $U$ ,  $S$  и  $V^T$

информации из матрицы термографических данных. Трехмерную матрицу преобразуют в двухмерную, в которой значения времени размещены в колонках, а пространственные данные расположены по "длинным" строкам, как это показано на рис. 6.44, а. Затем к двухмерной матрице применяют декомпозицию, и результирующая матрица  $U$  может быть снова представлена в виде последовательности изображений (рис. 6.44, б).

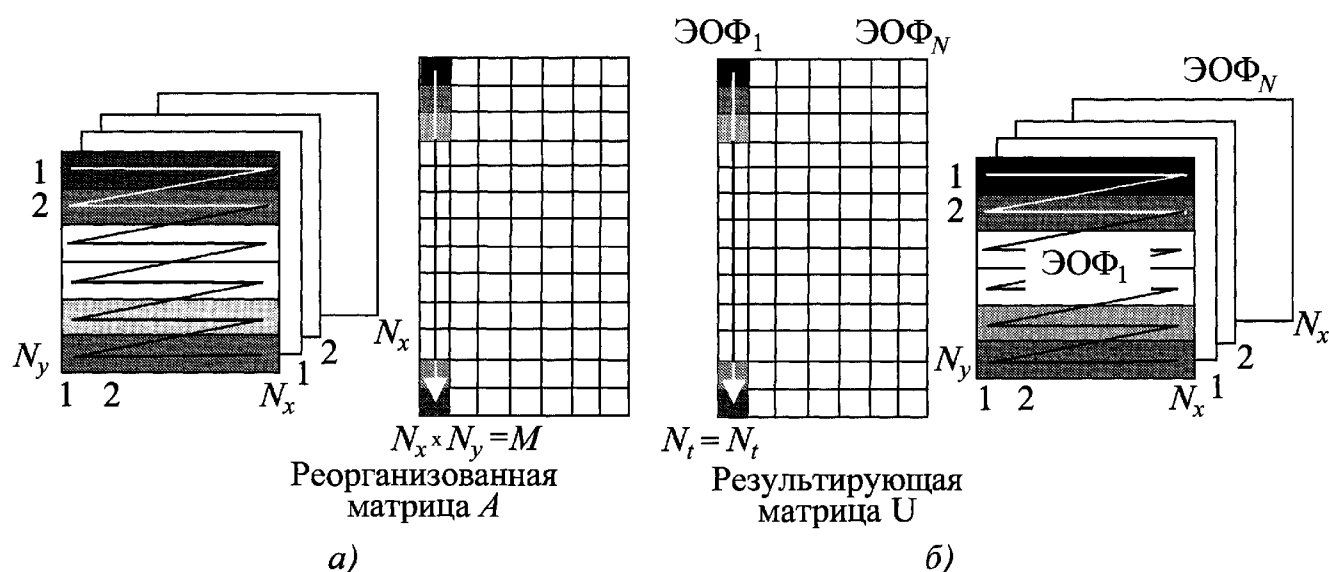
Вычисление ГК является полезной статистической процедурой, которая в последнее время приобретает все большее распространение в задачах распознавания образов и сжатия данных, в частности, при очень больших объемах анализируемых данных [148].

Метод применим к статистически распределенным данным с нулевым средним значением. Как показано выше, его суть состоит в вычислении ковариационной матрицы исходных данных, а также *собственных единичных векторов* (eigenvectors) и *собственных значений* (eigenvalues) этой матрицы. Собственные векторы располагают по порядку их значений от высшего к низшему, что дает компоненты статистического набора в порядке убывания их значимости. Пре-

небрегая низшими компонентами, можно понизить метрику задачи, например, исключить влияние конвективной теплоотдачи в многомерной тепловой модели. Выбирая из полученного списка собственных векторов наиболее значимые, получают *вектор характеристик* (feature vector), который представляет собой матрицу, состоящую из столбца собственных векторов. Наконец, умножая транспонированный вектор характеристик на вектор исходных данных, получают новый набор, выраженный в терминах тех собственных векторов, которые признаны значимыми.

В криминалистике метод ГК используют, например, 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 метод ГК применяется сравнительно недавно. Описано его применение для оценки пористости углепластика, из которого изготовлены сотовые панели самолетов [149]. Предварительную обработку данных проводили с помощью двухмерного вейвлет-преобразования, которое было применено к данным, полу-



**Рис. 6.44.** Преобразование термографических данных из трехмерной матрицы в двухмерную матрицу  $A$  (а) и последующее преобразование  $A$  в трехмерную матрицу, содержащую эмпирические ортогональные функции (б)

ченным во временной области. Пористость определяли косвенным образом путем вычисления температуропроводности в каждой точке образца. Данный метод был использован специалистами Управления по авиации Франции для расшифровки результатов промышленных испытаний металлических изделий с помощью ИК камеры, реализующей принцип "летающего пятна"; в частности, удалось повысить выявляемость открытых трещин в режиме автоматического контроля, причем на стадии обнаружения дефектов (после анализа ГК) использовали вейвлет-анализ.

### 6.19. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Процедуры обработки сигнала в ТК применяются, как правило, в предположении, что изделия имеют плоскую форму. При контроле изделий сложной формы возникают проблемы трудного доступа к отдельным участкам, недостаточного нагрева и появления ложных сигналов, обусловленных переотражениями и т.п.. Эмиссия и поглощение теплового излучения максимально в нормальном направлении (для диффузных отражателей это выражено законом Ламберта). При нагреве и визировании под углом, тепловые эффекты становятся более слабыми, а термограммы приобретают более сложный для интерпретации вид. В силу сказанного дефект В, изображенный на рис. 6.45, будет выявляться с большим трудом, нежели идентичный дефект А. Это требует принятия корректирующих мер, для чего используют ряд приемов, в частности, нагрев точечным источником, *видеотепловую стереометрию*, соответствующую калибровку данных и так называемый способ *восстановления формы изделия из нагрева* (Shape-from-Heating), который во многих случаях предпочтителен, поскольку не требует использования дополнительной аппаратуры. Этот способ предложен К. Малдагом и основан на теории

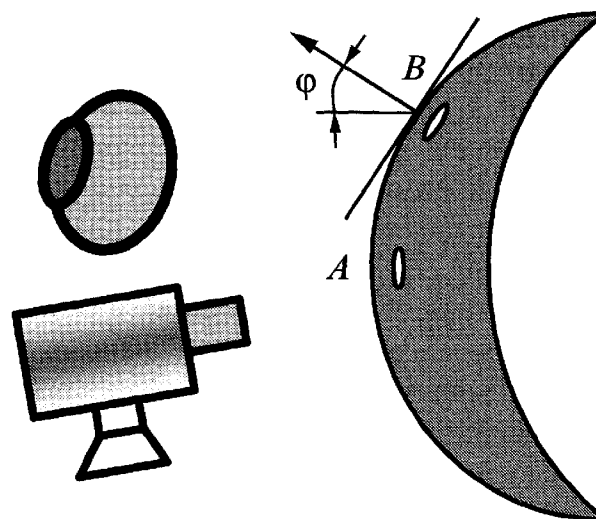


Рис. 6.45. ТК изделий сложной формы

"теневых форм" (Shape-from-Shading), которая разработана в рамках машинного зрения и адаптирована для ТК [5]. Форму объекта контроля идентифицируют по первым термограммам в последовательностях, где сигналы от скрытых дефектов не успели развиться. Фактически это означает стандартную нормализацию динамической последовательности, особенности которой описаны в п. 6.11. Обработку сигнала проводят в три этапа: сегментация изображения, идентификация формы и корректировка.

### 6.20. СТАНДАРТНАЯ ОБРАБОТКА ИК ИЗОБРАЖЕНИЙ

Весь предыдущий материал данной главы был посвящен развитому анализу результатов ТК, прежде всего, обработке последовательностей ИК изображений с помощью алгоритмов, которые учитывают различия во временном поведении температуры в дефектных и бездефектных зонах. 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 достичь, обрабатывая отдельные ИК изображения независимо друг от друга, т.е. в этом случае объектом обработки становится функция  $T(i, j)$ , описывающая отдельно взятое изображе-

ние. 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 [76], и мы рассмотрим лишь некоторые общие приемы, распространенные в ТК. При этом под цифровой обработкой изображений будут пониматься *анализ* и *манипуляции* с изображениями, производимые с помощью компьютера. В философском плане следует заметить, что любая обработка изображения приводит к его искажению, и вопрос заключается лишь в том, полезно или нет это искажение с точки зрения той цели, которую ставит перед собой пользователь (в НК такой целью является обнаружение дефектов и оценка их параметров). Юмористический аспект этой проблемы описан в Приложении 2.

Цифровое изображение состоит из пикселей, что хорошо видно при увеличении изображения (*zooming*) (рис. 6.46, см. цветную вкладку). Формат ИК изображений может изменяться от  $80 \times 80$  до  $1024 \times 1024$ . В последние годы наиболее популярен видеоформат  $320 \times 240$  элементов. С увеличением формата улучшается детальность изображения. Амплитуда каждого пикселя может быть представлена 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 бóльший динамический диапазон он может воспроизвести, поэтому в современных моделях ИК тепловизоров используют 14-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 технические 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*).

### 6.20.1. "Улучшение" изображений

Понятие "качество изображения" связано, с тем, для какой цели оно было создано (так, например, утилитарный взгляд на картины импрессионистов может подсказать идею обработать их фильтром высоких частот с целью сделать изображения более четкими). Поэтому под улучшением изображения (*enhancement*) понимают процедуры, которые делают его более приемлемым для конечного пользователя. Поскольку в статистическом смысле 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. 4.8.11).

### 6.20.2. Модификация полутоновой шкалы (изменение гистограммы)

В современных тепловизорах глубина оцифровки сигнала достигает 14 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 значением. 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 (рис. 6.47, см. цветную вкладку). Соответствующие функции, в ручном и автоматическом исполнении, встроены в современные тепловизоры.

### 6.20.3. Выбор цветовой палитры

Как отмечалось выше, тепловые изображения являются псевдоцветовыми, т.е. связь палитры цветов с температурой задается оператором. Существует большое количество палитр, входящих в программное обеспечение тепловизионных комплексов. На практике часто используют палитры "*Радуга*" (Rainbow) и "*Цвета каления железа*" (Iron). При правильном подборе палитры возможно представить зоны с близкими температурами с помощью контрастных цветов (рис. 6.47 и 6.48, см. цветную вкладку), однако не следует преувеличивать значение палитры для повышения достоверности обнаружения скрытых дефектов. Контрастные цветовые палитры (иногда называемые "хвостом петуха" – *cocktail*) плохо воспринимаются оператором, если на них имеется множество мелких деталей; поэтому, в течение длительного периода развития тепловидения профессионалы предпочитали иметь дело с черно-белыми термограммами. В частности, выполненное автором специальное исследование показало, что выявляемость дефектов по критерию Танимото (см. Главу 7) слабо зависит от вида представления термограммы оператору, включая цветные изображения различных палитр, а также черно-белые изображения, в том числе ксерокопии. Тем не менее, следует отметить, что палитра Iron может рассматриваться в качестве компромисса между цветным и черно-белым представлением изображений.

В целом, простое правило выбора палитры гласит, что высококонтрастные объекты следует просматривать с помощью низкоконтрастной палитры и наоборот.

### 6.20.4. 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 (*sharpening*). Действительно, при обработке изображений часто применяют фильтры высоких частот – ФВЧ (*high-pass filter*), 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. 6.49, цветная вкладка). Пример простого цифрового ФВЧ:

$$3 \times 3 \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad (6.47)$$

где  $3 \times 3$  означает размер маски, применяемой для фильтрации. Фильтрация в виде (6.47) является двухмерной, поскольку осуществляется в пространстве по двум поверхностным координатам. Аналогичные 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 эф-

фектов, связанных с изменением знака производной. От этого недостатка свободна процедура вычитания из исходного изо-

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, независимый от направления. В цифровой форме эту процедуру записывают в следующем виде

$$T(i, j) - \nabla^2 T(i, j) = 5T(i, j) - [T(i+1, j) + T(i-1, j) + T(i, j+1) + T(i, j-1)]. \quad (6.48)$$

Напомним снова, что 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.

### 6.20.5. Сглаживание

*Сглаживание* (smoothing) есть операция, обратная повышению резкости. Ее применяют, когда изображение содержит неприятный для зрительного восприятия высокочастотный шум, характерные размеры которого меньше размеров искомым дефектов (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 (low-pass filter);
- 2) медианный фильтр (median filter);
- 3) усреднение во времени (averaging).

Пример ФНЧ:

$$3 \times 3 : \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad 5 \times 5 : \frac{1}{25} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6.49)$$

Чем больше размер маски фильтра, тем на большей площади происходит сглаживание сигнала; маски размером более  $12 \times 12$  практически не используют, поскольку они приводят к слишком 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 часто возникал в цифровых изображениях после некачественной оцифровки. Поясним принцип работы медианного фильтра в одномерном варианте (применяется для фильтрации температурных сигналов во времени). Допустим, что 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 во времени.

### 6.20.6. Выделение границ областей

Выделение границ областей является типичной задачей сегментации изображений, которую решают с помощью градиентных фильтров. Фильтр Собеля осуществляет двумерное пространственное измерение градиента в исходном полутоновом изображении. Результатом его применения является темное поле с отчетливо видимыми границами областей, где имеет место максимальный градиент сигнала.

Для маски  $3 \times 3$

$$\begin{vmatrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ P_4 & P_5 & P_6 \\ P_7 & P_8 & P_9 \end{vmatrix}$$

практическая формула вычисления градиента имеет вид

$$G = |(P_1 + 2P_2 + P_3) - (P_7 + 2P_8 + P_9)| + |(P_3 + 2P_6 + P_9) - (P_1 + 2P_4 + P_7)|. \quad (6.50)$$

Пример применения фильтра Собеля к тестовому изображению рис. 6.50, а показан на рис. 6.50, б.

Эффективным градиентным фильтром является лапласиан, однако он весьма чувствителен к шумовым флуктуациям сигнала. Чаще используют комбинацию лапласиана и функции Гаусса (LoG фильтр). Функция Гаусса имеет вид

$$h(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.51)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ , или  $r^2 = i^2 + j^2$ .

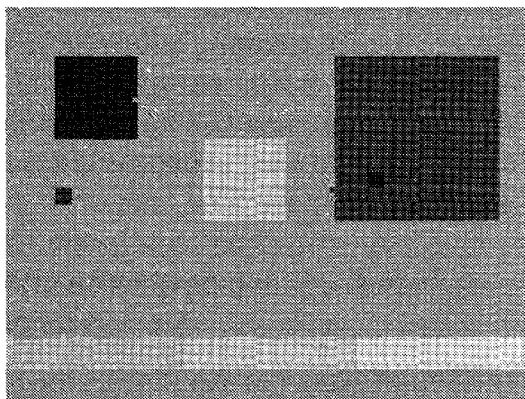
Маска фильтра, которая свертывается с основным изображением, получается в результате применения второй производной (лапласиана) к функции Гаусса

$$\nabla^2 h(r) = -\left[ \frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right] e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}. \quad (6.52)$$

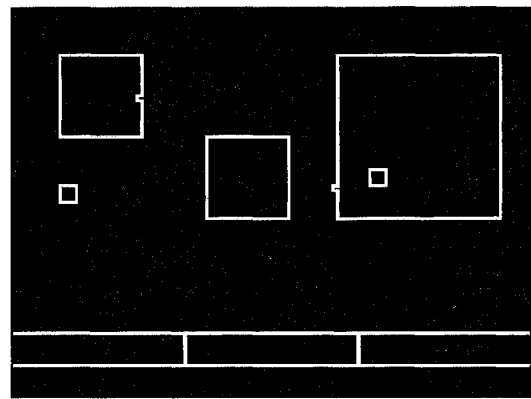
Свертка изображения с  $\nabla^2 h(r)$  эквивалентна сглаживанию функцией Гаусса и последующему вычислению второй производной, что приводит к новому изображению, в котором края областей представлены двойными краями. Точная граница областей находится между этими краями и определяется с помощью того или иного фильтра, фиксирующего переход функции через ноль.

При обработке изображений применяют центрированный относительно нуля LoG фильтр

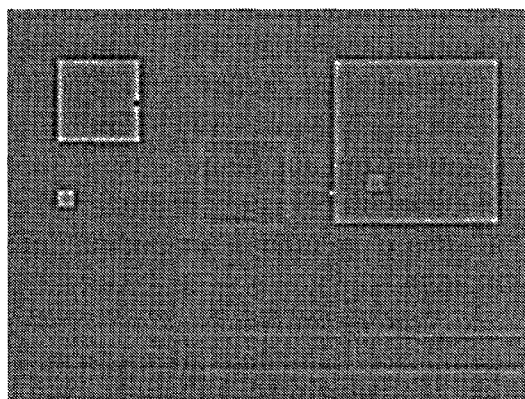
$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}. \quad (6.53)$$



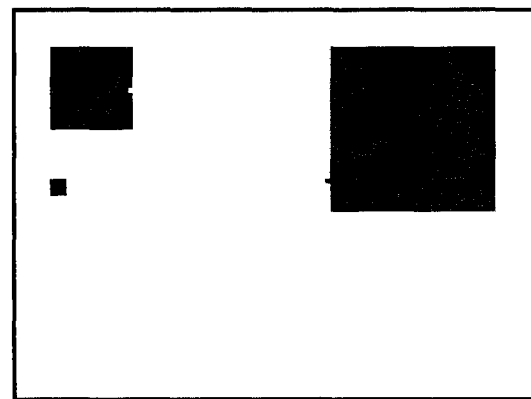
а)



б)



в)



г)

**Рис. 6.50. Сегментация изображений:**  
а – тестовое изображение; б – после применения фильтра Собеля; в – после применения Лапласиана гауссоиды; г – бинаризация по порогу

Маска *LoG* фильтра для  $\sigma = 1,4$  имеет следующий вид

0	0	3	2	2	2	3	0	0
0	2	3	5	5	5	3	2	0
3	3	5	3	0	3	5	3	3
2	5	3	-12	-23	-12	3	5	2
2	5	0	-23	-40	-23	0	5	2
2	5	3	-12	-23	-12	3	5	2
3	3	5	3	0	3	5	3	3
0	2	3	5	5	5	3	2	0
0	0	3	2	2	2	3	0	0

Пример применения этого фильтра приведен на рис. 6.50, в.

Простым способом выделения областей на изображении является его бинаризация. Глобальный или локальный (плавающий) порог бинаризации выбирают по гистограмме изображения, после чего пиксели, расположенные справа от порога изображаются белым цветом (1), а пиксели, расположенные слева от порога, представляются черными (0). Пример глобальной бинаризации показан на рис. 6.50, г.

### 6.20.7. Морфологическая фильтрация

В классическом виде морфологическая фильтрация является логической операцией, применяемой к бинарным изображениям и изменяющей формы областей интереса (ROI). Модификация пикселей производится в пределах перемещаемого по изображению *структурирующего элемента*, который может иметь различную форму и размеры; в качестве простого структурирующего элемента можно использовать маску  $3 \times 3$ . Морфологическая обработка основана на комбинации двух фундаментальных процедур, называемых *эрозией* (erosion) и *наращением*, или *дилатацией* (dilation). Дилатация наращивает объекты, поскольку в центре структурного элемента размещается единица, если элемент покрывает хотя бы один единичный пиксель обрабатываемого изображения. Соответственно, эрозия "съедает" объекты, поскольку структурирующий элемент добавляет в объект нулевые пиксели, если элемент покрывает

хотя бы один нулевой пиксель фона. При эрозии, например, единичный пиксель, окруженный несколькими нулевыми, делается также нулевым, поэтому такая процедура эффективно устраняет однопиксельный шум. Поскольку эрозия "съедает" края единичных областей (рис. 6.51, см. цветную вкладку), после нее применяют дилатацию, которая наращивает граничные пиксели, но не восстанавливает устраненные однопиксельные зоны.

Морфологическая фильтрация также применима к полутоновым изображениям. При этом дилатация означает размещение в центре структурирующего элемента максимальной пиксельной амплитуды из той части изображения, которая покрыта этим элементом. Соответственно, эрозия заключается в размещении минимального значения.

### 6.20.8. 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. 6.10.

### 6.20.9. Вычитание и деление изображений

В ряде случаев простые арифметические операции, такие как *вычитание* (subtraction) и *деление* (division), способны существенно снизить помехи, специфические для ТК (рис. 6.52, см. цветную вкладку). Например, вычитание эффективно в случае аддитивного шума, который в равной мере участвует в обоих изображениях. Деление, в свою очередь, снижает мультипликативную помеху, обусловленную, например, флуктуациями коэффициента излучения, однако в этом случае необходимо оперировать только с избыточными температурами нагрева и мириться с возрастанием высокочастотного шума.

### 7.1. 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.

Гипотезу о существовании невидимых тепловых лучей высказывал в своем сочинении "О природе вещей" еще Тит Лукреций Кар, живший до нашей эры. В 1790 г. М. Пикте опубликовал описание своего знаменитого опыта по фокусировке тепла и холода. 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. Л. Нобили создал первую термопару, работа которой была основана на термоэлектрическом эффекте, открытом Т. Зеебеком в 1821 г. Несколько лет спустя М. Меллони удалось с помощью термостолбика зарегистрировать тепловое излучение человека на расстоянии до 3 м.

Прообразом первых тепловизоров явилось устройство Д. Гершеля (сына 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 1857 г. А. Сванберг изобрел новый приемник ИК излучения – болометр. Усовершенствование этого прибора позволило Л. Ленгли в 1880 г. регистрировать тепловое излучение животных на расстоянии до 400 м. В 1892 г. Д. Дьюар предложил конструкцию сосуда для хранения сжиженных газов ("дьюара"), который на долгое время стал важной частью приемников ИК излучения.

В 1895 г. российский физик П.Н. Лебедев, прославившийся исследованием светового давления, предложил вакуумный термоэлемент, который оставался длительное время самым чувствительным детектором излучения. В 1898 г. другой известный российский физик А.Г. Столетов разработал газонаполненную фото ячейку, работавшую на основе внешнего фотоэффекта.

В 1900 г. произошло второе рождение ИК техники 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 стороны – прогрессом в технологии ИК приемников. Патентная литература начала XX-го 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 (1919 г.) позволяла обнаруживать человека на расстоянии до 200 м, а самолет – до 1600 м. В годы первой мировой войны был создан популярный фотоприемник на основе сернистого таллия –

таллофид. В 1917 – 1920 гг. Т. Кейз создал фоторезисторы для ближнего ИК диапазона. Эти приемники использовались в системе связи, принятой Германией на вооружение в 1935 г. В 1927 г. М. Черни развил идею эвапорографа Д. Гершеля, применив вместо испарения спирта возгонку нафталина и камфары. В наиболее чувствительных ИК системах того времени использовали различные варианты болометров.

Перед Второй мировой войной начались систематические исследования воздействия теплового излучения на полупроводники. Были разработаны охлаждаемые фоторезисторы на основе сульфида свинца. Объем их выпуска в Германии достигал 4 тысяч штук в месяц.

Первый электронно-оптический преобразователь (ЭОП) был сконструирован в 1934 г. Д. Холстом. В эти годы М.Л. Венгринов и независимо М. Голей предложили конструкцию фотоакустического (пневматического) ИК приемника. 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 ("снуперскопы" и "снайперскопы"), которые обеспечивали прицельную стрельбу из стрелкового оружия на расстояниях до 90 м.

Первые приборы *ночного видения* (night vision) работали в ближнем ИК диапазоне по активному принципу, т.е. требовали внешней подсветки сцены ИК прожекторами (лампами-фарами мощностью 100...200 Вт, закрытыми ИК фильтрами). Пассивные ИК системы того времени обнаруживали высокотемпературные объекты, например, выхлопы самолетных двигателей, на расстоянии до 32 км.

В 1941 г. в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ, СССР) С.М. Лучинин разработал первый в мире быстродействующий полупроводниковый болометр (площадь чувствительного элемента  $0,1 \times 0,12$  мм, постоянная времени 0,003 с, пороговый поток

$10^{-7}$  Вт Гц<sup>-1/2</sup>). Первые эксперименты 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 отечественные береговые системы обнаружения, которые использовали фокусирующие зеркала диаметром до 1,5 м и термоэлементы.

Эксперименты в области визуализации тепловых полей (тепловидения) с использованием различных физических эффектов, в частности, эвапорографии, проводились еще до второй мировой войны, в том числе и в России.

В годы Второй мировой войны в СССР системы ИК обнаружения были использованы при охране конвоев союзников, а в армию поступили первые образцы приборов ночного видения, разработанных под руководством С.М. Николаева. 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 Корею. 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 бывшем СССР. Промышленный эвапорограф ЭВ-84 был создан Г.П. Фаерманом, В.Н. Синцовым и др. Полупроводниковые детекторы ИК излучения разрабатывались В.А. Хрусталевым, В.С. Кузьминым и др. Одновременно велись работы по созданию преобразователей ИК изображений, основанных на других физических принципах. В 1946 г. появились люминесцентные преобразователи (метаскопы), которые, не получив дальнейшего распространения, были вытеснены оптико-механическими устройствами.

Сканирующие тепловизоры с болометрами разрабатывались еще в годы второй мировой войны в Германии, Англии, Франции.

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. В этих тепловизорах была предусмотрена только строчная развертка сцены, поскольку кадровую развертку осуществляли за счет перемещения летательного аппарата относительно поверхности Земли.

Первые портативные тепловизоры, использовавшие 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. Модель *показывающего* тепловизора AN/PAS 110 использовала 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. Тепловизор имел массу около 10 кг, включая пояс с аккумуляторами, и использовался в технической диагностике, а также в системах наблюдения и охраны.

В СССР в 1961 г. М.М. Мирошников продемонстрировал тепловой след, оставшийся через 30 минут от человека, лежавшего на деревянном полу. Было возможно 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 для военных тепловизионных систем опция измерения температуры не

являлась приоритетной. Энергетический кризис 1970-х годов обеспечил государственную поддержку двум шведским фирмам-AGA (ныне FLIR Systems, США) 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 имела массу 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). Модель Thermovision-680 (1968 г.) со сменной оптикой стала первым коммерческим тепловизором, получившим широкое распространение. Введение аккумуляторного питания в следующую модель Thermovision-750 превратило ее в портативный прибор, однако измерение температуры требовало размещать в поле зрения эталонный излучатель. В 1978 г. была разработана модель Thermovision-780, в которую был введен встроенный эталон температуры и использована запись термоизображений на видеопленку.

В 60-е годы прошлого века благодаря работам М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского и других 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. Эти работы основывались на пионерских исследованиях Н.Н. Красногорского (1942 г.) и Р. Лоусона (1956 г.) по применению тепловидения в медицине.

В период с 1970 по 1990 гг. прогресс гражданского тепловидения, по крайней мере, в Европе, был по-прежнему связан с работами шведской фирмы AGA (AGEMA Infrared Systems). В 1986 г. фирма отказалась от охлаждения ИК приемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрический холодильник, а также встроенный процессор для расчета температуры и калибровки в реальном времени. В 1988 г. на рынке появились тепловизоры Thermovision-400 массой около 7 кг, которые в течение нескольких лет оставались непревзойденными приборами для полевой ИК съемки.

Отечественные разработки в 80 – 90-х 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 которой совместно с Азовским оптико-механическим заводом были созданы тепловизоры как военного, так и гражданского применения: "Филин", "Рубин", "Алмаз", "Радуга", "Статор", "Вулкан" и их модификации [1]. 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 отечественной элементной базы. Основными проблемами того периода было налаживание производства фотоприемников на основе InSb и HgCdTe, оптических материалов ИК диапазона (кремния, германия и ИК стекол), а также прецизионных оптико-механических систем сканирования. Упрощение требований к некоторым параметрам тепловизоров, например, за счет увеличения времени кадра, позволило организовать выпуск тепловизоров малой серии АТП (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики – МИРЭА). Наконец, в МНПО "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 пучках, 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), ФГУП "Орион" и некоторых других организациях, однако их параметры остались неизвестными широкому потребителю.

Интересные сведения о драматических перипетиях истории разработки ИК приемников и военных тепловизоров в СССР были сообщены в 1998 г. Л.Н. Курбатовым на Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике, электронным и ионно-плазменным технологиям. В частности, недооценка возможностей фотоприемников на основе антимонида индия затормозила создание отечественных военных тепловизоров во второй половине XX-го века. Затем история повторилась с отечественными приемниками на тройных соединениях (КРТ), хотя на пике разработки их параметры были выше зарубежных. Например, уже к 90-м годам прошлого века были созданы отечественные линейки фотоприемников, использованные в прототипе тепловизора "Прогресс". Тем не менее, в СССР так и не был налажен серийный выпуск тепловизионных приборов ночного видения и танковых прицелов, которые были столь необходимы во время операции советских войск в Афганистане. В последние годы вследствие причин экономического характера проявилось отставание отечественных работ от зарубежного уровня в области создания неохлаждаемых микроболометрических матриц (отметим работы Н.В. Кравченко).

Существенный вклад в разработку отечественной тепловизионной аппарату-



ры тех лет внесли М.М. Мирошников, Р.Н. Иванова, А.Г. Жуков, П.Ф. Тимофеев, А.И. Горячев, И.И. Таубкин, В.Е. Абрамчук, Г.А. Падалко, Н.Д. Куртев, В.И. Хахин, А.В. Кормушкин, С.С. Воронцов, В.Г. Федчишин, С.П. Морозова и 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 объектива (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 миниатюрный холодильник Стирлинга. Тепловизоры Thermovision 500-й (позднее 600-й) серии с массой около 2 кг, а позднее FPA-тепловизоры, использующие фотоприемники на квантовых ловушках (Quantum Well Infrared Photodetectors – QWIP), фактически ознаменовали появление систем ИК видения, доступных широкому потребителю.

В середине 90-х годов произошло слияние трех крупнейших производителей ИК аппаратуры: FLIR (США), Inframetrics (США) и AGEMA Infrared Systems (Швеция). С начала XXI-го века после приобретения компании Indigo Systems (США), а затем CEDIP (Франция), фирма FLIR Systems является самым крупным мировым производителем тепловизоров гражданского применения. Фирма выпускает тепловизионную аппаратуру широкой номенклатуры, предназначенную для:

1) научных исследований (прибор SC 6000 с возможностью записи динамических последовательностей ИК термограмм в реальном времени с температурным разрешением до  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

2) полевых съемок и инспекций промышленных установок (прибор ThermaCam P60 с неохлаждаемым приемником излучения, цифровой записью ИК термограмм на РСМСІ карту и параллельным видеоканалом; в 2002 г. выпущен сравнительно

недорогой измерительный тепловизор ThermaCam E2 массой 0,7 кг и его последующие многочисленные версии);

3) наблюдения объектов, или ночного видения (прибор ThermaCAM Scout);

4) мониторинга объектов с борта летательного аппарата (прибор ThermaCAM 1000 с высоким пространственным разрешением и наличием аксессуаров, позволяющих размещать прибор в специальном контейнере (gimbal) под самолетом и вертолетом и управлять им из кабины). Следует отметить другие известные мировые фирмы производители тепловизоров высокого качества: Raytheon (США), Santa Barbara Focal Plane (США), Mikron (США), NEC (Япония), AEG Infrarot-Module и Jenoptik (Германия).

В 2002 г. на мировом рынке заявили о себе китайские производители тепловизоров (фирмы WuHan Guide Electronic Industrial и Guangzhou Sat Infrared), использующие французские матричные детекторы производства фирмы ULIS.

В целом, мировой рынок ИК тепловизоров в последние годы претерпел значительные изменения, обусловленные, во-первых, окончанием холодной войны между двумя политическими системами, что сократило военные бюджеты сторон, а во-вторых, разработкой технологии изготовления неохлаждаемых матричных детекторов ИК излучения. В результате появились системы двойного назначения (dual use), которые могут использоваться и в военной, и в гражданской сферах. При этом рынок систем двойного назначения включает тепловизоры как с охлаждаемыми, так и с неохлаждаемыми детекторами, тогда как неохлаждаемые матричные тепловизорами в принципе являются приборами двойного назначения.

В 1999 г. объем мирового рынка тепловизоров коммерческого и двойного назначения составлял 660 миллионов долларов США. По оценкам Г. Фуллопа, ведущего американского аналитика в области ИК систем, к 2006 г. планировался рост этого рынка до 2,6 миллиарда долларов

США, главным образом за счет широкого внедрения недорогих систем ночного вождения автомобилей. Пионером данного применения явилась фирма Raytheon, впервые установившая тепловизор на автомобиле Cadillac DeVille 2000. В течение нескольких лет эта новая область применения тепловизоров должна изменить профиль мирового рынка.

Разработки российских тепловизоров в последнюю декаду продолжали идеи, воплощенные в более ранних моделях, но с учетом новых технологических возможностей, прежде всего, с использованием цифровой обработки и накопления результатов измерений. Примером такого тепловизора является прибор ИРТИС-2000, в котором продолжает использоваться медленное оптико-механическое сканирование, что, с одной стороны, делает его малоприменимым для НК материалов, но, с другой стороны, обеспечивает высокие метрологические показатели и приемлемое качество

термограмм при использовании в технической диагностике. Конкурентоспособность прибора на российском рынке поддерживается его относительно невысокой ценой, однако здесь растущую конкуренцию составляют западные портативные FPA системы с матрицами  $80 \times 80$  и  $160 \times 120$  (в последние годы –  $320 \times 240$ ) элементов, а также тепловизионные модули, предоставляющие широкие возможности для конструирования тепловизоров. В последние годы появились отечественные тепловизоры, использующие как западные (модель ТН-4604, НПО "Спектр", Москва), так и отечественные (модель ТКВр-ИФП, Институт физики полупроводников, Новосибирск) матричные детекторы ИК излучения, однако в данных приборах не решена проблема измерения температуры, в особенности, если речь идет о неохлаждаемых матрицах.

Хронология развития ИК техники и тепловидения приведена в табл. 7.1.

### 7.1. Хронология развития ИК термографии [11, 150]

1758	М.В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения
1762	М.В. Ломоносов создал зеркала с высокой отражающей способностью.
1800	У. Гершель открыл ИК излучение, названное им "тепловыми лучами" (calorific rays)
1821	Л. Нобили изобрел термопару
1840	Д. Гершель получил видимое изображение ИК излучения, проектируя солнечный спектр на поверхность тонкой бумаги, покрытой углеродной сажей и смоченной спиртом
Конец XIX-го века	Исследования П.Н. Лебедева и А.Г. Столетова в области внешнего фотоэффекта
1900	М. Планк открыл основной закон теплового излучения
1905	Изготовлена фотопленка, чувствительная к излучению с длиной волны до 800 нм
1927	В СССР – исследования С.И. Покровского, Б.П. Козырева, В.А. Гурова по ИК обнаружению военных кораблей
1929	М. Черни создал "эвапорограф" в качестве первого ИК термографа
1932	Первое свидетельство наличия CO <sub>2</sub> в атмосфере Венеры получено У. Адамсом и Т. Данхэмом путем ИК фотографирования отраженного солнечного излучения
1934	Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) на длины волн до 1,5 мкм разработан Д. Холстом с сотрудниками

Продолжение табл. 7.1

1942	Первое военное применение ИК визуализирующей системы продемонстрировано в Форте Бельвуар, США
1946	Первый военный ИК строчный сканер со временем кадра 1 ч разработан в США
1954	ИК сканер со временем кадра 45 мин, США
1958	Первый ИК прицел для военных применений, США
1950 – 1960 гг.	Первый коммерческий эвапорограф, США
1960-е гг.	ИК сканеры создают изображения за 5 мин, становление российского тепловидения в исследованиях М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского, М.А. Собакина
1961	П. Линдберг и Х. Холмберг разработали сканирующую систему с использованием вращающихся призм
1964	Фирма Texas Instruments разработала первую "впередсмотрящую" ИК систему (FLIR)
1965	На рынке появился первый коммерческий ИК тепловизор AGA-650 (фирма AGA, Швеция)
1967	Фирмой AGA получена первая электронная цветная термограмма
1972	Разработан измерительный двухканальный ИК тепловизор Dynarad 210, США
1973	Портативный ИК тепловизор AGA 750 с питанием от аккумуляторов, Швеция
1974	Малогабаритный ("ручного" применения) ИК тепловизор Hughes Probeye, США
1977	ИК тепловизор Inframetrics 510 с телевизионным выходом, США
1978	Двухканальный аналоговый ИК тепловизор AGA 780 для научных исследований, работающий в реальном времени, Швеция
1970 – 1980 гг.	В СССР разработаны тепловизоры "Факел", "Рубин", ТВ-03, "Радуга", ИФ-10ТВ, АТП, "Лазеровизор"
1980	Длинноволновый пироэлектрический видикон ISI VideoTherm
1984	Портативный ИК тепловизор Inframetrics 600 с питанием от аккумуляторов и измерением температуры в реальном времени, США
1987	Одноблочный ИК тепловизор AGEMA 470 со встроенной цифровой записью термограмм, Швеция
1987	Первый тепловизор Mitsubishi IR-5120 на матричном ИК FPA-детекторе с холодильником Стирлинга, Япония
1990	В СССР разработаны охлаждаемые линейки фотоприемников, предназначенные для использования в тепловизорах военного применения
1993	Малогабаритная FPA ИК камера InfraCAM фирмы Inframetrics на стандартных аккумуляторах с холодильником Стирлинга, США
1995	Полнофункциональный тепловизор камкордерного исполнения ThermaCAM фирмы Inframetrics со встроенными измерительными функциями и цифровой записью, США

Продолжение табл. 7.1

1997	Первая низкостоимостная ИК камера типа snap-shot (ИК фотоаппарат) на базе линейного сканера (Infrared Solutions IR Snapshot)
1997	Тепловизор AGEMA 570 на базе неохлаждаемого болометрического матричного детектора, Швеция
1999	Первый коммерческий тепловизор SC 3000 фирмы FLIR Systems на базе QWIP детектора, США
2000	Тепловизор с записью ИК и видеоизображений, звука и текста ThermaCAM PM 695 фирмы FLIR Systems, затем модель ThermaCAM P65 той же фирмы
2003 – 2009 гг.	На рынке появились низкостоимостные измерительные тепловизоры на базе неохлаждаемых FPA – приемников излучения с форматом изображения $80 \times 80$ и $160 \times 120$ (фирмы FLIR Systems, NEC, Raytek, Irisys и др.), а также тепловизионные модули. Одновременно частота записи термограмм повысилась в специальных моделях до нескольких сотен (в специальных случаях – тысяч) герц

## 7.2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 7.2.1. Спектр электромагнитных колебаний и энергетические величины

*ИК термография*, или *тепловидение*, есть метод дистанционной визуализации и регистрации тепловых полей объектов, прежде всего, с целью анализа их температурных полей. Электромагнитное (тепловое или ИК) излучение возникает в твердых телах, жидкостях и газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. ИК излучение занимает широкий диапазон электро-

магнитного спектра с длинами волн от 0,75 мкм до 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами (см. рис. 7.1). В научно-технической литературе можно найти различные разбиения ИК диапазона на суб-диапазоны. Например, согласно рекомендации Международного светотехнического словаря выделяют коротковолновой участок ИК спектра (ближняя область) от 0,76 до 1,4 мкм, средневолновой участок (средняя область) от 1,4 до 3 мкм и длинноволновой участок (дальняя область), который простирается 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,

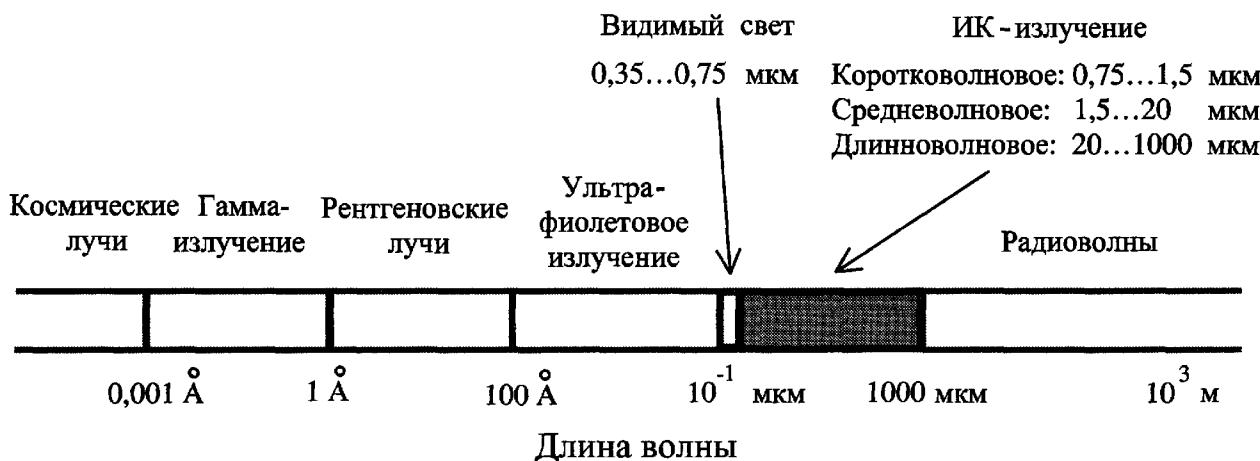


Рис. 7.1. Спектр электромагнитных колебаний

что связано со спектральной чувствительностью популярных ИК детекторов на основе антимонида индия (InSb) и тройных соединений (CdHgTe).

В табл. 7.2 приведены основные энергетические величины и единицы их измерения, используемые в теории ИК излучения.

**7.2. 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]
Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения, излучательность) Radiant exitance	$R = d\Phi / dF$	[Вт/м <sup>2</sup> ]
Энергетическая освещенность (облученность, плотность мощности, плотность дозы, радиация) Irradiance, dose-rate	$E = d\Phi / dF$	[Вт/м <sup>2</sup> ]
Энергетическая яркость (лучистость) Radiance	$L = \frac{I}{dF \cos \Theta}$	[Вт/(м <sup>-2</sup> · ср)]

**7.2.2. Законы теплового излучения**

Согласно закону Планка, спектральная поверхностная плотность потока излучения физического объекта определяется его температурой  $T$  и спектральной излучательной способностью (коэффициентом излучения)  $\varepsilon_{\lambda}$ :

$$R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) = \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad [\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}];$$

$$C_1 = 3,7418 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^4; \quad (7.1)$$

$$C_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Закон Планка первоначально был выведен для абсолютно черного тела (АЧТ – Black Body), которое испускает максимум возможной при данной температуре энергии, что имеет место при  $\varepsilon_{\lambda}^{\text{АЧТ}} = 1$ . Классическая запись закона Планка имеет вид

$$R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}. \quad (7.2)$$

Для  $\lambda T < 5000$  (мкм·К) справедлива формула Вина

$$R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad (7.3)$$

Для  $\lambda T > 10^5$  (мкм·К) имеет место приближение Релея-Джинса

$$R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) = 2C_1 T / (C_2 \lambda^4) \quad (7.4)$$

В ТК величина  $\lambda T$  обычно изменяется от 800 до 5000 мкм·К, что соответствует спектральному диапазону от 3 до 14 мкм и температуре объектов от 0 до +100 °С, следовательно, возможно использование формулы Вина (7.3).

Практические расчеты по общей формуле Планка удобно проводить, если записать ее в безразмерном виде:

$$y = 142,32 x^{-5} [\exp(4,9651/x) - 1]^{-1};$$

$$x = \lambda / \lambda_m; \quad y = R_{\lambda}^{\text{АЧТ}} / R_{\lambda_m} \quad (7.5)$$

Графики функции Планка  $R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}$  для различных температур АЧТ согласно формулам (7.2) и (7.5) показаны на рис. 7.2, откуда следует, что:

1) для каждой температуры максимум излучения имеет место на определенной длине волны, которая возрастает с уменьшением температуры;

2) мощность излучения резко падает с уменьшением температуры.

Вышеуказанные особенности теплового излучения тел выражаются соответственно законами Вина и Стефана-Больцмана.

Закон Вина для длины волны  $\lambda_m$ , характеризующейся максимальным значением функции Планка, имеет следующий вид

$$\lambda_m [\text{мкм}] = \frac{2898}{T [\text{K}]} \approx \frac{3000}{T} \quad (7.6)$$

Например, если принять, что поверхность тела человека (в одежде) имеет температуру около 300 К, то длина волны максимальной мощности излучения составляет около 10 мкм.

В диапазоне длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  поверхностную плотность потока излучения определяют по формуле

$$R(T, \varepsilon_{\lambda}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) d\lambda \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (7.7)$$

Спектральный ход коэффициента излучения  $\varepsilon_{\lambda}$  может быть весьма причудливым, в особенности у газов, которые характеризуются линейчатым спектром излучения. Для многих твердых и жидких тел, называемых *серыми*, зависимостью коэффициента излучения от длины волны можно пренебречь, тогда

$$R(T, \varepsilon) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda = \varepsilon R^{\text{АЧТ}}(T, \tau) \quad (7.8)$$

Значения интеграла  $R^{\text{АЧТ}}$  в формуле (7.2), описывающего поверхностную плотность потока излучения АЧТ в отдельных спектральных интервалах, табулированы [151]. В ИК термографии преимущественно используют коротковолновый (3...5,5 мкм) и длинноволновый (7...14 мкм) спектральные диапазоны, что соответствует, с одной стороны, окнам преимущественной прозрачности атмосферы, а с другой стороны, подкреплено наличием распространенных приемников излучения, в частности, на основе InSb и CdHgTe. Кроме того, согласно закону Вина, в указанных диапазонах сосредоточена основная мощность излучения тел при температурах от 0 до +100 °С.

В диапазоне длин волн от 0 до  $\infty$  поверхностная плотность потока излучения выражается законом Стефана-Больцмана:

для АЧТ

$$R^{\text{АЧТ}}(T, \lambda = 0 \dots \infty) = \sigma T^4, \quad (7.9)$$

для серого тела

$$R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \dots \infty) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (7.10)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Тепловое излучение, плотность потока которого описывается формулами

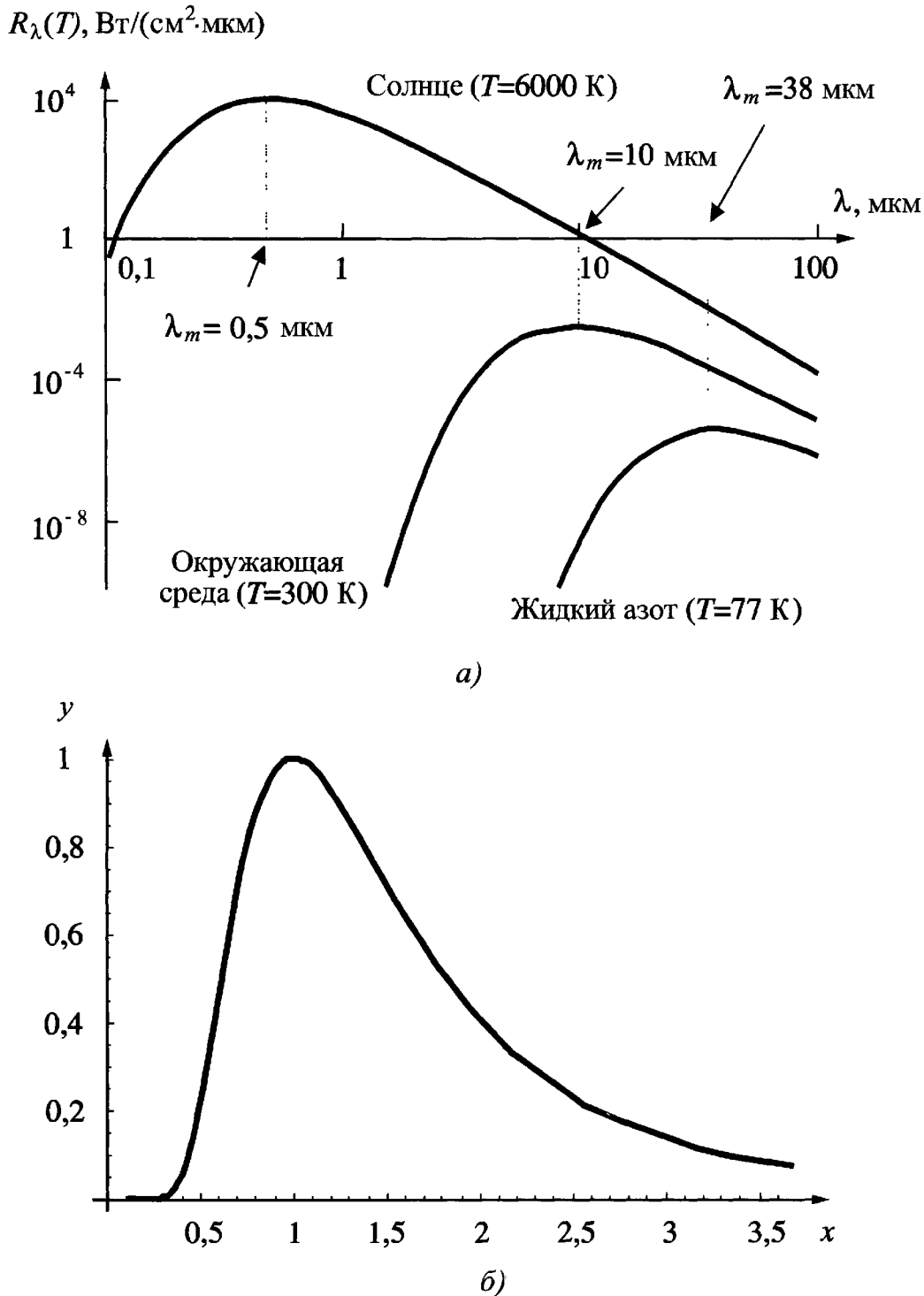


Рис. 7.2. Закон Планка для АЧТ:

*а* – в абсолютных единицах; *б* – единая изотермическая кривая

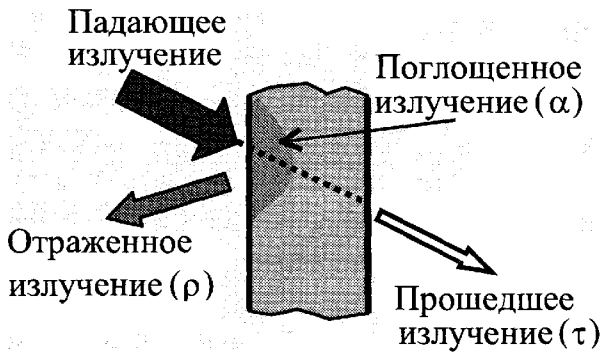
(7.7 – 7.10), испускается телом в телесный угол зрения  $\pi$  стерадиан. Тепловизор регистрирует часть этого излучения, попадающего в телесный угол  $\Omega$  согласно закону Ламберта

$$J_{\Omega} = R \Delta S \frac{\Omega}{\pi} \cos \varphi, \quad (7.11)$$

где  $\Delta S$  – площадь, визируемая тепловизором в пределах его мгновенного угла

зрения на поверхности объекта контроля;  $\varphi$  – угол между нормалью и направлением телесного угла  $\Omega$ . Обе величины  $\Delta S$  и  $\Omega$  определяются размерами приемной площадки приемника излучения и параметрами объектива.

При падении излучения на тело (рис. 7.3) имеют место следующие оптические феномены:



**Рис. 7.3. Взаимодействие электромагнитного излучения с телом**

- 1) поглощение с коэффициентом  $\alpha_\lambda$  ;
  - 2) отражение с коэффициентом  $\rho_\lambda$  ;
  - 3) пропускание с коэффициентом  $\tau_\lambda$  .
- Очевидно, что на любой длине волны

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (7.12)$$

что выражает закон сохранения энергии.

*Закон Кирхгофа* устанавливает, что в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и длине волны спектральный коэффициент направленного 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

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda . \quad (7.13)$$

Закон Кирхгофа выражает тот факт, что на определенной длине волны тело способно поглотить и испустить одинаковое количество энергии. Для ИК термографии это имеет первостепенное значения, 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 тем-

пературы. Производная от функции Планка по температуре имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial T} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{C_2 e^{C_2/\lambda T}}{\lambda T^2 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T). \quad (7.14)$$

Соответствующие значения также табулированы в [151]. Во всем диапазоне длин волн для серого тела:

$$\frac{\partial}{\partial T} R(T, \varepsilon) = 4\varepsilon \sigma T^3, \quad (7.15)$$

или в конечных разностях:

$$\Delta R(\Delta T = T_1 - T_2, \varepsilon) = 4\varepsilon \sigma \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3 \Delta T. \quad (7.16)$$

В радиационной пирометрии удобно использовать следующее монохроматическое представление функции Планка

$$R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) = K(\lambda) T^n \text{ или } R_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda K(\lambda) T^n, \quad (7.17)$$

где  $K(\lambda)$  – функция длины волны;  $n = 5/\beta$  при  $\beta \leq 2,5$ ;  $n = 1 + 2,5/\beta$  при  $\beta \geq 2,5$ ;  $\beta = \lambda/\lambda_m$ . Показатель степени  $n$  в таком представлении характеризует изменение  $R_\lambda(T)$  в процентах при изменении температуры на 1 %, поскольку из формулы (7.15) следует:

$$n = \frac{\partial R_\lambda(T) / R_\lambda(T)}{\partial T / T}. \quad (7.18)$$

Формула (7.17) 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 (7.17) означает, что при переходе в коротковолновую часть спектра с ростом температуры возрастает лишь *относительное* приращение спектральной плотности излучения.



Для фиксированных спектральных диапазонов, согласно формуле (7.17), можно также принять, что

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) d\lambda = KT^n, \quad (7.19)$$

где  $K$  – численный коэффициент, а показатель степени  $n$  зависит от спектрального интервала. Например, для распространенных спектральных интервалов 3...5,5 и 7...14 мкм и диапазона температур от  $-20$  до  $+80$  °С соответственно  $n = 10,11$  и  $n = 4,83$ . Формула (7.19) позволяет получить ряд важных выводов, связанных со схемой термографирования и особенностями калибровки тепловизоров (см. п. 7.2.4).

### 7.2.3. Схема ИК термографирования

Из вышесказанного следует, что, 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* излучения. В большинстве случаев ИК термография имеет дело с оптически непрозрачными объектами ( $\tau_{\lambda} = 0$ ), для которых формула (7.12) приобретает вид:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1, \text{ или } \varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1. \quad (7.20)$$

Схема термографирования оптически непрозрачного объекта показана на рис. 7.4. Поток излучения, регистрируемый тепловизором, складывается из потока собственного излучения объекта контроля и части потока излучения окружающей среды и посторонних тел, отраженной от поверхности объекта контроля:

$$\begin{aligned} \Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отр}} = & \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda}^{\text{атм}} R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) + \\ & + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} \varepsilon_{\lambda a} \tau_{\lambda}^{\text{атм}} R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T_a), \end{aligned} \quad (7.21)$$

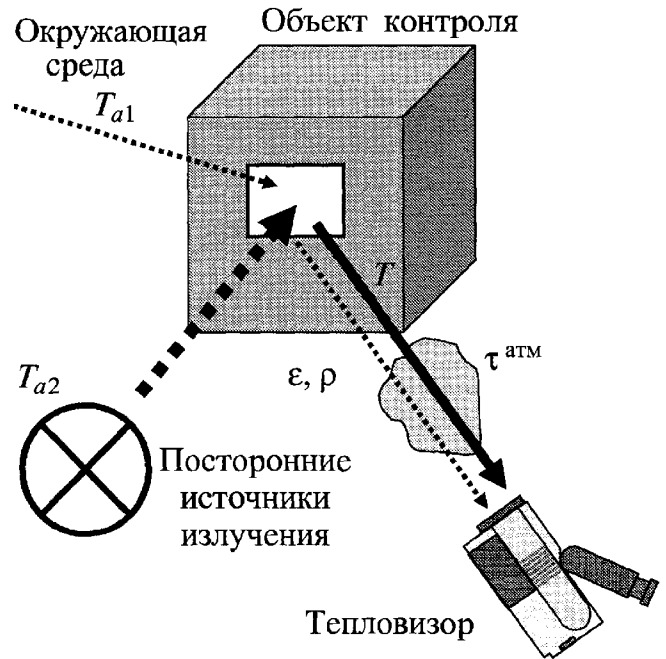


Рис. 7.4. Схема ИК термографирования объекта

где  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – геометрические факторы, описывающие ослабление потоков излучения от объекта контроля и окружающей среды в зависимости от геометрии эксперимента и параметров объектива (во многих случаях  $\Gamma_1 = \Gamma_2$ ),  $\tau_{\lambda}^{\text{атм}}$  – коэффициент пропускания атмосферы для данного расстояния между тепловизором и объектом контроля, а индекс "a" относится к окружающей среде (ambient), которая также включает посторонние излучающие объекты. Строго говоря, температура посторонних излучателей (обозначена  $T_{a2}$  на рис. 7.4) может существенно превышать температуру окружающей среды (обозначена  $T_{a1}$  на рис. 7.4), но без потери общности можно считать, что мы имеем дело с некоторой эффективной температурой  $T_a$  всех источников, излучение которых отражается от объекта и регистрируется тепловизором. В некоторых тепловизорах используют термин "отраженная температура"  $T_{\text{refl}}$ , а также "температура фона"  $T_{\text{backgr}}$ ; соответствующую величину вводят при тепловизионной съемке в качестве корректирующего параметра (см. ни-

же). Заметим, что в уравнении (7.21) пренебрегают излучением атмосферы.

Составление уравнений энергетического баланса весьма важно при выводе 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 температурой  $T_1$  и  $T_2$ , расположенных параллельно друг другу. Результирующий поток излучения в пространстве между ними (без учета поглощения) равен:

$$\Delta R = \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (7.22)$$

Например, если в помещении с температурой  $+20^\circ\text{C}$  находится человек со средней температурой на поверхности одежды и открытых участках тела  $+27^\circ\text{C}$ , то собственное излучение человека составит  $460 \text{ Вт/м}^2$ , однако вследствие встречного излучения среды результирующий поток будет всего лишь около  $40 \text{ Вт/м}^2$ , что при площади поверхности около  $2 \text{ м}^2$  эквивалентно тепловым потерям с поверхности тела человека за счет излучения на уровне  $80 \text{ Вт}$ .

Взаимодействие тел различной геометрической формы и обладающих различными коэффициентами излучения описывается соответствующими коэффициентами  $\Gamma$  и  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ . Для анализа проблем, возникающих при ИК термографировании, ограничимся рассмотрением упрощенного уравнения (7.21).

Без потери общности можно считать, что окружающая среда излучает как АЧТ, тогда уравнение (7.20) можно записать в виде:

$$\Phi = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \tau_\lambda^{\text{атм}} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) d\lambda + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \varepsilon_\lambda) \tau_\lambda^{\text{атм}} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T_a) d\lambda. \quad (7.23)$$

Уравнение (7.23) наглядно показывает, что при визировании реальных объектов показания тепловизора зависят не только от температуры объекта, но и от его излучательных/отражательных свойств, температуры посторонних излучателей, а также от пропускания атмосферы. Параметры  $T$ ,  $T_a$ ,  $\varepsilon$  и  $\tau^{\text{атм}}$  сложным образом воздействуют на вид ИК термограмм, что затрудняет интерпретацию результатов съемки в терминах температуры.

Во многих практических случаях в формуле (7.23) можно пренебречь спектральным ходом  $\varepsilon$  и  $\tau^{\text{атм}}$ , а также геометрическими факторами. Тогда с точностью до постоянного коэффициента:

$$\Phi = \varepsilon \tau^{\text{атм}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T) d\lambda + (1 - \varepsilon) \tau^{\text{атм}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{АЧТ}}(T_a) d\lambda. \quad (7.24)$$

С использованием формулы (7.19), уравнение (7.24) для спектральных интервалов примет вид:

$$\Phi = \varepsilon \tau^{\text{атм}} T^n + (1 - \varepsilon) \tau^{\text{атм}} T_a^n. \quad (7.25)$$

Очевидно, что тепловизор, калиброванный по АЧТ, покажет кажущуюся (радиационную) температуру серого тела  $T_{\text{каж}}$  согласно следующему уравнению:

$$T_{\text{каж}}^n = \varepsilon \tau^{\text{атм}} T^n + (1 - \varepsilon) \tau^{\text{атм}} T_a^n. \quad (7.26)$$

#### 7.2.4. "Отраженная температура"

Соотношение вида (7.26) используется в современных измерительных тепловизорах для автоматической коррекции температурных отсчетов, если введены

значения коэффициента излучения объекта контроля  $\varepsilon$  и температуры окружающей среды  $T_a$ . Подчеркнем еще раз, что величина  $T_a$  в данном случае относится не только к объектам, находящимся при температуре окружающей среды, но представляет собой эффективную температуру посторонних источников (печей, ламп, технических установок и т.п.), называемую в последних моделях тепловизоров FLIR Systems "отраженной температурой"  $T_{refl}$ . Ее значение является важным параметром коррекции измеряемой температуры, который пользователь должен ввести при работе с тепловизором. При этом в тепловизоре параллельно вводится значение собственно температуры окружающей среды  $T_a$ , которое наряду с расстоянием до объекта и влажностью атмосферы, используется для расчета, коэффициента пропускания атмосферы  $\tau^{атм}$  (см. п. 7.2.8).

В "спокойной" атмосфере на расстояниях менее 20...30 м можно принять, что  $\tau^{атм} = 1$ . Тогда основное уравнение термографирования (измерения температуры с помощью тепловизора) можно записать в простом виде:

$$T_{каж}^n = \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_a^n. \quad (7.27)$$

Проблема коэффициента излучения как важного параметра коррекции температуры рассмотрена ниже. "Отраженная температура", или температура окружающей среды и посторонних излучателей,  $T_a$  является вторым важным параметром коррекции, который следует вводить при работе с тепловизором. Следует заметить, что окружающая среда присутствует всегда и ее влияние зависит от отражательных свойств объекта контроля, в то время как мощные источники паразитной засветки зачастую можно устранить или экранировать. В общем случае величина "отраженной температуры" не равна собственно температуре фона или посторонних излучателей, а должна быть опреде-

лена экспериментально. Простым способом определения  $T_a$  является размещение в зоне объекта контроля диффузно отражающей ("сжатой") алюминиевой фольги. Температура фольги, показываемая тепловизором, является хорошей оценкой совместного действия всех посторонних источников, то есть равна  $T_a$ . Измеренное таким образом значение  $T_a$  следует вводить в качестве величины "отраженной температуры".

### 7.2.5. Проблема коэффициента излучения

В табл. 7.3...7.6 приводятся значения коэффициентов излучения для некоторых распространенных материалов. Следует обратить внимание на резкое различие величин  $\varepsilon$  у металлов и неметаллов. Металлы, особенно полированные, выступают в роли зеркал, хорошо отражающих и плохо поглощающих тепловое излучение, в то время как большинство неметаллов могут рассматриваться как хорошо излучающие серые тела, близкие по спектру и мощности излучения 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 заметными отражающими свойствами в видимой части спектра, но быть хорошими поглотителями в ИК спектре.

Влияние коэффициента излучения на результаты термографирования объектов двояко. Во-первых, отсутствие информации об истинном значении  $\varepsilon$  делает невозможным точное измерение температуры, причем погрешность определения температуры  $\Delta T$  тем выше, чем больше неопределенность значения  $\varepsilon$ . В НК точное знание  $\varepsilon$ , как правило, необязательно, но поверхностные флуктуации  $\varepsilon$  приводят к появлению ложных сигналов, которые могут интерпретироваться оператором или автоматическим устройством как дефекты. Типичный прием учета таких

### 7.3. 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
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

**7.4. 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
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.

**7.5. 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
слюдяные	0,90...0,95
стеклянные	0,91...0,92
Транзисторы	0,90

Продолжение табл. 7.5

Изделие	Коэффициент излучения
Диоды	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 стеатита для выводов	0,87

#### 7.6. Средние значения коэффициентов излучения некоторых земных покровов в различных спектральных интервалах (данные Л.З. Криксунова)

Род покрова	Коэффициенты излучения в спектральных интервалах, мкм		
	1,8...2,7	3...5	8...13
Листва зеленая	0,84	0,90	0,92
Листья сухие	0,82	0,94	0,96
Листья зеленые	0,67	0,90	0,92
Хвойные ветки зеленые	0,86	0,96	0,97
Трава сухая	0,62	0,82	0,88
Песок разный	0,54...0,62	0,74...0,82	0,93...0,98
Кора древесная	0,75...0,78	0,87...0,90	0,94...0,97

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 расположены другие нагретые объекты, излучение которых может отражаться от визируемой поверхности и создавать блики на термограммах. В литературе по

практической ИК термографии не рекомендуется исследовать объекты с коэффициентом излучения менее 0,7. На поверхностях с низким коэффициентом излучения возникают ложные сигналы, обусловленные царапинами, окислами, грязью, краской и т.п. 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 контролируруемую поверхность полоску непрозрачной липкой ленты типа "скотч".

Рассмотрим связь приращений  $\Delta T$  и  $\Delta \varepsilon$ , которая вытекает из законов теплового излучения. Для серых тел из закона Стефана-Больцмана следует, что

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (7.28)$$

Например, если на поверхности объекта контроля со средней излучательной способностью  $\varepsilon = 0,9$  имеют место локальные вариации 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). На практике эквивалентные величины  $\Delta T$  будут ниже из-за компенсирующего влияния окружающей среды, см. ниже формулу (7.33).

Для анализа связи  $\Delta T$  и спектрального значения  $\Delta \varepsilon_\lambda$  удобна формула (7.17), включающая  $\varepsilon_\lambda$  в качестве множителя. Нетрудно получить следующее выражение

$$\frac{\Delta R_\lambda(T)}{R_\lambda(T)} = n \varepsilon_\lambda \frac{\Delta T}{T}, \quad (7.29)$$

которое по форме аналогично (7.24). 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 (7.17) и (7.29), если проанализировать отношение сигнал/шум  $S$  как отношение изменений сигналов  $\Delta R_\lambda(T)$ , вызванных изменениями  $\Delta T$  и  $\Delta \varepsilon$

$$S = \frac{(\partial R_\lambda(T)/\partial T) \Delta T}{(\partial R_\lambda(\varepsilon)/\partial \varepsilon) \Delta \varepsilon} = n \frac{\Delta T/T}{\Delta \varepsilon/\varepsilon}. \quad (7.30)$$

В ТК, как правило,  $n = 5/\beta = 5\lambda_m/\lambda$ , а абсолютную температуру изделия можно представить как сумму абсолютной начальной температуры  $T_{init}$  и избыточной температуры нагрева  $T_h$  (заметим, что в предыдущих главах избыточная температура нагрева обозначена  $T$ ). Тогда формулу (7.30) можно записать в виде

$$S = 5 \frac{\lambda_m}{\lambda} \frac{1}{1 + T_{init}/T_h} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta \varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (7.31)$$

или, используя закон Вина  $\lambda_m \approx 3000/(T_{init} + T_h)$ , в окончательном виде

$$S = 5 \frac{3000}{\lambda} \frac{T_h}{(T_{init} + T_h)^2} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta \varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (7.32)$$

где  $\Delta T/T_h = C^{run}$  – введенный ранее текущий контраст температуры над дефектом.

Из (7.32) 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 ( $T_{init} = 300$  К) величина  $S$  возрастает в шесть раз. Следовательно, оптимизация температуры нагрева, то есть подводимой к объекту контроля энергии, связана с анализом спектрального поведения  $\Delta \varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda$ .

Для реального случая термографирования в присутствии окружающей среды (посторонних объектов) с температурой  $T_a$ , с учетом формулы (7.27), можно получить следующую связь изменений  $\Delta T$  и  $\Delta \varepsilon$

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{n} \left[ 1 - \left( \frac{T_a}{T} \right)^n \right] \left| \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right|. \quad (7.33)$$

Напомним, что для спектральных интервалов 3...5,5 и 7...14 мкм и диапазона

температур от  $-20$  до  $+80$  °С соответственно  $n = 10, 11$  и  $n = 4, 83$ .

Интересно отметить, что при  $T = T_a$  имеет место полная компенсация излучательной способности твердых тел (если отсутствуют мощные посторонние излучатели). На практике близкая ситуация имеет место, например, при термографировании строительных сооружений, температура которых близка к температуре окружающей среды; при этом согласно (7.33) температурные отсчеты слабо зависят от излучательных свойств материалов.

**Пример.** Пусть стена здания находится при температуре  $T = 263$  К ( $-10$  °С). Температура окружающей среды и облачного неба  $T_a = 258$  К ( $-15$  °С). Какова будет погрешность определения температуры штукатурки с помощью тепловизора, работающего в диапазоне длин волн  $7...14$  мкм, если значение коэффициента излучения в тепловизоре установлено для кирпичной кладки ( $\varepsilon = 0,94$ ). Из табл. 7.3 следует, что при переходе от кирпичной кладки к штукатурке  $\Delta\varepsilon = 0,94 - 0,91 = 0,03$ . Тогда из формулы (7.33)  $\Delta T \approx 0,15$  °С для обоих диапазонов  $3...5,5$  мкм и  $7...14$  мкм, в то время как формула (7.24), не учитывающая отраженного излучения, дает  $\Delta T \approx 2,1$  °С. Физически различие в значениях  $\Delta T$  означает, что окружающая среда является источником компенсирующего излучения, обуславливающего снижение влияния флуктуаций коэффициента излучения на тепловизионные измерения.

В ИК термографии, для случая визирования объекта с температурой  $T_o$  на фоне (background) с температурой  $T_b$ , вводят понятие *теплового контраста* в определенном спектральном диапазоне [152]:

$$TK = \frac{\int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_o) d\lambda - \int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_b) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_o) d\lambda + \int_{\Delta\lambda} R_\lambda(T_b) d\lambda}. \quad (7.34)$$

В коротковолновом диапазоне длин волн ( $3,5...5$  мкм) тепловой контраст вдвое выше, чем в длинноволновом диапазоне ( $8...14$  мкм), что является следствием уравнения (7.25).

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 [1] классификации, можно выделить две группы способов, описанных в табл. 7.7. 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 технологически неудобно. 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, сажевые эмульсии, сажу жженой резины, а также масла и другие материалы, которые обладают высокой излучательной способностью в ИК диапазоне, легко и равномерно наносятся на поверхность и удаляются с нее (заметим, что увлажнение материала также повышает его коэффициент излучения, но при этом в результате испарения температура поверхности понижается). При использовании покрытий могут возникать дополнительные помехи, вызванные мелкими включениями, воздушными пузырьками и неравномерной толщиной покрытий. Тонкие покрытия достаточно прозрачны как для регистрируемого излучения (основной материал "просвечивает"



### 7.7. Способы учета излучательных свойств объектов в 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, использование 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 (7.29). Значение коэффициента излучения определяют по формуле $\varepsilon = 1 - \rho$ . Спектральный состав излучения подсветки должен совпадать со спектром принимаемого излучения. Реализация сложна при изменяющейся температуре объекта контроля
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 (ныне FLIR Systems)

Продолжение табл. 7.7

Способ	Краткая характеристика
<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 (формула (7.25)). 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 (7.37). 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

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 импульса. Существенным недостатком применения покрытий является снижение производительности ТК, поэтому способ чернения часто используют в лабораторных исследованиях для обеспечения наилучших условий ТК, но редко – на практике. Стоит отметить, что первые 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, однако распространившаяся в последние годы практика декоративного окрашивания пассажирских авиалайнеров частично решает эту проблему. При ТК стальных корпусов химических

реакторов и алюминиевых кожухов истинные температуры лучше всего определяются в зонах, покрытых ржавчиной, пылью и т.п. Рекомендуется наклеить на контролируемую поверхность полоску липкой ленты, для которой  $\varepsilon \sim 0,9 - 0,96$ , после чего возможно переустановка значений  $\varepsilon$  для естественных поверхностей.

### 7.2.6. Связь истинных и радиационных температур

Формула (7.27) позволяет рассчитать показания тепловизора, откалиброванного по АЧТ, т.е. при полном отсутствии влияния окружающей среды, при визировании реального серого объекта с коэффициентом излучения  $\varepsilon$  в отсутствие влияния атмосферы

$$T_{\text{каж}} = [\varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_a^n]^{1/n} . \quad (7.35)$$

Как отмечалось выше, в современных измерительных тепловизорах коррекция температурных отсчетов производится пользователем путем введения значе-

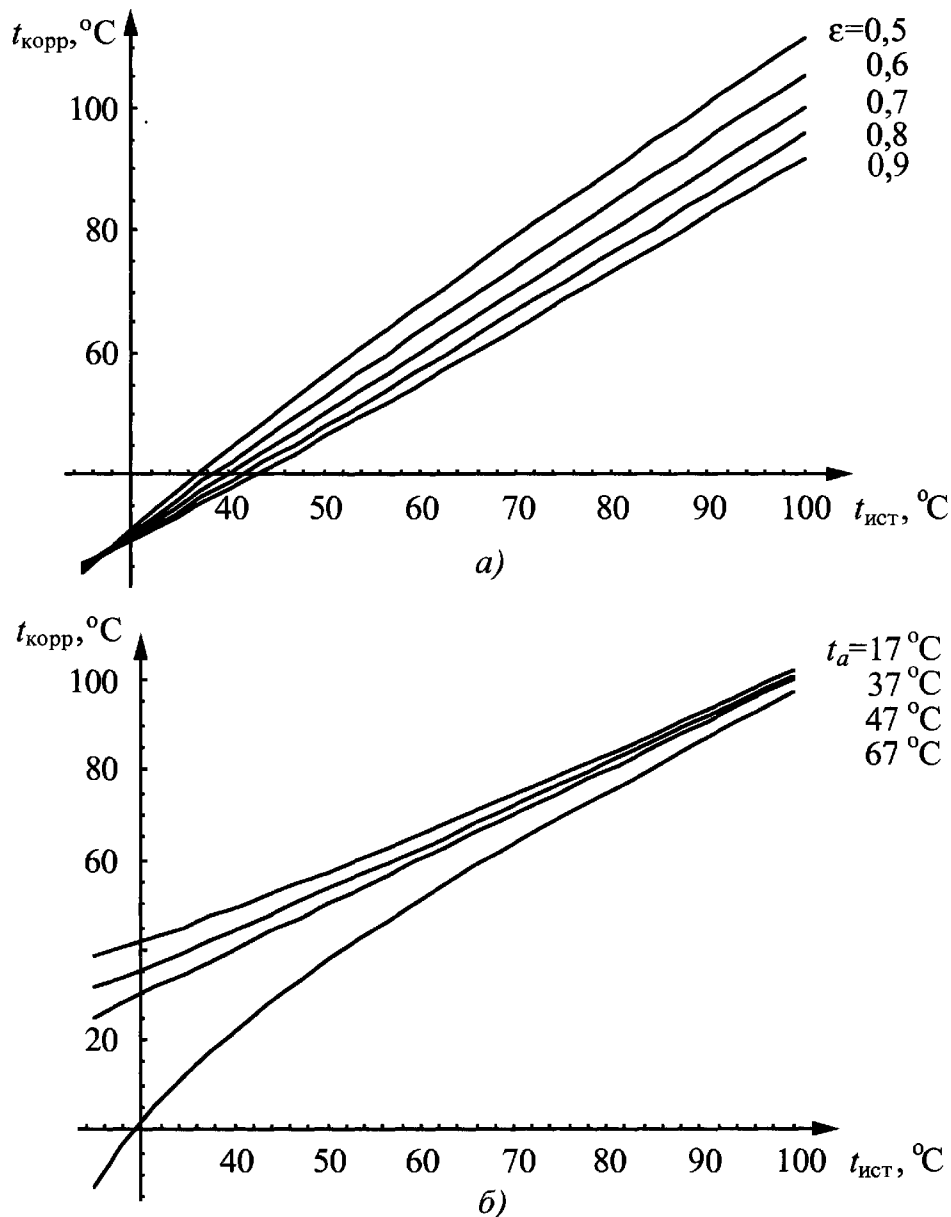
ний  $\varepsilon$  объекта контроля и эффективной температуры окружающей среды и посторонних тепловых источников ("отраженной температуры"); влиянием атмосферы, как правило, пренебрегают. Откорректированное значение температуры связано со значением, полученным по АЧТ, следующей формулой, вытекающей из (7.35)

$$T_{\text{корр}} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_{\text{каж}}^n + (1-\varepsilon)T_a^n] \right\}^{1/n}. \quad (7.36)$$

Выражение (7.36) позволяет оценивать погрешность температурных измере-

ний с помощью тепловизоров в случае неточного задания  $\varepsilon$  и  $T_a$ .

**Пример.** Пусть коэффициент излучения объекта тепловизионной съемки  $\varepsilon = 0,7$  и температура окружающей среды  $t_a = 27^\circ\text{C}$  ( $T_a = 300\text{ K}$ ). Используется тепловизор КВ диапазона (3...5,5 мкм), т.е.  $n = 10,11$ . При задании пользователем значения  $\varepsilon$  в виде установки тепловизора от 0,5 до 0,9 показания тепловизора  $t_{\text{корр}}$  будут изменяться в зависимости от истинной температуры объекта  $t_{\text{ист}}$  так, как это показано на графиках рис. 7.5, а, даже



**Рис. 7.5. Погрешность температурных измерений тепловизором КВ диапазона (3...5,5 мкм) при неточном задании коэффициента излучения и температуры окружающей среды:**  
 а – истинные значения  $\varepsilon = 0,7$  и  $t_a = +27^\circ\text{C}$ ; введенные пользователем значения  $t_a = +27^\circ\text{C}$  и  $\varepsilon$  изменяется от 0,5 до 0,9; б – истинные значения  $\varepsilon = 0,7$  и  $t_a = +47^\circ\text{C}$ ; введенные пользователем значения  $\varepsilon = 0,7$  и  $t_a$  изменяется от +17 до +67  $^\circ\text{C}$

если введено корректное значение  $T_a$ . Соответственно, неточное задание температуры окружающей среды также приводит к дополнительной погрешности измерения температуры объекта, даже если коэффициент излучения введен корректно (рис. 7.5, б, истинное значение  $t_a = 47^\circ\text{C}$ ).

Как видно из графиков рис. 7.5, а *недооценка* коэффициента излучения приводит к *завышению* температурных показаний тепловизора. Аналогичным образом влияет "отраженная температура" (температура окружающей среды), причем это влияние становится сильнее при низких температурах объекта съемки (рис. 7.5, б).

Заметим, что вопросы о влиянии неточного задания  $\varepsilon$  и  $T_a$  на погрешность тепловизионных измерений часто встречаются в экзаменационных вопросах Американского общества НК (ASNT) при аттестации термографистов II-го и III-го уровня.

### 7.2.7. Двухканальные тепловизоры

Суммируя сравнительные характеристики коротковолнового (КВ: 3,5...5 мкм) и длинноволнового (ДВ: 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 наружной съемке 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 спектрально-зональной съемке с борта летательного аппарата (самолета, спутника) используют большое число каналов

(до 24-х), что позволяет анализировать разнообразные физические эффекты, которые по-разному проявляются на различных длинах волн; например, в ближнем ИК диапазоне можно отслеживать созревание сельскохозяйственных культур; особенно широко спектрально-зональный метод используется в аэрокосмической разведке;

- в ТК преимущество одного канала перед другим неочевидно; зачастую основным фактором является спектральное поведение поверхностных шумов, которые обусловлены поглощательно-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

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1 \int_{\Delta\lambda 1} R_\lambda(T) d\lambda}{\varepsilon_2 \int_{\Delta\lambda 2} R_\lambda(T) d\lambda}. \quad (7.37)$$

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 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  $\varepsilon$  и  $T$  [153]. Метод, названный авторами "двухволновой ИК термографией" (dual-band infrared imaging), основан на использовании сигналов двух каналов с эффективными длинами волн 5 и 10 мкм:

$$U_5 = \varepsilon T^{10}; \quad U_{10} = \varepsilon T^5, \quad (7.38)$$

что следует из (7.17). Для получения изображений  $\theta$  и  $E$ , отражающих соответственно распределения  $\varepsilon$  и  $T$ , предложены следующие формулы:

$$\theta = \left( \frac{T}{T_{av}} \right)^5 = \frac{U_5 / U_5^{av}}{U_{10} / U_{10}^{av}}; \quad (7.39)$$

$$E = \frac{(U_{10} / U_{10}^{av})^2}{U_5 / U_5^{av}},$$

где  $U_5^{av}$  и  $U_{10}^{av}$  – средние пиксельные значения в соответствующих изображениях.

Более глубокий анализ вышеописанного метода можно провести, используя выражения (7.17) и (7.37). Из (7.37) видно, что подавление влияния  $\varepsilon$  тем эффективнее, чем ближе тело по своим излучательным свойствам к серому. В пределе, если  $\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}$ , то  $U_1 / U_2$  не зависит от  $\varepsilon$ . 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 (7.26), примет вид:

$$S(U_1 / U_2) = (n_1 - n_2) \frac{T_h}{T_{init} + T_h} \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \varepsilon_{12} / \varepsilon_{12}}; \quad (7.40)$$

$$S(U_1 / U_2^{n_1/n_2}) = 0, \quad (7.41)$$

где  $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ .

Выражения (7.27) и (7.40, 7.41) позволяют сравнивать одноволновой и двухволновой способы ИК термографии. Принципиальное различие между формулами (7.40) и (7.41) состоит в том, что

нулевой результат обработки сигналов по алгоритму (7.41) означает полное подавление влияния температуры, что позволяет строить карты распределения излучательных свойств объектов. Отношение сигналов в формуле (7.40) сохраняет зависимость от  $\varepsilon$ , поэтому полное подавление излучательных свойств объектов возможно только для серых тел.

Особенности двухволновой ИК термографии рассмотрим на примере системы Thermovision 900, при калибровке которой использовалась следующая модель сигнала в  $i$ -м спектральном диапазоне:

$$U_i = \varepsilon_i \frac{R_i}{[\exp(B_i / T)] - F_i}, \quad (7.42)$$

где  $R_i, B_i, F_i$  – эмпирические константы, определяемые при калибровке.

С учетом (7.42) уравнения (7.27), (7.40) и (7.41) приобретают следующий вид:

$$S(U_i) = \frac{T_h}{(T_{init} + T_h)^2} \frac{B_i e^{B_i/T} \Delta T / T_h}{e^{B_i/T} - F_i \Delta \varepsilon_i / \varepsilon_i}; \quad (7.43)$$

$$S(U_1 / U_2) = \frac{T_h}{(T_{init} + T_h)^2} \times$$

$$\times \frac{B_1 e^{B_1/T} (e^{B_2/T} - F_2) - B_2 e^{B_2/T} (e^{B_1/T} - F_1)}{(e^{B_1/T} - F_1)(e^{B_2/T} - F_2)} \times$$

$$\times \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \varepsilon_{12} / \varepsilon_{12}}; \quad (7.44)$$

$$S(U_1 / U_2^k) = \frac{T_h}{(T_{init} + T_h)^2} \times$$

$$\times \frac{B_1 e^{B_1/T} - k B_2 e^{B_2/T} \frac{e^{B_1/T} - F_1}{e^{B_2/T} - F_2}}{e^{B_1/T} - F_1} \times$$

$$\times \frac{\Delta T / T_h}{\Delta \varepsilon_{12,k} / \varepsilon_{12,k}}. \quad (7.45)$$

где  $k$  – аналог  $n_1 / n_2$  в формуле (7.41).

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:

$$B_1 e^{B_1/T} - kB_2 e^{B_2/T} \frac{e^{B_1/T} - F_1}{e^{B_2/T} - F_2} = 0. \quad (7.46)$$

Расчеты показывают, что для двух распространенных спектральных интервалов 3...5,5 и 7...13 мкм величина  $k$  близка к 2; см. формулу (7.19). Это доказывает, что центр тяжести этих интервалов сосредоточен соответственно на длинах 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.

### 7.2.8. 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, углекислый газ и озон. 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 состояния атмосферы ослабление ИК излучения описывается законом Ламберта-Бэра:

$$\tau_A(\lambda) = \exp[-\gamma(\lambda)R], \quad (7.47)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, определяющий степень рассеяния и поглощения;  $R$  – длина трассы. Иногда передающую среду характеризуют оптической плотностью  $D$

$$D = \log \frac{1}{\tau_A(\lambda)} = 0,43\gamma(\lambda)R. \quad (7.48)$$

Рассеяние излучения частицами приводит к изменению пространственного распределения передаваемой энергии, причем основную роль в этом процессе выполняют частицы, размеры которых сопоставимы с длиной волны. Заметим, что именно рассеяние в атмосфере объясняет голубой цвет неба днем, когда солнце близко к зениту, и красный цвет вечером, когда солнце заходит за горизонт.

Во влажной атмосфере взвешенные частицы размером около 0,5 мкм присоединяют молекулы воды, образуя туман. Растущие до 0,25 мм частицы становятся слишком тяжелыми и выпадают в виде дождя. Поглощение водяным паром весьма заметно на 2,6 мкм, а также на длинах волн более 20 мкм.

Вследствие солнечного нагрева в атмосфере возникает турбулентность, которая влияет на коэффициент преломления ИК излучения согласно закону Гладстона

$$n_{air} = 1 + k_n \rho_{air}, \quad (7.49)$$

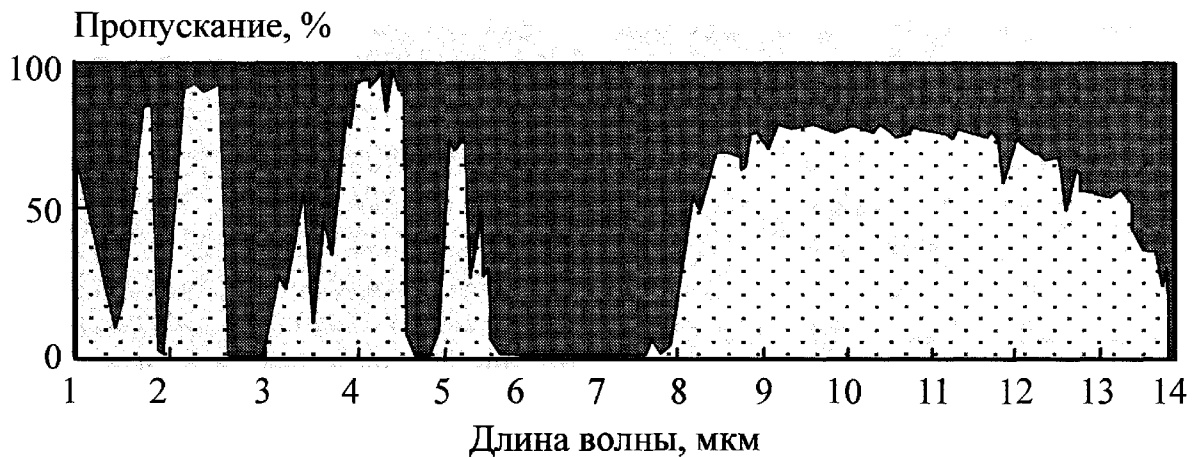
где  $k_n$  – константа;  $\rho_{air}$  – плотность воздуха.

В среднем  $n_{air} = 1$  и при расчетах пропускания атмосферы часто принимают, что турбулентность однородна и изотропна.

Практический расчет пропускания атмосферы для заданного расстояния проводят по следующей формуле

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda)\tau_{CO_2}(\lambda)\tau_{diff}(\lambda)\tau_{rain}(\lambda), \quad (7.50)$$

где  $\tau_{H_2O}(\lambda)$ ,  $\tau_{CO_2}(\lambda)$ ,  $\tau_{diff}(\lambda)$ ,  $\tau_{rain}(\lambda)$  – коэффициенты пропускания, обусловленные соответственно водяным паром, углекислым газом, диффузией частиц и осаждаемой водой (дождем). Численные значения коэффициентов находят в соответствующих таблицах. Уравнения (7.47, 7.48, 7.50) справедливы также и в отдель-



**Рис. 7.6.** Пропускание атмосферы на трассе 1,8 км

ных спектральных диапазонах, если можно пренебречь зависимостью коэффициента пропускания от длины волны.

Уравнения (7.47), (7.50) используются в современных тепловизорах для автоматической перекалибровки температурных отсчетов для некоторого среднего состояния атмосферы и известного расстояния между тепловизором и объектов контроля, которое задается оператором. Пример профиля поглощения вдоль трассы длиной 1,8 км приведен на рис. 7.6. 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.

# АППАРАТУРА ДЛЯ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

### 8.1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТРОЙСТВ АКТИВНОГО ТК

Технология активного ТК, схематично изображенная на рис. 8.1, включает несколько взаимосвязанных процедур и требует системного подхода к проектированию устройств контроля.

Исходным моментом является описание объекта контроля и моделирование технически возможных процедур его испытаний. Под термином "технически возможная" будем понимать процедуру, реализуемую как с учетом манипуляций с объектом, так и с учетом возможной 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, из которых при правильно поставленном эксперименте преобладающими являются шумы, обусловленные объектом контроля. Таким образом, преимущественно свойства объекта определяют требования к аппаратуре активного ТК, в частности, к частоте записи термограмм, мощности и длительности нагрева. Моделирование процедур ТК позволяет осуществить оптимизацию эксперимента с учетом практических ограничений. Результатом оптимизированного эксперимента, как правило, является температурная функция  $T(i, j, \tau)$ , определенная в каждой точке последовательности термограмм (см. Главы 2 – 4). Анализ экспериментальных данных 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 10). Если дефект обнаружен, возможна оценка его параметров путем решения обратной задачи ТК. Процедуры контроля завершаются составлением карт дефектов, которые являются бинарными изображениями, где, например, единицу приписывают пикселям, относящимся к дефектным областям, а ноль – к бездефектным областям.

С учетом описанной технологии основными компонентами систем ТК являются: 1) источник нагрева; 2) компьютерная тепловизионная система; 3) специализированные компьютерные программы для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных. Выше были описаны алгоритмы моделирования и дефектометрии, а также компьютерной обработки результатов ТК. В настоящей главе рассмотрены коммерческие системы ТК и более подробно источники нагрева. Тепловизорам посвящена Глава 9.

### 8.2. 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 бывшем СССР. Подавляющее число систем, описанных в многочисленных публикациях, были разработаны для лабораторных исследований и в редких случаях заканчивались тиражированием в заметных количествах. Краткое описание коммерческих систем активного ТК приведено в табл. 8.1.



## 8.1. Коммерческие системы активного ТК

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
EchoTherm <sup>TM</sup> (Thermal Wave Imaging, США)	Портативная система НРК металлов, композитов, керамик и полимеров (импульсный ТК). Кольцевые или трубчатые импульсные лампы; кварцевые галогенные лампы
ThermoScope <sup>TM</sup> (Thermal Wave Imaging, США)	Развитие системы EchoTherm <sup>TM</sup> . Интегрированная система импульсного нагрева, сбора данных и анализа. Использует алгоритм синтетической обработки данных
Sapphire <sup>TM</sup> (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, использующая базовый тепловизионный комплекс ThermoVision 900; маломощный периодический нагрев; принцип синхронной термографии; построение фазограмм
Aladin <sup>TM</sup> (Siemens, Германия)	Система, реализующая принцип теплового микроскопа; метод тепловых волн
CompuTherm <sup>TM</sup> (EDO, США)	Система ТК изделий микроэлектроники
Barnes RM-2A (EDO, США)	ИК микроскоп для ТК изделий микроэлектроники
Altair LI (CEDIP, Франция)	Система для визуализации механических напряжений в материалах в диапазоне частот от 0,1 до 1000 Гц; диапазон напряжений $\pm 2000$ МПа (по алюминию); разрешение по напряжению 0,4 МПа (по алюминию); температурное разрешение 0,02 °С. Возможно решение задач НК методом синхронной и фазовой термографии
FDM 2000A (CEDIP, Франция)	Портативное устройство для определения теплопроводности материалов по методу Паркера
MECIR (Университет г. Реймса и фирма Avion Marcel Dassault, Франция)	Система импульсного ТК изделий авиакосмической техники на базе тепловизоров фирмы AGEMA Infrared Systems (FLIR Systems)
ThermoSoniX (Indigo Systems, США)	Система для синхронной ультразвуковой ИК термографии; спектральный диапазон 35 мкм; температурное разрешение $< 0,02$ °С; 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

Продолжение табл. 8.1

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
Системы ТК фирмы THERMOSENSORIK, 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 – фазовый анализ
Системы ТК фирмы InfraТес, Германия	В сотрудничестве с фирмой CEDIP (ныне FLIR Systems) предлагаются системы импульсного ТК, собственный профиль фирмы – пассивная ИК диагностика с использованием тепловизоров Varioscan
Системы ТК фирмы EDEVIS, Германия	Системы ТК на базе тепловизоров CEDIP "под ключ": оптический термоволновой метод, ультразвуковая термография – импульсная и периодическая, фазовый анализ, анализ механических напряжений
Аппаратура и программные средства фирмы Automation Technology, Германия	На базе тепловизоров фирмы FLIR Systems предлагаются аппаратно-программные решения IrNDT для ТК с использованием импульсного и периодического нагрева
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 <sup>2</sup> /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
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 ТК воды в авиационных сотовых панелях (ПЕРГАМ-"Инновация", Россия)	На базе тепловизоров FLIR Systems предлагается система пассивного и активного обнаружения воды в композиционных и алюминиевых конструкциях самолетов

Продолжение табл. 8.1

Система (фирма-производитель)	Краткое описание
Система активного ТК турбинных лопаток (ФГУП "ВИАМ", Россия)	Система для тепловизионного контроля внутренних каналов турбинных лопаток
Система активного ТК турбинных лопаток (ФГУП "ММП "Салют", Россия)	Система для тепловизионного контроля внутренних каналов турбинных лопаток

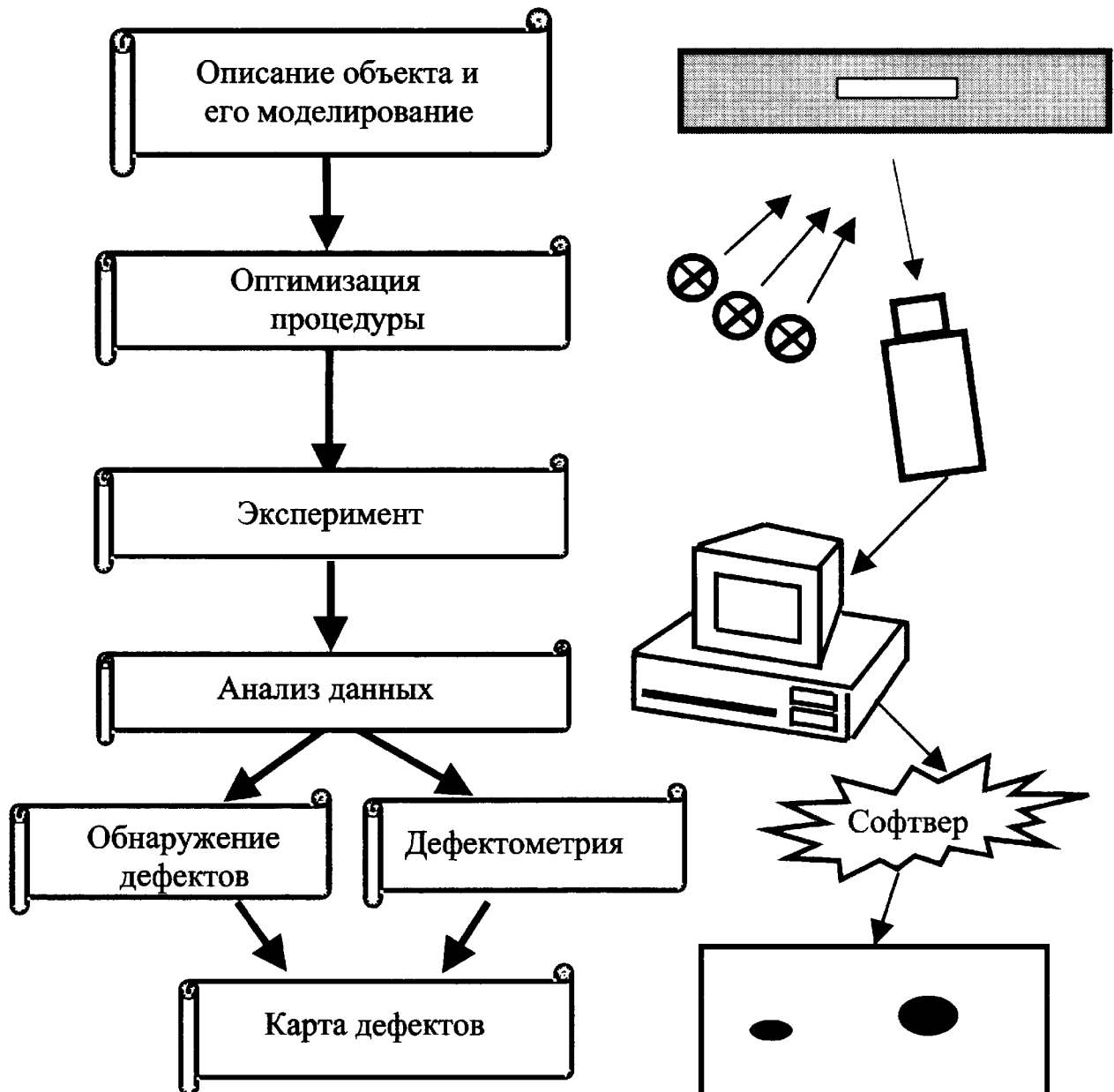


Рис. 8.1. Технология активного ТК

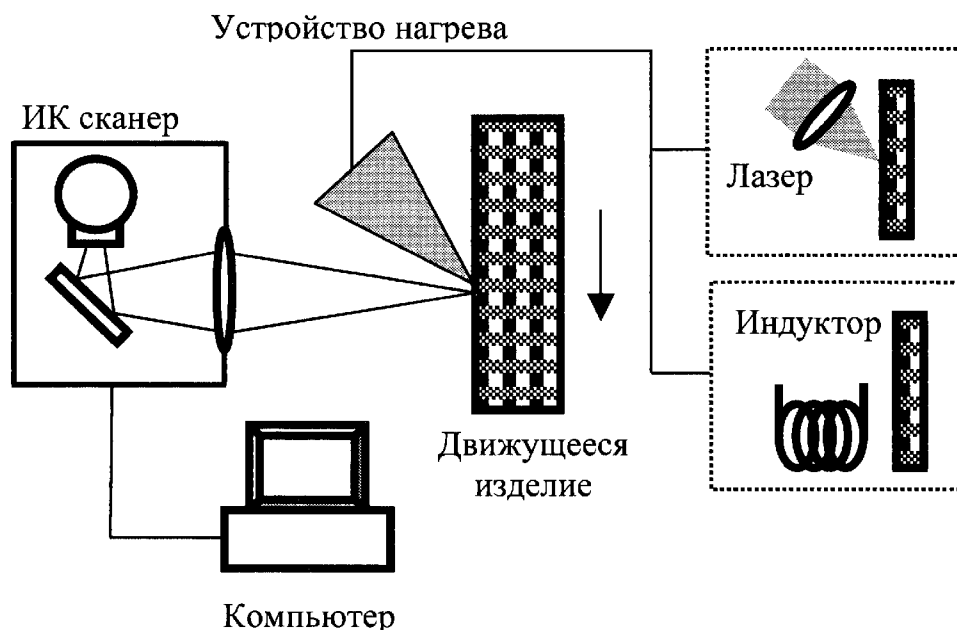


Рис. 8.2. Схема портативного теплового дефектоскопа (адаптировано из [141])

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; МНПО "Спектр", г. Москва, и НИИ ИН, г. Томск). С началом перестройки данные работы, проводившиеся, прежде всего, в интересах обороны страны, были свернуты. Из систем, разработанных в последние годы, можно отметить установку для активного ТК металлопроката (институт "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 системы испытаний турбинных лопаток (ФГУП "ВИАМ" и ФГУП "ММПП "Салют", г. Москва).

Концепция портативного теплового дефектоскопа, показанная на рис. 8.2, была разработана в Университете г. Хельсинки еще в 1989 г. Тепловую стимуляцию объекта контроля осуществляли с помощью строчно-сканирующего лазер-

ного луча или индукционной катушки, тепловое поле объекта регистрировали с помощью строчно-сканирующего ИК радиометра собственной разработки, причем оба ключевых компонента дефектоскопа были размещены в малогабаритном корпусе "пистолетного" типа, а процесс ТК состоял в перемещении устройства относительно объекта.

### 8.3. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОБЪЕКТОВ ТК

Физическая природа тепловой стимуляции зачастую определяет вид процедуры ТК и схему нагружения. Чаще всего объект контроля нагревают, поскольку интенсивность охлаждения, как правило, невысока (исключение составляет охлаждение горячего 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. Профили зон нагрева показаны на рис. 8.3.

Согласно теории ТК, изложенной ранее, наилучшее выявление скрытых дефектов обеспечивает мощный кратковре-

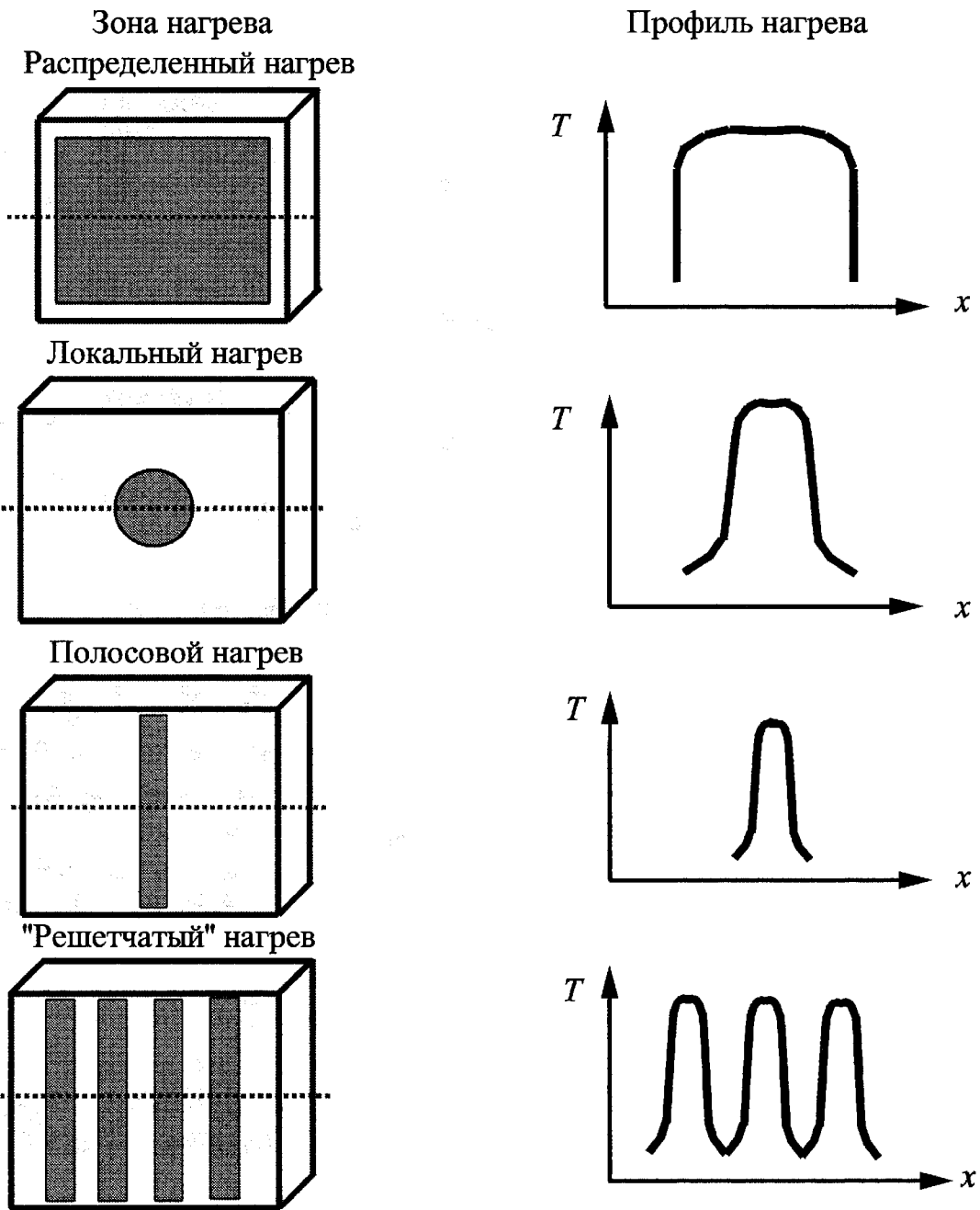


Рис. 8.3. Профили зон нагрева

менный нагрев. Этому требованию отвечают все вышеперечисленные виды нагрева, за исключением механического и с помощью газов или жидкостей.

Стимулирующий нагрев электрическим током используют преимущественно в лабораторных исследованиях, кроме случая ТК электротехнических и радиоэлектронных компонент, нагреваемых электрическим током в процессе их функционирования. *Контактные электроннагреватели* 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 (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 типа, снабжаемые выравнивающими медными пластинами, могут нагревать большие зоны, но обладают значительной тепловой инерцией, создают мощную излу-

чательную 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. При индукционном нагреве металлическое изделие должно быть охвачено витком провода, по которому пропущен переменный ток, создающий переменное магнитное поле. Вследствие электромагнитной индукции в изделии наводятся вихревые токи, которые вызывают нагрев металла. При возрастании частоты тока увеличивается 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  $f_{\min}$ , Гц, обеспечивающей приемлемый КПД. Рекомендуют следующую формулу [154]

$$f_{\min} = 8/(L\mu\rho), \quad (8.1)$$

где  $L$  – средний размер нагреваемого тела, м;  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м;  $\rho$  – удельная электрическая проводимость, См/м.

Индукционный нагрев, весьма распространенный в металлургии, в ТК используется сравнительно редко. В частности, 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 [15].

Нагрев диэлектриков переменным электрическим полем происходит благодаря феномену переполяризации, протекающей с преодолением сил трения. Эффективность нагрева возрастает при увеличении тангенса угла потерь диэлектрика  $\operatorname{tg} \delta$ . Удельную мощность  $W$  Вт/см<sup>3</sup>, подводимую источником высокочастотной энергии к телу, помещенному между пластинами конденсатора, определяют по формуле [154]:

$$W = 0,55 \cdot 10^{-12} \operatorname{etg} \delta f E^2, \quad (8.2)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/см.

Для нагрева диэлектриков используют средневолновый ( $f = 300 \dots 3000$  кГц), коротковолновый ( $f = 3 \dots 30$  МГц) и метровый ( $f = 30 \dots 300$  МГц) диапазоны. Характеристики промышленных источников СВЧ тока приведены в табл. 8.2.

## 8.2. Промышленные СВЧ источники для нагрева диэлектриков [154]

Материал	Частота, кГц	Удельная мощность, Вт/см <sup>3</sup>	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

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/м<sup>2</sup>. 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/м<sup>2</sup>, однако требуют 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 наиболее популярны оптические способы нагрева, которые реализуют с помощью: 1) лазеров; 2) импульсных ксеноновых ламп; 3) галогеновых 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/м<sup>2</sup>). 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, при ТК тонких покрытий. Высокую плотность мощности в случае лазерного нагрева получают в зонах малого размера, поэтому такой способ плохо сочетается с тепловизионной регистрацией температуры. При использовании техники "летающего пятна" мощность лазерного излучения распределяется по большой площади, снижая среднюю подводимую мощность. Учитывая, что КПД лазеров, как правило, невелик, их практическое применение в ТК ограничено определением теплопроводности высокотеплопроводных образцов по методу Паркера и рядом специальных задач НК (см. Главу 11).

В практических установках, например, фирмы Thermal Wave Imaging (США), используемых в авиакосмической промышленности, чаще всего применяют *импульсные ксеноновые 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 (рис. 8.4). Такие системы производятся фирмами Balcar, Bowens, Calumet, Hensei и др. Спектр излучения ксеноновых ламп – равномерный с интервалом от 0,2 до 1,4 мкм с выбросами на некоторых длинах

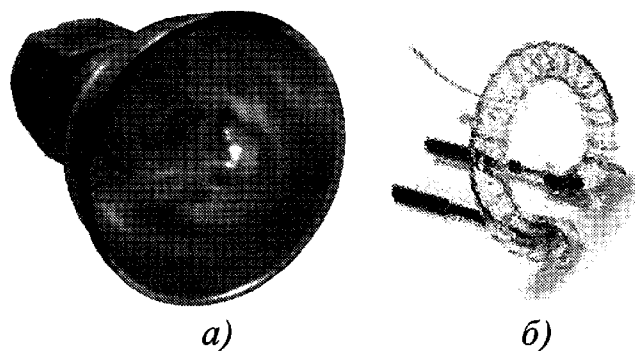


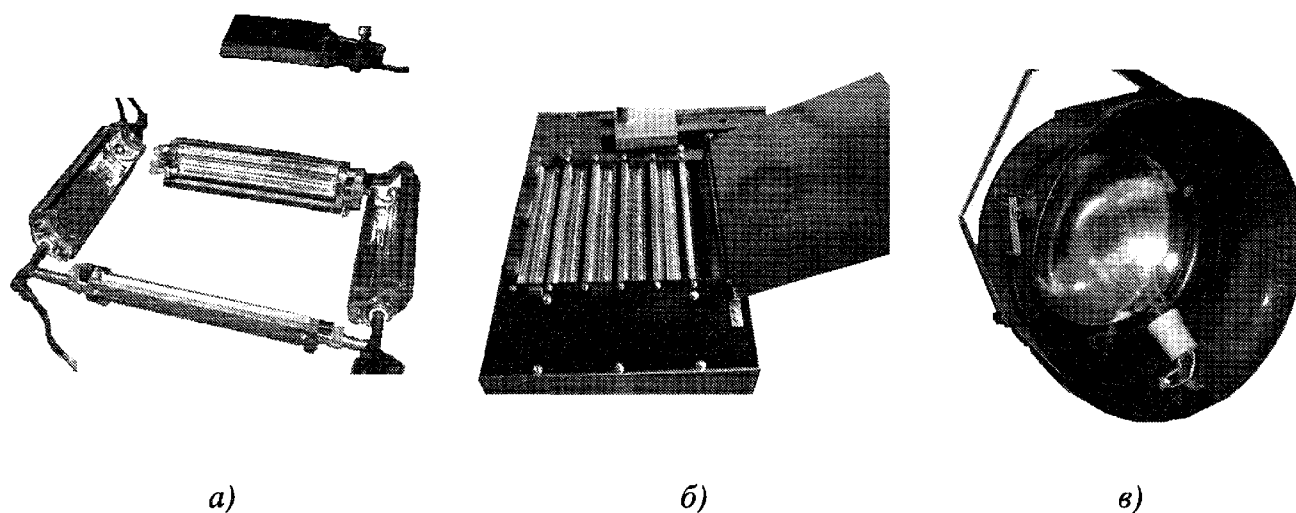
Рис. 8.4. Импульсная ксеноновая лампа:  
а – излучающая головка с отражателем;  
б – излучающий элемент

волн. Применение импульсных ламп часто требует введения дополнительных устройств фокусировки. В специализированных системах ТК используют несколько трубчатых ламп с энергией 2...5 кДж каждая (рис. 8.5).

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. В случае оптического нагрева металлов, их высокий коэффициент отражения 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 поверхности красок или лаков темных тонов.

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...1000 °С (кварцевые стеклянные, керамические, металлические 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, выпускаются различной формы и размеров. На их основе разработаны 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 сочетаются с точечными ИК радиометрами. Плотность



**Рис. 8.5. Примеры оптических нагревателей:**

- а* – импульсные ксеноновые лампы (плотность энергии до 25 кДж/м<sup>2</sup>; длительность нагрева 1 мс; неравномерность нагрева 10 % в зоне 0,2 × 0,2 м); *б* – галогеновые лампы (плотность энергии до 5 кВт/м<sup>2</sup>; длительность нагрева 5...50 с; неравномерность нагрева 25 % в зоне 0,5 × 0,5 м); *в* – лампа накаливания с рефлектором (плотность энергии до 2 кВт/м<sup>2</sup>; длительность нагрева 1...1000 с; неравномерность нагрева до 300 % в зоне 0,5 × 0,5 м)



энергии в зоне облучения ламповыми нагревателями может достигать 50 кВт/м<sup>2</sup>. Заметим, что в некоторых задачах ТК возможно использование солнечного излучения, плотность мощности которого в средних широтах в безоблачный день составляет около 1 кВт/м<sup>2</sup>.

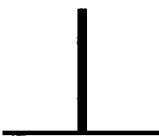



Оптическое излучение легко поддается модуляции, в частности, при реализации метода тепловых волн. Форма одиночного импульса нагрева, как правило, не имеет существенного значения для результатов ТК. В ряде случаев следует учитывать слабый длительный нагрев, производимый горячими баллонами ламп уже после окончания импульса нагрева. В целом при моделировании процедур ТК рассматривают формы импульса нагрева, приведенные в табл. 8.3. Некоторые оптические нагреватели показаны на рис. 8.5.

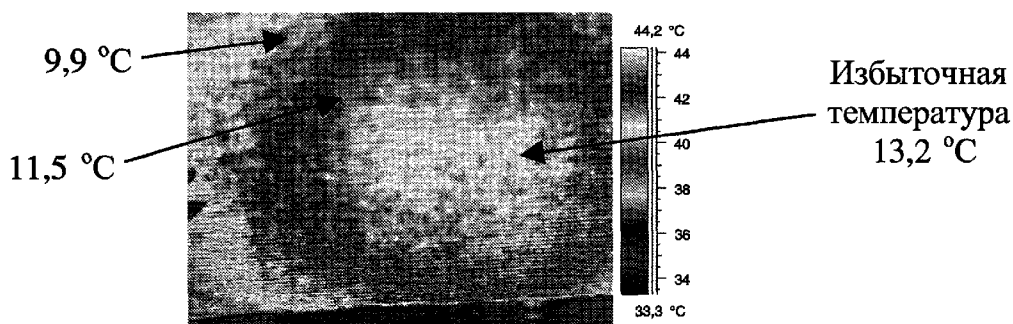
Для того чтобы реализовать высокую производительность тепловидения, источник нагрева должен обеспечивать требуемую плотность энергии в зоне как можно большего размера. Форму и размер зоны нагрева удобно определять эмпирически,

используя зачерненную мишень, выполненную из материала с низкой теплопроводностью. На рис. 8.6 для нагревателя рис. 8.5, б показано поле облучения мишени размером 0,5 × 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 сопротивлением* на основе сплавов с высоким электрическим сопротивлением (нихром, фехраль, константан), выпускаемые в виде проволок, лент и полос и также относящиеся к ИК излучателям. 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 регулируемой равномерностью распределения потока по длине, обеспечивая плотность энергии до 100 кВт/м<sup>2</sup>. Из промышленных устройств к ним наиболее близки трубчатые электронагреватели (ТЭН). Недостатки полосовых нагревателей: не-

**8.3. Формы импульсов нагрева при моделировании задач ТК**

Импульс Дирака	Прямоугольный импульс	Гауссовский импульс	Последовательность импульсов
			



**Рис. 8.6.** Температурное поле зачерненной мишени размером 0,5 × 0,5 м на расстоянии 0,6 м после нагрева в течение 5 с с помощью нагревателя, изображенного на рис. 8.4, б

обходимость размещать их вблизи объекта контроля, трудность нагрева больших зон и высокая инерционность. Тем не менее, исследователями из NASA (США) предложена установка полосового нагрева 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 с помощью *потока горячего воздуха*, производимого устройствами типа фена, или воздушной пушки (fan, blower, air gun). Температуру поверхности можно контролировать тепловизором в ходе нагрева, однако эффективная мощность, поглощаемая изделием, при этом невелика (обычно до 500 Вт/м<sup>2</sup>). 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 [14].

Тепловую стимуляцию посредством охлаждения осуществляют путем размещения изделий в холодильник или опрыскивания их жидким азотом. Воду в со-

вых 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 используется в лабораторных 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 УЗ возбуждения тепловых полей, 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.

### 9.1. СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ИК ДИАПАЗОНЕ

Анализ пространственного распределения температуры по одной или двум координатам требует сканирования поверхности объекта, которое осуществляют либо механическим (оптико-механическим), 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 – 1990-х годах в коммерческих тепловизорах применяли, в основном, две системы оптико-механического сканирования. Первая система, воплощенная в приборах фирмы 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 воплощен 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). Ос-

новные преимущества матричных тепловизионных систем заключаются в отсутствии движущихся механических частей и одновременном визировании сцены всеми чувствительными площадками одновременно. Последнее преимущество, которое, строго говоря, реализовано только в так называемых устройствах мгновенного визирования (snapshot), позволяет увеличить время экспозиции каждой чувствительной площадки, т.е. уменьшить шумы и обеспечить одновременное наблюдение всех точек быстроменяющейся тепловой сцены.

Упрощенные схемы тепловизоров, реализующих оба принципа сканирования, представлены на рис. 9.1. Оптико-механические системы содержат большое количество движущихся деталей, тогда как матричные тепловизоры фактически являются передающими телевизионными системами ИК диапазона.

Современные матрицы используют фотонные и тепловые ИК приемники. Наиболее доступными по цене являются 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 фотонные матрицы на основе силицида платины (PtSi) антимонида индия (InSb), тройных соединений (HgCdTe) и материалов, использующих эффект "квантовых ловушек", в частности, арсенида галлия (GaAs).

Тепловизоры являются оптико-электронными устройствами, в состав которых входят:

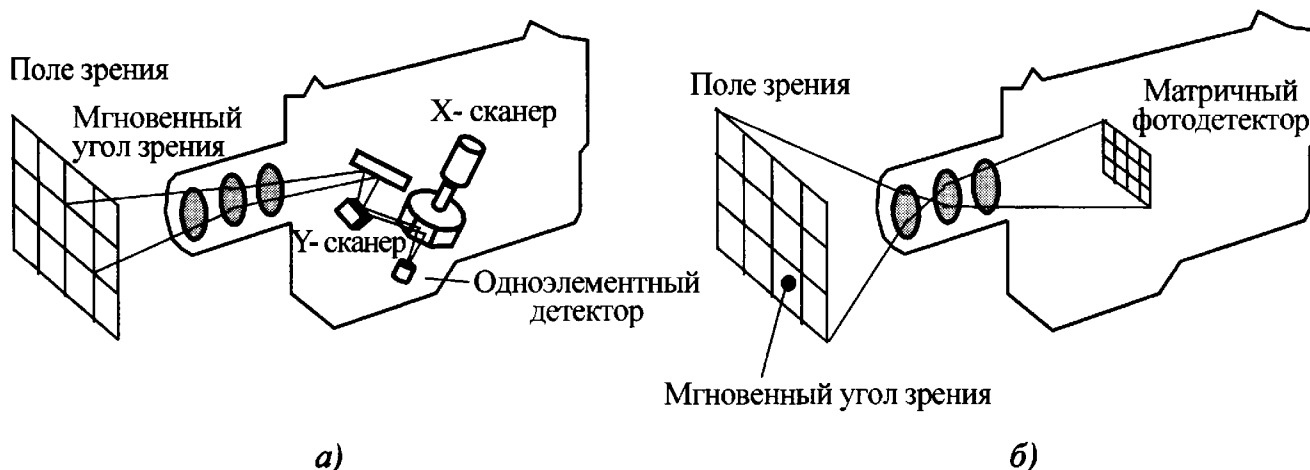


Рис. 9.1. Схематическое представление тепловизора с оптико-механическим (а) и электронным сканированием (б)

- ИК приемник (детектор излучения);
- объектив;
- сканер (кроме матричных тепловизоров);
- устройство охлаждения ИК приемника;
- встроенный эталон температуры (или устройство самокалибровки);
- электронный блок;
- монитор;
- программный продукт.

Коммерческие тепловизионные системы также включают:

- систему записи и твердого копирования термограмм;
- устройство транспортировки прибора;
- блок питания и/или аккумулятор.

Тепловизоры различного применения обладают различными техническими характеристиками и имеют различную стоимость, однако в основе их работы лежат общие физические принципы, рассмотренные ниже.

## 9.2. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники, или детекторы излучения, принимающие и преобразующие энергию оптического излучения в энергию других видов, подразделяют на био-

логические и физические. Среди биологических приемников излучения (ПИ) следует выделить человеческий глаз, который регистрирует 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 видеть 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 ее охлаждение и/или термостабилизация);
- сосуд Дьюара с хладагентом (возможна система охлаждения на базе термоэлектрических холодильников или микрохолодильника Стирлинга; некоторые детекторы работают при комнатной температуре).

ПИ разделяют на два основных класса: *тепловые* и *фотонные* (фотоэлектрические).

Принцип действия тепловых детекторов основан на одном из четырех явлений: 1) *боллометрическом* эффекте (изменение электрического сопротивления чувствительного элемента при нагреве поглощенным ИК излучением); 2) *термовольтаическом* эффекте (выходное напряжение генерируется нагретым спаем разнородных металлов); 3) *термопневматическом* эффекте (изменение температуры детектора вызывает расширение газового объема); 4) *пироэлектрическом* 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 *фотоэлектромагнитный* эффект.

### 9.2.1. 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 значительной инерционностью. В конце XX-го века появились малоинерционные микроболометрические (ферроэлектрические) матрицы, на основе которых были

созданы неохлаждаемые матричные тепловизоры, получившие в настоящее время большое распространение.

Пироэлектрические ПИ производят из материалов, называемых сегнетоэлектриками, например, из титаната бария. Эти материалы обладают постоянной электрической поляризацией, являющейся сильной функцией температуры. В течение длительного времени разрабатывали недорогие ИК тепловизоры на базе пироэлектрических видиконов (пировидиконов), однако в настоящее время они практически полностью вытеснены тепловизорами с матричными детекторами.

ИК термометры (пирометры) часто используют тепловые приемники на основе термоэлементов, работающих на принципе термоэффекта Зеебека. В качестве материалов для металлических термоэлементов используют сурьмяно-висмутовые спаи, серебро, железо, теллур, константан, хромель и различные сплавы этих веществ. В полупроводниковых термоэлементах применяют сурьму, кремний, теллур, селен.

Тепловые детекторы характеризуются плоским характером спектрального хода *обнаружительной способности*  $D^*$  (см. определение  $D^*$  в п. 9.2.6), т.е. являются неселективными, и не требуют охлаждения, но сама величина  $D^*$  при этом значительно меньше, чем у фотонных приемников (рис. 9.2).

### 9.2.2. 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 составляет 1,3 мкм. К фотоэмиссионным фотоприемникам относят вакуумные

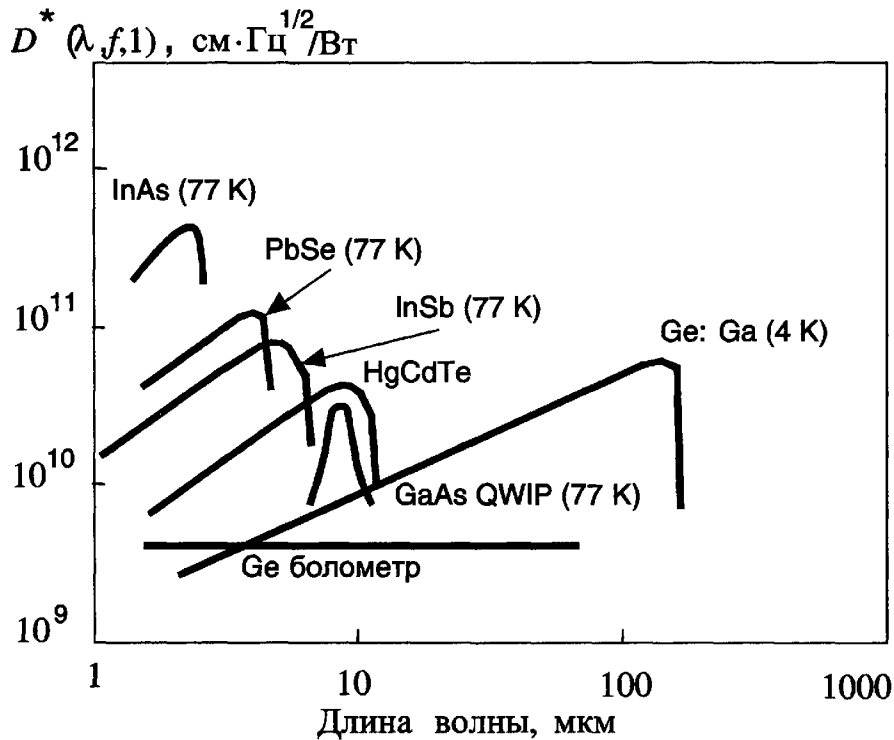


Рис. 9.2. Спектральные зависимости  $D^*$  для распространенных детекторов оптического излучения

и газонаполненные фотоэлементы (ФЭ), а также 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 ПИ не используются.

### 9.2.3. Фотонные детекторы

Фотонные детекторы реализуют явление *внутреннего фотоэффекта*, при котором носители заряда, согласно зонной теории твердого тела, не покидают материал детектора, а переходят в зону проводимости либо с примесного уровня, либо из валентной зоны. Спектральный ход детектирующей способности распростра-

ненных фотонных детекторов показан на рис. 9.2.

Сульфид свинца PbS был первым практическим детектором, разработанным в Германии перед второй мировой войной. В 50-е годы прошлого века появление новых фотопроводящих материалов, таких как селенид свинца PbSe, теллурид свинца PbTe и антимонид индия InSb, позволило освоить спектральный диапазон приемников ИК излучения до 3...5  $\mu\text{m}$ . Использование примесных уровней меди, цинка и золота в германии расширило диапазон до 30  $\mu\text{m}$ . В конце 50-х годов в Великобритании был разработан приемник на тройном соединении HgCdTe, который, наряду с ПИ из антимонида индия, длительное время оставался одним из наиболее распространенных в силу стабильности свойств и возможности варьировать основные параметры. Уже в начале 1960-х годов появилась технология *фото-литографии*, которая позволила создавать матричные детекторы, первоначально на основе PbS, PbSe и InSb, но к 1970-м годам большинство линейных матричных

детекторов военного применения были изготовлены из HgCdTe. Интересно упомянуть, что первые линейные матрицы, 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 К. Эллиотом с сотрудниками [155]. Охлаждаемые до криогенных температур СПРАЙТ-приемники остаются одними из наиболее применяемых детекторов ИК излучения (рис. 9.3). Их изготавливают в виде полоски из материала HgCdTe, которую размещают на сапфировой подложке. Сущность технологии состоит в том, что полоска вытянута в направлении сканирования и на нее подается 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 одиночного приемника совпадают. Однако, если множество СПРАЙТ-детекторов собраны параллельным образом, скорость сканирования может быть уменьшена за счет одновременного интегрирования.

Длинноволновые фотонные ПИ, как правило, требуют охлаждения до криогенных температур для того, чтобы подавить излучение чувствительной площадки самой на себя и снизить истощение энергетических уровней за счет теплового возбуждения атомов примесей. Поэтому первые фотонные ПИ 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 ч (были предложены также схемы непрерывной подпитки хладагентом). С целью избежать проблем, связанных с жидким азотом, были разра-

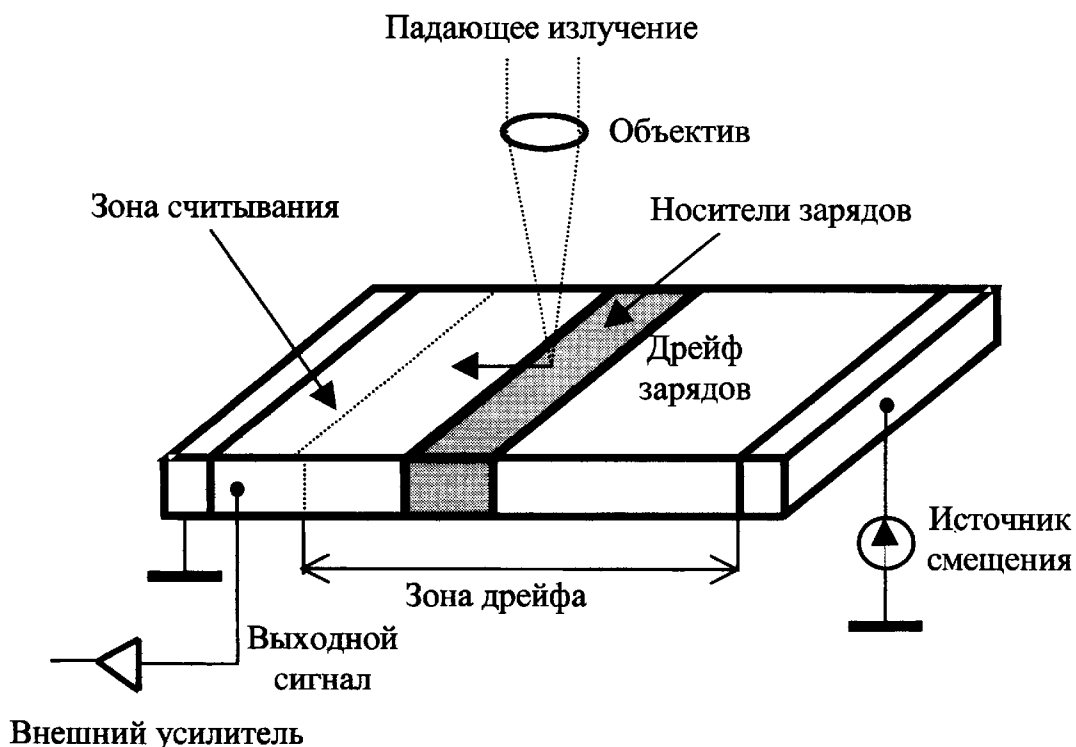


Рис. 9.3. Принцип действия СПРАЙТ-детектора

ботаны микрохолодильники на основе эффекта Джоуля-Томсона (микрохолодильник Стирлинга), в которых, в частности, 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; кроме того, они весьма энергоемки.

Постоянная времени фотонных ПИ находится в пределах от  $10^{-11}$  секунд для сверхбыстрых кремниевых детекторов до нескольких миллисекунд для приемников на основе PbS.

#### 9.2.4. Фотоприемники на основе квантовых ловушек

В последней декаде прошлого века стали коммерчески доступными приемники ИК излучения, использующие принцип так называемых квантовых ловушек, или ям (quantum well). В англоязычной научной литературе такие приемники носят название QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors) [156]. В кви-детекторах использован эффект фотовозбуждения электронов (дырок) между основным и первым возбужденным состоянием в зоне проводимости (валентной зоне) квантовой ловушки (рис. 9.4). Структура ловушки такова, что фотовозбужденные носители заряда могут "выбираться" из нее и создавать электрический ток. Например, в одном из первых серийных матричных кви-детекторов была использована ловушка из GaAs высотой  $45\text{\AA}$  и барьер из AlGaAs высотой  $500\text{\AA}$  (см. рис. 9.4). Основные состояния электронов в квантовой ловушке создавались примесным кремнием. Кви-детекторы, использующие GaAs, позволяют регистрировать ИК излучение с длиной волны более 6 мкм.

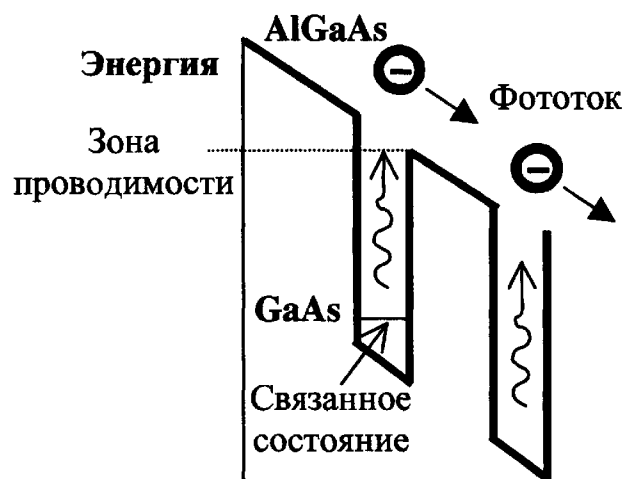


Рис. 9.4. Диаграмма работы ИК кви-детектора (QWIP) GaAs-AlGaAs во внешнем электрическом поле (поглощение ИК фотонов переводит электроны из основного состояния в зону проводимости)

В тепловизорах высокого уровня становятся все более популярными матричные КВИП-фотоприемники (см. п. 9.2.5).

#### 9.2.5. 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 одним 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 % [157].

Различают две технологии изготовления матричных фотоприемников: монолитную (monolithic) и гибридную (hybrid). Монолитные матрицы дешевле и проще в изготовлении, поскольку в них чувствительные площадки и зоны передачи электрического сигнала расположены в под-



ложке из одного и того же материала, однако их коэффициент заполнения не превышает 55 %. В монолитных матрицах труднее реализовать современные алгоритмы встроенной обработки сигнала, например, переменное время интегрирования. В гибридных матрицах зоны 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 °С.

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, после чего считывается суммарный сигнал. 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 используются в показывающих тепловизорах, где вышеуказанные недостатки не являются решающими. В измерительных тепловизорах требуются специальные меры учета потери сигнала и размытия изображения. КМОП-детекторы должны

быть эффективно охлаждены (до –200 °С), что достигается использованием миниатюрных компрессоров Стирлинга; при этом обеспечиваются наилучшие измерительные возможности тепловизоров.

Поскольку большинство ИК детекторов представляют собой счетчики фотонов, важной характеристикой матричных приемников является их *квантовый выход*, или *квантовая эффективность* (quantum efficiency), которая характеризует способность ПИ 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). В зарубежных матрицах оно обычно составляет 16 мс, что соответствует одному полному кадру. Матрицы с переменным временем интегрирования позволяют собирать ИК фотоны в течение более короткого времени, что позволяет обеспечить регистрацию температур до 450 °С. Тепловизоры без переменного времени интегрирования требуют введения спектральных фильтров для регистрации температур в широком интервале от –20 до +2000 °С.

Оптика ФРА-тепловизоров имеет свою специфику. Наиболее совершенной являются объективы (reimaging 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-reimaging 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 – NUC) 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 элементах матриц; 3) осуществляя непрерывную коррекцию с помощью встроенного микропроцессора (наиболее метрологичный способ). Способы коррекции является предметом "ноу-хау" (know how) фирм-производителей (из последних разработок можно отметить алгоритмы CNUC и Hypercalc, использованные в тепловизоре SC 7000 компании FLIR Systems-CEDIP).

Другой проблемой тепловизоров, трудно решаемой в случае FPA-детекторов, является необходимость *компенсировать* изменения температуры окружающей среды. Чаще всего это осуществляют, размещая несколько 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 низкая по сравнению с фотонными матрицами чувствительность и низкая метрологическая стабильность.

Схема неохлаждаемой болометрической матрицы изображена на рис. 9.5. Каждый чувствительный элемент реализует

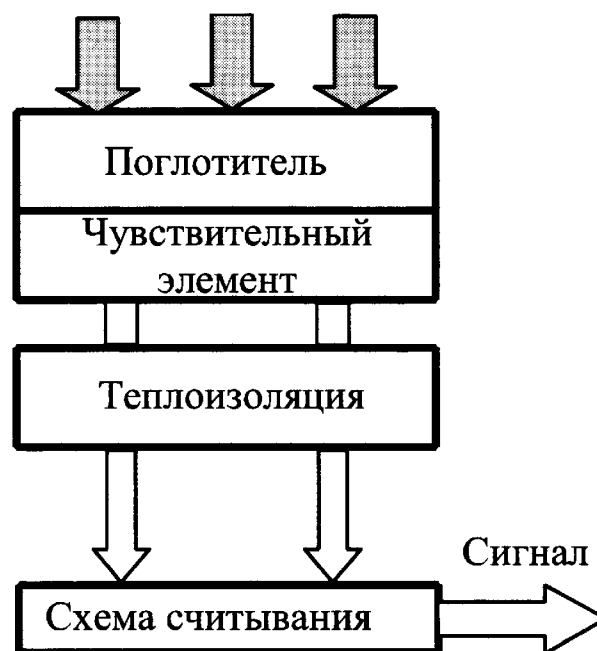


Рис. 9.5. Структура болометрической матрицы

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 слой, поглощающий излучение, который выполнен в виде четвертьволновой оптической полости толщиной около 1 мкм. Отдельные чувствительные площадки теплоизолированы друг от друга с целью обеспечить максимальное пространственное и температурное разрешение. Как и в фотонных матрицах, используется два типа архитектуры элементов: гибридный и монолитный. В гибридных матрицах детектор и устройство считывания сигнала, выполненные на основе кремниевой структуры, изготовлены отдельно друг от друга и затем собраны

вместе. В монокристаллических матрицах детекторы размещают над схемой считывания непосредственно в процессе изготовления, что обеспечивает лучшие детектирующие параметры.

Типичная коммерческая болометрическая матрица состоит из  $320 \times 240$  элементов и обеспечивает температурное разрешение на уровне 60...100 мК (в лабораторных системах достигнуто разрешение 10 мК).

### Фотонные матрицы

Наиболее распространенные типы фотонных матриц выполнены на основе барьера Шоттки (Shottky barrier), суперрешеток (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. [158]. В настоящее время многими компаниями разработаны матрицы размером до  $512 \times 512$ , большей частью использующие силицид платины PtSi. Этот 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-детекторы, перемежающиеся слои различных полупроводников различной толщины позволяют изменять область спектральной чувствительности. Наиболее перспективная технология использует материал GaAs-GaAlAs, разработанный в 1987 г. Длинноволновая граница суперрешеток может изменяться от 6 до 11 мкм при обнаружи-

тельной способности в диапазоне от  $10^{10}$  до  $10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> (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 (0,015 °С).

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  $256 \times 256$ ) и InSb (размером до  $640 \times 512$ ). Квантовая эффективность приемников из InSb достигает 80...90 %, однако она не всегда реализуется вследствие переполнения квантовых ловушек электронами. Другой проблемой этих ПИ 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 тонкой керамической плате (толщиной 100 мкм), на боковой поверхности которой устанавливается ИК детектор. Такие платы собирают вместе, формируя матрицу. В Z-планарных детекторах можно осуществлять свертку сигнала, дифференцирование и аналого-цифровое преобразование.

Современные матричные ПИ характеризуются следующими параметрами:

- HgCdTe: до  $480 \times 640$  (размер элемента матрицы от 20 мкм до 1 мм); рабочая температура  $T_{op} = 80$  К;
- PtSi: до  $1024 \times 1024$ ; рабочая температура  $T_{op} = 80$  К;
- InSb: до  $1024 \times 1024$ ;  $T_{op} = 80$  К;
- неохлаждаемые матрицы: до  $640 \times 480$ .

Коммерческие матричные кви-п-фотоприемники формата  $320 \times 256$  и  $640 \times 486$  работают при температуре 70 К и обеспечивают температурное разрешение до 20 мК в диапазоне длин волн 8...12 мкм. Поставщиками охлаждаемых КВИП-матриц являются фирмы QWIP Technologies, Santa Barbara Focalplane и BAE Systems, США, Acreo, Швеция, а также французская фирма Uliss (дочерняя компания фирмы Sofradir). В качестве примера в табл. 9.1 приведены параметры FPA матриц фирмы Santa Barbara Focalplane. Что касается неохлаждаемых болометрических матриц, то в первых тепловизорах использовались приемники

фирмы Boeing, выпускавшиеся по технологии Honeywell. Впоследствии, фирма Boeing продала технологию охлаждаемых и неохлаждаемых матриц фирме DRS, США. Неохлаждаемые микроболометрические матрицы на основе аморфного кремния выпускаются также фирмами Uliss и Acreo. Японской фирмой NEC освоен выпуск неохлаждаемых VOx матриц форматом  $640 \times 480$  с температурным разрешением 70 мК. В Германии основным поставщиком детекторов военного и двойного назначения является фирма AIM, которая специализируется на охлаждаемых матрицах, в частности, на базе PtSi. Известным немецким разработчиком охлаждаемых КВИП-матриц является Фраунгоферовский институт прикладной физики. В Израиле матрицы на основе антимонида индия поставляет фирма SCD Semi-Conductor Devices.

Российские разработки в области охлаждаемых, а особенно неохлаждаемых, матричных ИК детекторов остаются фрагментарными и не соответствуют современным требованиям. Примером отечественных разработок являются охлаж-

### 9.1. Матричные фотоприемники производства фирмы Santa Barbara Focalplane (США)

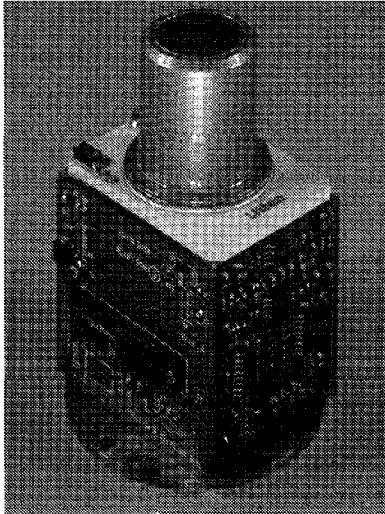
Модель	Формат	Материал	Спектральный диапазон, мкм	Размер пикселя, мкм	Максимальная частота смены изображений, Гц*
SBF184 (snapshot)	$1024 \times 1024$	InSb	1,0...5,3	19,5	142
SBF184Q (snapshot)	$1024 \times 1024$	LWIR QWIP	7,8...9,4	19,5	142
SBF180/194 (snapshot)	$320 \times 256$	InSb	1,0...5,3	30	457
SBF135	$256 \times 256$	InSb	3,0...5,3	30	142
SBF161 (snapshot)	$128 \times 128$	LWIR HgCdTe	2...10	40	2012

\* Меньшие окна обеспечивают более высокую частоту.

даемые ПИ и соответственно матричные-тепловизоры ГУП "НПП "Электрон-Оптроник" и ЗАО "НПП "Силар" (г. Санкт-Петербург), а также Института физики полупроводников (г. Новоси-

бирск). Работы в области неохлаждаемых матриц проводятся в ФГУП "Орион".

Описание и внешний вид некоторых коммерческих матричных фотоприемников показан на рис. 9.6.



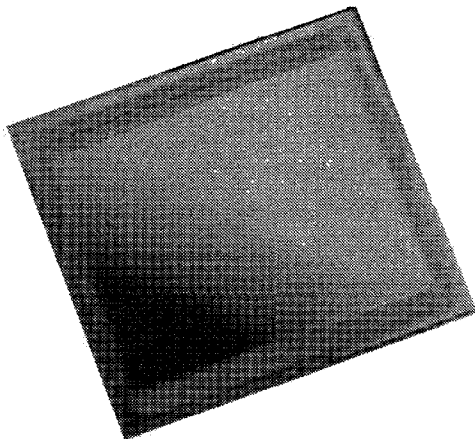
#### **Litton Electro-Optical Systems, USA**

Формат: 256×256 InSb

CMOS мультиплексор (возможен режим snapshot)

Размер элемента: 30×30 мкм

Спектральный диапазон: 3,4...4,95 мкм

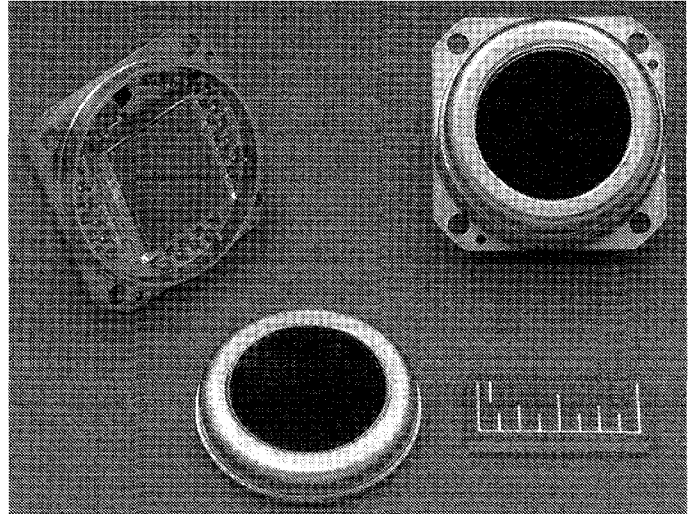


#### **Santa Barbara Focalplane. USA**

Формат: 1280×1024, матричный детектор

Частота смены изображений: 60 Гц

Режим snapshot



#### **Boeing, USA**

U3000 Неохлаждаемая болометрическая матрица

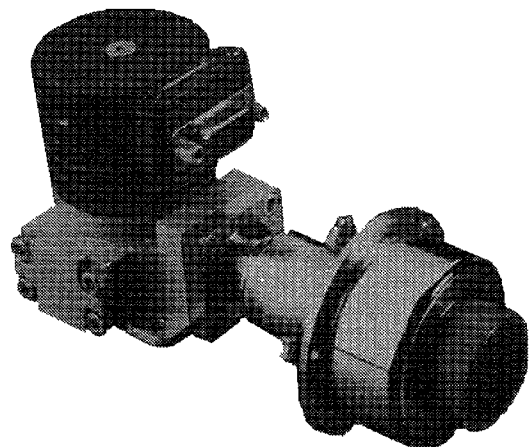
Формат: 320×240

Частота смены изображений: 60 Гц

Размер элемента: 51×51 мкм

Фактор заполнения: 60 %

Спектральный диапазон: 8...14 мкм



#### **BAE Systems, USA**

640×512 квип-матрица

Рабочая температура: 70 К

(холодильник Стирлинга)

Температурное разрешение: 30 мК

Спектральный диапазон: 8...10 мкм

**Рис. 9.6** Зарубежные матричные фотоприемники

### 9.2.6. 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 · Гц<sup>1/2</sup> · Вт<sup>-1</sup>;
- область спектральной чувствительности;
- интегральная, или вольтовая, чувствительность, определяющая амплитуду электрического сигнала на выходе фотоприемника, В/Вт;
- площадь чувствительного элемента  $A_d$ , см<sup>2</sup>;
- инерционность, или постоянная времени, с.

#### Удельная обнаружительная способность

Удельная обнаружительная способность является спектральной функцией и служит важнейшим критерием качества ПИ. Ее определяют следующим образом

$$D^* = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{NEP}, \quad (9.1)$$

где  $NEP$  – мощность излучения, эквивалентная шуму (Noise Equivalent Power);  $\Delta f$  – полоса частот, Гц. Согласно ГОСТ 21934–83, величину  $NEP$  называют *порогом чувствительности* ПИ, выражая ее в Вт; в англоязычной литературе эту величину часто выражают в Вт/Гц<sup>1/2</sup>. При правильной записи  $D^*$  следует указывать значение длины волны, частоту модуляции и полосы частот (единичной):  $D^*(\lambda, f_m, 1) = D^*(f_m, 1)$ .

Коэффициент использования ПИ по конкретному излучателю определяется выражением

$$k(T) = \frac{\int_0^\infty s(\lambda) R_\lambda(T) d\lambda}{\int_0^\infty R_\lambda(T) d\lambda}, \quad (9.2)$$

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

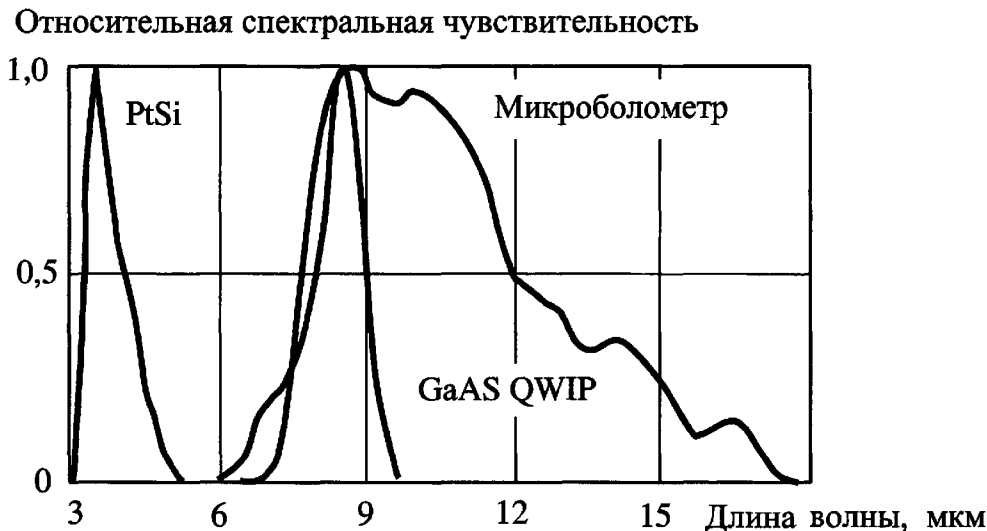
$$g^{-1} = \int_0^\infty \frac{\partial R_\lambda(T)}{\partial T} D_\lambda^* d\lambda, \quad (9.3)$$

который позволяет сравнить эффективность ПИ при регистрации малых температурных перепадов.

В СССР выпускались ПИ весьма широкой номенклатуры, их параметры можно найти в соответствующей литературе [159 – 161]. В последние годы объем выпуска отечественных ИК приемников существенно упал, более того сейчас появилась опасная тенденция нарастающего отставания от мирового уровня, в особенности, в области производства матриц и тепловизионных модулей.

#### Спектральная чувствительность

Область спектральной чувствительности тепловизоров определяется используемым ПИ (см. рис. 9.2). Приборы, работающие в коротковолновом диапазоне, например, передающие телевизионные трубки и ЭОП, могут рассматриваться в качестве показывающих тепловизоров, способных оценивать относительно высокие температуры. Однако термин "тепловизор" обычно применяют к системам со спектральной чувствительностью от 3 до 14 мкм. Исторически коротковолновыми тепловизорами (short wave-SW) назывались такие, в которых использовались приемники на антимониде индия (3...



**Рис. 9.7. Спектральная чувствительность тепловизоров с тремя различными приемниками излучения**

5 мкм), тогда как в длинноволновых (long wave-LW) системах в течение многих лет использовали приемники на тройных соединениях HgCdTe (7...14 мкм).

На рис. 9.7 изображена относительная спектральная чувствительность трех типов современных тепловизоров, работающих 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 ПИ должен быть охлажден. Длительное время в качестве хладагента применяли жидкий азот, снижающий температуру до  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от объема сосуда Дьюара одной заливки хватало не более, чем на 6 часов, 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  $-70\text{...}-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в ряде моделей тепловизи-

ров применен миниатюрный компрессор (известный под названием "машина Стирлинга"), который охлаждает ИК приемник до температуры жидкого азота.

Первый коммерческий тепловизор серии Thermovision-500, в котором приемник излучения функционировал 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" фирм-производителей. Использование фотонных FPA-детекторов излучения по-прежнему требует их охлаждения (при этом достигается максимальное температурное разрешение).

### 9.3. ОПТИКА ТЕПЛОВИЗОРОВ

Во всех высококачественных тепловизорах ИК объектив является сложным дорогостоящим узлом, включающим набор линз и/или зеркал, которые выполнены из хрупких и требующих прецизионной обработки материалов типа кремния, германия и специальных (халькогенидных) ИК стекол.

### 9.3.1. Фокусное расстояние, коэффициент увеличения, относительное отверстие и светосила 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. 9.8). Смещения  $Y$  и  $Y'$  от фокусных точек  $F$  и  $F'$  равны соответственно  $X$  и  $X'$ . Уравнение тонкой линзы имеет вид

$$XX' = F^2. \quad (9.4)$$

Коэффициент усиления равен

$$Y/Y' = S/S', \quad (9.5)$$

где  $S$  – расстояние между объектом и линзой;  $S'$  – расстояние между изображением объекта и линзой.

*Относительным отверстием* объекта называется отношение его диаметра к фокусному расстоянию  $D/F$ . Этот параметр выражают в виде дроби с числителем, равным единице, например, 1:1,5. Максимально возможным значением относительного отверстия является 1:0,5, при этом полный угол при вершине конуса лучей, сходящихся в задний фокус, приближается к  $180^\circ$ .

Способность объектива собирать оптическое излучение характеризуется его *светосилой*

$$J = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{F} \right)^2. \quad (9.6)$$

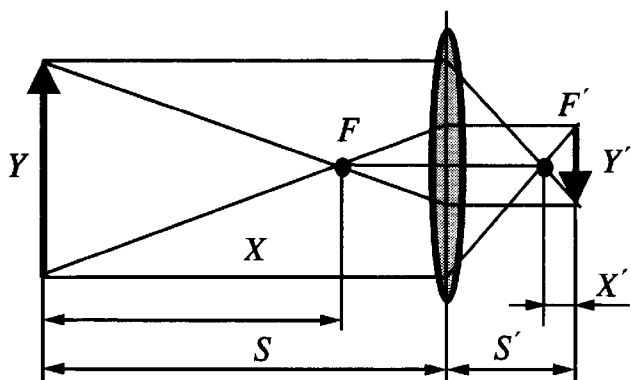


Рис. 9.8. Построение изображения в одиночной линзе

Для сравнения светосилы двух объективов нужно рассмотреть отношение квадратов относительных отверстий.

### 9.3.2. Мгновенный угол зрения и поле зрения

Если  $Y'$  есть размер чувствительной площадки фотоприемника, то величину  $Y'/S' = Y/S$  называют *мгновенным углом зрения* (instantaneous field of view – IFOV), который определяет пространственное разрешение системы (рис. 9.9). 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. 9.9. Для наблюдения удаленных предметов используют длиннофокусные узкоугольные объективы (ИК съемка с борта вертолета, анализ контактов ЛЭП и т.п.), тогда как широкоугольная оптика удобна, если 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  $18...20^\circ$  объективы, кото-

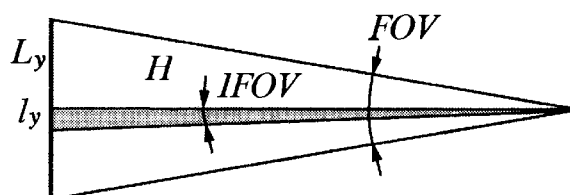


Рис. 9.9. Угол зрения и мгновенный угол зрения



рые обеспечивает приемлемое геометрическое разрешение в большинстве практических задач. В тепловизорах фирмы FLIR Systems часто используют пять объективов: 2,5°; 7°; 12°; 20° и 40°.

В табл. 9.2 приведены размеры зоны контроля на расстоянии 10 м для различных полей зрения. Для расстояний иных, нежели приведенных в табл. 9.2, следует произвести простой пропорциональный пересчет размеров зоны контроля: например, поле зрения 20° на расстоянии 100 м будет эквивалентно зоне размером  $3,5(100 / 10) = 35$  м.

### 9.2. 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 любой координате сканирования:

$$FOV = 2 \arctg \frac{L_y}{2H}; \quad (9.7)$$

$$IFOV = 2 \arctg \frac{L_y}{2H} \approx \frac{l_y}{H},$$

где  $L_y$  – размер контролируемой зоны по координате  $Y$ , определяемый полем зре-

ния тепловизора;  $l_y$  – размер зоны, визируемой в пределах мгновенного угла зрения (по координате  $Y$ ); как правило,  $L_x \neq L_y$  и  $l_x = l_y$ .

### 9.3.3. Щелевая функция чувствительности и модуляционная передаточная функция

Пусть на расстоянии  $H$  от детектора находится щель переменной ширины  $d$  (рис. 9.10). За щелью находится 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 %-ном спаде сигнала будет соответствовать пространственному разрешению при 50 %-ной 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 кон-

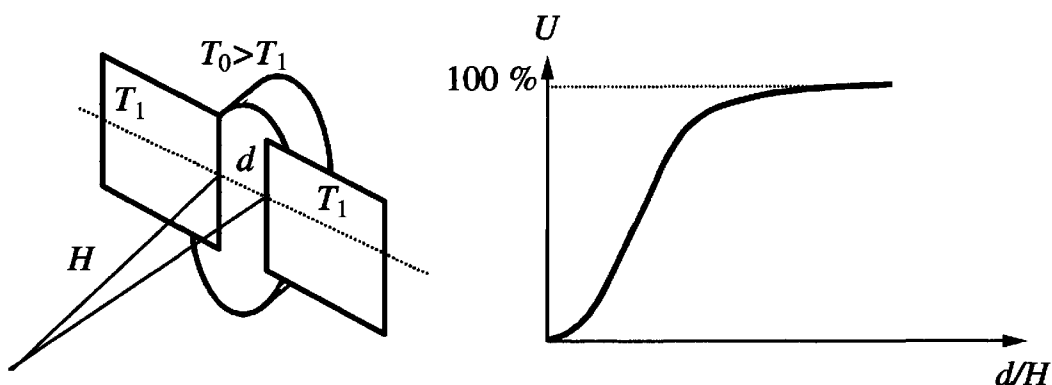


Рис. 9.10. Щелевая функция чувствительности

траст изображения как функцию 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 уровня шумов (см. п. 9.4.2).

## 9.4. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ТЕПЛОВИЗОРОВ

### 9.4.1. Формат и частота смены изображений

Формат изображения в матричных тепловизорах при правильно подобранной оптике соответствует числу отдельных элементов в матрице. Например, если распространённый формат микроболометрических матриц  $320 \times 240$  соответствует полю зрения  $24 \times 18^\circ$ , то мгновенный угол зрения будет одним и тем же по обеим ко-

ординатам: 
$$IFOV = \frac{24^\circ}{320} = \frac{18^\circ}{240} = 4,5' = 1,3 \text{ мрад.}$$
 Пространственное разрешение в горизонтальном направлении составит 320 элементов на каждую из 240 строк.

В цифровом анализе изображений вводят число *пикселей* (pixel – picture element), которое в общем случае может 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  $\tau_{sc}$ , 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  $f_{fr} = 1/\tau_{sc} = 30$  Гц.

В оптико-механических тепловизорах параметр  $f_{fr}$  определяют аналогичным образом. В ранних моделях сканировали два поля зрения (*чересстрочная развертка* – interlacing fields), которые накладывали друг на друга и формировали 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.  $f_{fr} = 25$  Гц.

Последовательности ИК изображений (термограмм) накапливают в аналоговой или цифровой форме. Аналоговую запись чаще всего выполняют в видео (телевизионном) формате с использованием стандартных видеоманитофонов, к которым непосредственно подключают тепловизоры, имеющие PAL, NTSC или SECAM выход. Согласование двух форматов (тепловизионного 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. Матричные тепловизоры характеризуются наибольшей частотой смены изображений, в частности, в ТК становятся обычными приборами с  $f_{fr} \sim 1200$  Гц, а применение принципа "окна" (windowing), т.е. вырезание окна меньших размеров из полной матрицы (например, окна  $32 \times 32$ ), обеспечивает скорость 14-битной цифровой записи до нескольких десятков кГц.

Современные компьютерные термографические системы позволяют накапливать весьма длинные последовательности

термограмм, число которых может превышать несколько тысяч. Запись осуществляют либо с максимальной скоростью, т.е. 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.

#### 9.4.2. 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  $\Delta T_{NETD}$ , 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  $\sqrt{\Delta \bar{T}^2}$ . Величину NETD определяют как изменение температуры  $\Delta T_{NETD}$ , которому соответствует отношение сигнал/шум  $S$ , равное единице:  $S = \Delta T_{NETD} / \sqrt{\Delta \bar{T}^2} = 1$  (иногда  $\Delta T_{NETD}$  принимают равным двум или трем стандартным отклонениям).

Величина NETD является типичной паспортной характеристикой тепловизи-

ров, приводимой в следующем виде:  $\Delta T_{NETD} = 0,07$  °С при температуре эталонного излучателя  $\Delta T_{ref} = 30$  °С.

Для оценки и сравнения тепловизоров рекомендована следующая формула определения  $\Delta T_{NETD}$  [162]

$$\begin{aligned} \Delta T_{NETD} &= \frac{4}{\pi} \left[ \frac{FN^2 \sqrt{\Delta f}}{D^* \sqrt{A_d} \frac{\partial R}{\partial T}} \right] = \\ &= \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f}}{D^* D^2 \sqrt{A_d} \frac{\partial R}{\partial T}}, \end{aligned} \quad (9.8)$$

где  $FN = F/D$  – показатель оптической системы (величина, обратная относительному отверстию);  $F$  – фокусное расстояние системы;  $D$  – эффективный диаметр оптической системы;  $\Delta f$  – 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/(м<sup>2</sup>·К·ср) –

производная от функции Планка по температуре ( $\partial R / \partial T$ ), отнесенная к единичному телесному углу.

Недостатком параметра  $\Delta T_{NETD}$  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 (9.8) справедлива для случая так называемого *реального* фотоприемника, не ограниченного шумами фона. Шумы идеального приемника ограничены только флуктуациями потока регистрируемых фотонов. Формулу для предельной величины  $\Delta T_{NETD}$  в этом случае можно найти в [12].

### Минимальная разрешаемая разность температур

Минимальную разрешаемую разность температур  $\Delta T_{MRTD}$  (Minimum Resolvable Temperature Difference – MRTD) определяют по эталонному излучателю (мире), образованному набором полос определенной 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  $\Delta T_{MRTD}$  обычно усредняют по нескольким операторам.

Величина  $\Delta T_{MRTD}$  прямо пропорциональна  $\Delta T_{NETD}$  и обратно пропорциональна модуляционной передаточной функции, определяя способность тепловизора различать детали теплового изображения. В целом этот параметр является более субъективным по сравнению с  $\Delta T_{NETD}$ .

### Динамический диапазон сигнала

Динамический диапазон (ДД) электронного устройства характеризует диапазон сигналов между максимальным  $U_{max}$  и минимальным  $U_{min}$  значениями, которые передаются (анализируются) без искажений. Обычно ДД выражают в децибелах, Дб:

$$\text{ДД} = 10 \log \frac{U_{max}}{U_{min}}. \quad (9.9)$$

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 12-, 14- или 16-битное представление электриче-

ского сигнала, что соответствует разбиению динамического диапазона на  $2^{12}$ ,  $2^{14}$ ,  $2^{16}$  уровней и определяет минимальный различаемый температурный сигнал.

## 9.5. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОВИЗОРЫ

### 9.5.1. Оптическая головка (сканер)

Вплоть до 1995 г. в большинстве измерительных тепловизоров использовались одноэлементные (в частности, SPRITE) приемники, которые посредством оптики в каждый данный момент времени были способны просматривать лишь часть сцены в весьма малом пространственном угле (мгновенном угле зрения). Для развертки сцены применялось оптико-механическое строчно-кадровое сканирование с помощью вращающихся зеркальных или прозрачных призм, которые в последнем случае выполнялись 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 приборами. С развитием ФРА-технологии последним барьером, разделяющим тепловизоры и передающие телевизионные трубки, является меньшее число элементов в измерительных тепловизорах (во многих моделях использована ФРА-матрица, состоящая из  $320 \times 240$  элементов, что, в принципе, соответствует формату видеозаписи). Следует отметить, что проблема улучшения пространственного разрешения решается весьма быстро. В настоящее время уже имеются показывающие тепловизоры высокого разрешения (до  $1024 \times 1024$  элементов в кадре), а измерительные тепловизоры приближаются к данному пределу.

Внимание пользователей следует обратить на тот факт, что реальное про-

пространственное разрешение тепловизора задается матрицей и объективом, а упоминаемое рядом производителей компьютерное "улучшение" формата, например, с  $160 \times 120$  до  $320 \times 240$  является искусственной операцией, не улучшающей пространственное разрешение прибора.

### 9.5.2. Электронный блок

Особенности обработки электрического сигнала на выходе ИК приемника описаны в [12, 155, 159 – 163]. В электронном блоке тепловизоров осуществляется ряд преобразований сигнала в реальном времени, после чего сигнал выводится в форме, удобной для его визуализации, чаще всего в телевизионном стандарте NTSC, PAL или SECAM, а также в виде цифрового 12-ти или 14-ти битного сигнала.

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, а также вычисление производной по времени. Например, если в тепловизоре 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 улучшится в  $\sqrt{4} = 2$  раза (т.е. станет равным  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Серьезную 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 тепло-

визора с телевизионным оборудованием. В современных тепловизорах имеется стандартный видеовыход, что позволяет записывать термоизображения с помощью видеоманитофона и воспроизводить их на 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. В тепловизорах ThermaCam P60 (P65) фирмы FLIR Systems использован отсоединяющийся цветной монитор, что позволяет осматривать труднодоступные места объектов.

### 9.5.3. Черно-белое и цветное представление термограмм

Цветное представление термограмм осуществляется путем псевдоцветового кодирования температуры, т.е. одной и той же температуре по желанию оператора могут соответствовать различные цвета. В тепловизорах используют разнообразные цветовые палитры, имеющие специфические названия, например, палитра "Радуга" (Rainbow), которая позволяет представить контрастными цветами две близкие температуры. 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 до недавнего времени предпочитали полутоновую шкалу "Серая" (Gray). В последнее время стала популярной палитра "Цветы каления железа" (Iron), которая совмещает в себе преимущества черно-белого и цветного представления изображений. Как отмечалось выше, общее правило выбора палит-

ры гласит, что на "низкоконтрастных" объектах следует применять высококонтрастные палитры и наоборот. При компьютерной обработке термограмм пользователи зачастую разрабатывают свои собственные цветовые палитры.

Следует заметить, 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 сигналов на экране монитора.

#### **9.5.4. Метрология тепловизоров и дополнительные возможности представления информации**

Высокие метрологические показатели тепловизоров достигаются использованием встроенных эталонов температуры и датчиков температуры отдельных критических (нагреваемых) узлов. Специальные микропроцессорные системы сохраняют цифровые отсчеты температуры стабильными во времени и не зависимыми (слабозависимыми) от колебаний температуры окружающей среды.

Помимо национального (и/или европейского) сертификата зарубежные тепловизоры, поставляемые на российский рынок, должны иметь сертификат Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование, бывший Госстандарт РФ). Заводская аттестация большинства моделей тепловизоров действительна в течение двух лет, после чего необходимо выполнять их периодическую поверку. Для этого используют аттестованные эталонные излучатели, или модели АЧТ. Аналогичные сертификаты Ростехрегулирования

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 при компьютерном анализе. Аппаратным или программным способом возможно профильное представление температуры вдоль выбранных направлений, вывод дифференциальных температур относительно указанного пользователем эталона, а также измерение статистических характеристик распределений температуры в областях различной 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 микроболометрических матриц. В некоторых тепловизорах в результате периодической самокалибровки происходят резкие скачки сигнала на уровне долей градуса, что осложняет обработку последовательности термограмм путем анализа изменения температуры во времени.

#### **9.5.5. Устройства записи и твердого копирования термограмм**

Термограммы регистрируют либо посредством аналоговой видеозаписи, в которой теряются абсолютные температурные значения (за исключением специальной цифровой записи на магнитную ленту в некоторых ранних моделях), либо посредством цифровой записи изображений с сохранением всех температурных значений и с последующей обработкой данных на компьютере. В первых цифровых тепловизорах изображения записывали на флоппи-диски. Затем была разработана непосредственная запись изображе-

ний в реальном времени на быстродействующий жесткий диск, который было необходимо приобретать отдельно от тепловизора (популярная в прошлые годы система Thermovision 900 фирмы FLIR Systems). В настоящее время чаще всего используют запись изображений на PCMCIA (или flash) карту, которая размещается в самом тепловизоре. Затем отдельные изображения или их последовательности обрабатывают на компьютерах типа "лэп-топ"; применение обычных персональных компьютеров требует специального устройства для чтения флэш-карт. Во многих современных тепловизорах ИК термограммы записывают во внутреннюю память, после чего их можно передать на компьютер. Возможна также непосредственная запись на жесткий диск компьютера в реальном времени с использованием порта USB, а также "огненной шины" (Fire Wire). В некоторых моделях тепловизоров параллельно с записью ИК термограмм можно записывать и передавать на компьютер видимые изображения, получаемые с помощью встроенных видеокамер.

Следует заметить, что "экономичные" тепловизоры обеспечивают запись только отдельных изображений, в то время как для проведения активного ТК необходима запись последовательностей изображений в процессе нагрева/охлаждения объектов контроля. Соответствующей опцией (иногда называемой "пакетной" записью) обладают универсальные и специализированные тепловизоры.

Твердые копии термограмм получают путем:

- распечатки с помощью видеопринтера;
- распечатки 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, строительстве и медицине. Фирма FLIR Systems предлагает шаблоны отчетов, разрешающие введение специфических формул обработки температурных значений и совместимые с MS Word.

### 9.5.6. Источники питания

Тепловизоры могут питаться от сети переменного тока через специальный адаптер, а также от аккумуляторов, размещаемых непосредственно в тепловизоре (ранее – на поясе оператора). В некоторых последних моделях используют стандартные аккумуляторы от видеокамер. Время работы тепловизора от заряженного аккумулятора может достигать нескольких часов.

### 9.5.7. Программные средства для ИК 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 (ныне FLIR Systems) каждое новое поколение тепловизоров сопровождала соответствующим пакетом программ, что позволяло пользователю приобретать не только отдельную тепловизионную камеру, но и 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, пакеты IrWin различных версий, предназначенные для работы с тепловизорами 400-й, 500-й и 600-й серий, а также последние версии программа ThermaCam Explorer, ThermaCam Reporter,

Quick Viewer и ThermaCam Researcher. 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 цифрового фотоаппарата (в некоторых тепловизорах имеется встроенная видеокамера, позволяющая записывать видеоизображение объекта контроля практически в том же ракурсе, что и основное ИК изображение). Программы дают возможность пользоваться стандартными функциями среды MS Windows, что делает их гибкими при написании и редактировании всевозможных документов. Последние версии позволяют работать сразу с несколькими "сшитыми" изображениями, в которых сохраняются температурные значения. Следует заметить, что для российского потребителя стоимость зарубежных компьютерных программ представляется завышенной, поэтому определенное распространение получили доморощенные программы, в которых температурные значения могут не сохраняться, если формат кадра неизвестен. В последних моделях западных тепловизоров открытие файлов исходных изображений, в особенности, с сохранением температурных отсчетов (формат «радиометрический jpeg»), затруднительно, поскольку используются различные

форматы записи, которые представляют "ноу-хау" фирм-изготовителей. 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.

Наиболее совершенные тепловизионные приборы поставляются в комплекте со специализированным программным обеспечением, ориентированным на приборы конкретной фирмы. В последние годы неизмерительные тепловизоры, помимо аналоговой записи в телевизионном формате, записывают термограммы в стандартных цифровых форматах (\*.jpeg, \*.avi), которые могут быть прочитаны многими программами MS Office. Однако принцип калибровки термограмм в истинных температурах, зашитый в специализированных программах, представляет "ноу-хау" производителей. Например, тепловизоры фирмы FLIR Systems записывают изображения в формате .img, или радиометрическом jpeg формате, японская фирма NEC использует формат .svt. В США приобретает популярность публичный нерадиометрический формат .fts, описание которого можно найти в Интернете.

Фирма FLIR Systems предоставляет бесплатные версии программ ThermaCAM Explorer и ThermaCAM QuickView (чтение термограмм), а также Report Viewer (чтение отчетов). К специализированным программам относятся: ThermaCAM Reporter 7 (составление отчетов), ThermaCAM DataBase (накопление и архивирование данных), ThermaCAM Researcher (запись



быстрых процессов в реальном времени и развитая обработка данных) и ThermoCAM RTools (развитая обработка радиометрических изображений). В последней версии софтвера Image Reporter пользователь может вводить свои формулы для обработки результатов температурных измерений.

Принцип поставки бесплатного программного обеспечения для чтения записанных термограмм и простой обработки данных (так называемые программы "читалки"), а также дорогостоящего дополнительного софтвера, который рекомендуется для развитой обработки термограмм, используется многими производителями тепловизоров.

В последнее время приобрела популярность технология Fusion (первоначально предложенная фирмой Fluke) для совмещения видимых и ИК изображений, что позволяет эффективно локализовать температурные аномалии.

Разрабатываются специализированные программы анализа ИК изображений. Российской фирмой "Инновация" предлагается пакет ThermoFit Pro, который предназначен для обработки результатов активного ТК. Программа позволяет выполнять предварительную фильтрацию и полиномиальную аппроксимацию данных, получать фазограммы и изображения главных компонент, анализировать статистику динамических температурных распределений, определять глубину и тепловое сопротивление дефектов, а также строить бинарные карты дефектов. Французская фирма CEDIP (ныне FLIR Systems) поставляет систему Altair LI, предназначенную для бесконтактного анализа механических напряжений в твердых телах. Входящая в систему компьютерная программа обеспечивает анализ переходных процессов, рассеяния тепла при динамическом нагружении, компенсацию изображений вследствие смещения образцов при испытании и т.п.

### 9.5.8. Аксессуары тепловизионных комплектов

В качестве аксессуаров фирмы-производители поставляют сменные объективы, спектральные фильтры (фильтр высоких температур или пламен, 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 видеоманитофоны, микрофон для записи речевых комментариев и т.п. Наиболее существенным, но весьма дорогостоящим аксессуаром тепловизоров являются дополнительные объективы, наличие которых существенно расширяет области применения ИК термографии. Например, если для обследования строительных сооружений зачастую достаточно объектива  $24 \times 18^\circ$ , встроенного во многие модели, то для обследования дымовых труб и верхний частей зданий необходим объектив  $4, 7$  или  $12^\circ$ .

### 9.5.9. 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 контейнера (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 ThermoCAM P60 фирмы FLIR Systems со следующими основными параметрами:

- температурное разрешение (NETD): 0,05 °C при 30 °C;
- спектральный диапазон: 7,5...13 мкм;
- пространственное разрешение 1,1 мрад;
- формат изображения: 320 × 240 (микроболометрический FPA приемник);
- частота смены изображений: 50/60 Гц.

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 со следующими параметрами:

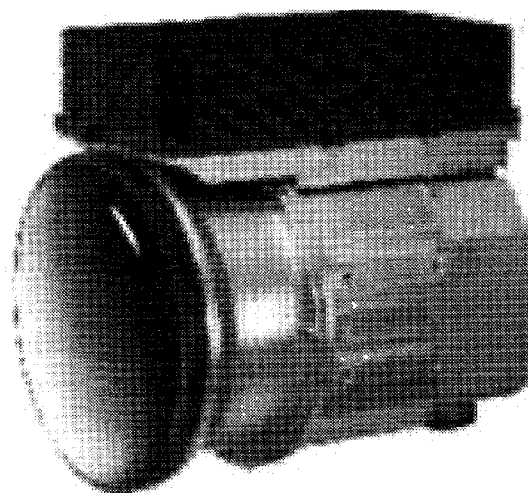
- температурное разрешение (NETD): 0,07 °C при 30 °C;
- спектральный диапазон: 3,4...5 мкм;
- пространственное разрешение 1,2 мрад;
- формат изображения: 256 × 256 (PtSi FPA приемник);
- частота смены изображений: 50/60 Гц.

Наконец, к 3-й категории отнесены длинноволновые высокоскоростные тепловизоры гибкой конфигурации, предназначенные для научных исследований,

например, прибор Silver 450M фирмы CEDIP (FLIR Systems), обладающий следующими основными параметрами:

- температурное разрешение (NETD): 0,02 °C при 30 °C;
- спектральный диапазон: 3,7...5 мкм;
- пространственное разрешение 1,1 мрад;
- формат изображения: 320 × 256 (InSb FPA приемник, охлаждаемый машиной Стирлинга);
- частота смены изображений: от 50 до 400 Гц (в некоторых моделях выделение окон меньших размеров позволяет достичь частоты смены изображений до десятков килогерц).

Современные тепловизоры второго поколения реализуют модульный принцип построения и используют FPA приемники (охлаждаемые или неохлаждаемые). Оснащение модуля ИК приемника объективом превращает его в тепловизионный модуль (core), а добавление телевизионного монитора позволяет построить показывающий тепловизор. Пример ИК тепловизионного модуля показан на рис. 9.11. Введение в тепловизор измери-



**Рис. 9.11. Неохлаждаемый ИК тепловизионный модуль UC-624 (FLIR Systems, США)**

Тип детектора: болометрическая матрица  
 Формат матрицы: 320 × 240  
 Спектральный диапазон: 8...14 мкм  
 Области применения: ночное видение, военная сфера

тельной функции требует значительных технических усилий, составляющих предмет "ноу-хау" фирм-изготовителей; в особенности это относится к системам с охлаждаемыми матрицами.

#### 9.5.10. Коммерческие тепловизоры

Информацию о мировых производителях ИК тепловизоров можно найти на сайте [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com). Основные технические характеристики большинства моделей приведены в табл. 9.3 (использованы материалы ежегодной выставки Defense & Security, США). Следует отметить, что многие российские тепловизоры, описанные в таблице, к настоящему времени устарели, а некоторые приборы выпускались в единичных экземплярах. Ниже будут рассмотрены типовые коммерческие модели (см. рис. 9.12). Фирмы-производители применяют гибкую ценовую политику, при которой стоимость тепловизионных систем зависит от их комплектации, в особенности от типа объекта, наличия фильтров, устройств записи и документирования термограмм, а также программного продукта. Ориентировочно можно отметить, что отпускная цена фирм на базовые комплекты показывающих тепловизоров высокого уровня составляет от 6 до 10 тысяч долларов США, качественные измерительные приборы могут стоить 20 – 60 тысяч долларов, а стоимость специализированных моделей, например, устанавливаемых на гироплатформах летательных аппаратов, может превышать 100 тысяч долларов США (здесь приведены цены ex works, т.е. отпускные цены заводов-изготовителей). В последние годы на рынке появились недорогие измерительные тепловизоры, например, i5 и InfraCAM фирмы FLIR Systems, или Ti 30 фирмы Fluke, стоимостью 3 – 14 тысяч долларов США. Следует также подчеркнуть, что в силу интенсивной конкуренции на мировом рынке, тепловизоры одного класса, но выпускаемые различными фирмами, имеют близкие цены, колебания которых

обычно связаны с различным уровнем сервиса в конкретной стране, а также с комплектацией системы всевозможными аксессуарами.

Недавно на российском рынке появились индикаторные ИК приборы фирмы Game Finder (США), предназначенные для охоты и некорректно называемые "тепловизорами" (табл. 9.3). Приборы снабжены светодиодными индикаторами, показывающими присутствие тепловых источников (дичи) определенного размера и температуры. В зависимости от погодных условий и модели дальность обнаружения источника размером с лося может достигать 650 м, человека – 100 м. Минимальная стоимость таких приборов в США – около 150 долларов.

По принципу действия тепловизоры являются универсальными средствами наблюдения и измерения, поэтому термин "специализированный тепловизор" следует применять с осторожностью. Специализированными можно считать тепловизоры, используемые в противопожарной деятельности и обладающие повышенной устойчивостью к внешним воздействиям, например, прибор K1000 Elite фирмы ISG, США, а также при ночном вождении транспортных средств (тепловизор DVE-1000 от Digital Imaging Infrared, США). Повышенные требования к пространственному разрешению, виброустойчивости, а также дистанционному управлению тепловизорами требуются от приборов, устанавливаемых на гироплатформах (подвесках) летательных аппаратов. Для работы в условиях открытого космоса фирма FLIR Systems модернизировала одну из своих моделей, предложив клавиатуру большого размера и обеспечив защиту от радиационного воздействия космоса. Так называемые "медицинские тепловизоры" обладают повышенной температурной чувствительностью и поставляются в комплекте со специальными аксессуарами: специализированным софтвером, поворотными зеркалами для обследования пациентов в лежащем положении и т.п.

9.3. Технические параметры отечественных и зарубежных тепловизоров  
(данные по состоянию на апрель 2009 г.) \*

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
<i>Отечественные приборы (СНГ)</i>									
БТВ-3, "Исток"	-20...+200	0,15	ДВ	100 строк	16	-	Через компьютер	20	-
ТВ-03К ЗАО "СВЗМ"	-5...+500	0,1	-	128 × 128	1 / 3,2	-	Через компьютер	2	-
ТВ-04, "Исток"	+10...+100	0,15	3,5...5,5	128 × 128	1 / 3	-	Через компьютер	3	-
Измерительный тепловизор, ТОО "Конгар"	Измерительный прибор +30...+400	0,1	3...5	-	-	-30...+40	-	-	-
Радуга-4, АОМЗ	25...+50	0,2	-	140 × 132	25	-	Через компьютер	-	-
Радуга-5, АОМЗ	До +250	0,1	-	184 × 132	25	-	Через компьютер	-	-
Радуга-ТВЦ, АОМЗ	До +200	0,2	-	140 × 132	25	-	Через компьютер	-	-
ТеплоКам, НПП "Гамма"	Измерительный прибор -10...+500 (с фильтром до +2000)	0,05	8...14	Пирозлектр. ЭОП	250 линий	-40...+50	Отсутствует	0,8	6 000 \$
ТВС-М1, КТИ вычислительной техники СО РАН	-10...+1600	0,1	3...5	128 × 128 (азот)	1	-	Управление компьютером	8	-
ТПВ-1М, Санкт-Петербург	-10...+500	0,3	3...5	64 × 128	30	-	Ввод в компьютер	0,9	12 950 \$

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
TRI-9400S, АВИС	—	—	8...12 3...5	—	—	—	Встроенный компьютер с запоминанием до 2000 изображений	—	—
"Термовидеоискан" ТРВС-21, АВИС	Контролируемые температуры -20...+250	0,15	3...5	—	Строки 140 Гц, 224 эл./стр.	—	Встроенная видеокамера и монитор	1,6 (сканер)	—
ПЗС камера TVC300, ГУП "НПП "Электрон-Оptronик" ЗАО "НПП "Силар"	Показывающий прибор	0,1	1,8...5,3	320 × 240 (азот, Сtirлинг)	25	-15...+40	Работа автономно и с компьютером Флэш-карта	—	—
ПЗС камера TVC400, ГУП "НПП "Электрон-Оptronик" ЗАО "НПП "Силар"	Показывающий прибор	0,1	1,8...5,3	480 × 320 (азот, Сtirлинг)	25	-15...+40	Работа автономно и с компьютером Флэш-карта	—	—
"Патриот", Пергам Инжиниринг	Показывающий прибор	0,085	7,5...13,5	160 × 120 (неохл.)	—	-32...+55	РАL	2,1	—
"Лик-2", НПП "Термотех"	Показывающий прибор (расчет температуры по двум контрольным точкам)	0,03	3...5	256 × 256 128 × 128 (охл.)	25 (50)	-15...+50	Ввод в компьютер Программа ТЕРМО	3,2	От 12 000 \$ до 35 000 \$
TRI-9301, МВП "Т-Т"	—	0,1	8...13	175 × 200	6	-30...+40	—	8,4 (2 блока)	—

TRI-9400SL, МВП "Т-П-Г"	-20...+1500	0,1	8...12	175 × 200	6	-30...+40	8,4 (2 блока)	-
Метис-2, ГИПО	Показывающий прибор	-	8...13	-	-	-50...+60	11	-
Сосна, "Метрон"	Показывающий прибор -20...+200	0,1	3...5	48-ми элементный детектор	25	-20...+40	3,1	-
ИРИС-2000 (200), "ИРИС"	-20...+350	0,05	3...5 8...12	256 × 256	1 / 1,5	-10...+45	1,8 (камера)	18 000 \$
ИСКРА, ГИПО	-10...+40	0,1	-	-	-	-	-	-
ТКвр-ИФП, ИФП	+20...+41 °С (медицин.)	0,03	2,9	128 × 128	-	-	5	20 000 \$
ТЕРМ, КТИ ПМ СО РАН		0,03	2,8...3,5	128 × 128 (азот)	10...50	-	3,5	-
"Сыч", ОАО "Русэлектроника"	Показывающий прибор	0,1 0,25	8...12	Микролометр Пирозлектрик	-	-15...+45	2,8 3,8	-
МТ, Загорский оптико-механический завод	-	0,1	3...5	-	-	±40	2	18 000 \$
Инфраком-9201, МНПП "Нейроком"	Измерительный прибор -1...+200		8...12 (ох-лажд.)	100 × 100	6	-	18	-
ИК камера, "Орион"	-	0,05	3,8...5,6	128 × 128 (азот)	125 (?)	-	-	-
ТН-1, МНПО "Спектр"	-30...+300	0,15	7...14	Пировидикон 150 линий	25	-	10,5	-
ТН-4604МБ, МНПО "Спектр"	-	0,12	7...14	160 × 120 (неохл.)	25	-	2,5	-
"Кагран", МНПО "Спектр"	Показывающий прибор	0,12	7...14	160 × 120 (неохл.)	25	-	0,85	-
"Спрут", МНПО "Спектр"	Показывающий прибор	0,05	7...14	320 × 240 (неохл.)	25	-	1,2	-
"Скаг", МНПО "Спектр"	Показывающий прибор	0,12	7...14	320 × 240 (неохл.)	25	-	2	-
ТН-4604МП, МНПО "Спектр"	Встроенный ИК термометр	0,1	7...14	320 × 240 (неохл.)	25	-	3,5	25 000 \$

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масла, кг	Цена, область применения, доп. функ-ции **
ТН-4604МП 100, МНПО "Спектр"	Встроенный ИК термометр	0,1	7...14	320 × 240 (неохл.)	25	-	-	5,7	25 000 \$
ЛКС-ТК1, Технол. парк космонавтики "Линкос"	Показывающий прибор	-	8...14	320 × 240 (неохл.)	-	-	-	1,5	-
"Скопа-2", "Циклон"	Показывающий прибор	0,1	7...12	-	-	-20...+45	-	-	-
"Мути", "Циклон"	Показывающий прибор	0,1	7...12	160 × 120	-	-20...+65	-	-	-
"ТОР-320", "Циклон"	Показывающий прибор	0,1	7...12	320 × 240 (микроболометр)	-	-20...+45	-	0,35	-
"SPR", "Циклон"	Показывающий прибор	0,1	7...12	160 × 120	-	-20...+65	-	-	-
"SPR", "Циклон"	Показывающий прибор	0,1	7...12	160 × 120	-	-20...+65	-	-	Поисковые работы
"Грифон", "Циклон"	Показывающий прибор видимого и ИК диапазонов	0,15	8...12	320 × 240	-	-20...+65	-	8,5	Поисковые работы
"Титан" (на базе теллоизи-ра FLIR Systems)	Показывающий прибор	0,035	7,5...13,5	320 × 240	30 (25)	-65...+55	PAL	3,6	-
<i>Теллоизоры производства фирмы FLIR Systems, США***</i>									
ThermaCAM 545	Показывающий прибор -20...+350	0,1	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+50	РСМСІ карта, 8 бит. PAL	1,9	27 500 \$
Thermovision 570	Измерительный прибор для технической диагностики -20...+2000	0,1	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+50	РСМСІ карта, 14 бит. Видеовыход PAL. Запись звука	1,9	45 000 \$

ThermaSAM 695	Измерительный прибор -40...+2000	0,1	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 14 бит. PAL. Запись звука	1,9	48 900 \$
ThermaSAM SC 500	Измерительный прибор для научных исследований -20...+500 (+2000)	0,1	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 14 бит цифро-вой, 8-бит Вітмар. Видеовыход PAL. Запись звука	2,6	65 000 \$
ThermaSAM SC 1000 (последняя модель 1500)	Измерительный прибор для научных исследований -20...+450 (+2000)	0,07	3,4...5	320 × 240	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 14 бит цифро-вой, 8-бит Вітмар. Запись звука	2,7	75 000 \$ Модель 1500 до 130 000 \$
ThermaSAM SC 2000	Измерительный прибор для научных исследований -20...+500 (+2000)	0,1	7,5...13	320 × 240	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 14 бит, 8-бит Вітмар. Запись звука	2,7	75 000 \$
ThermaSAM SC 3000	Измерительный прибор для научных исследований -20...+2000 °С	0,02	8...9	GaAs QWIP 320 × 240	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 14 бит. Запись звука	3,2	81 700 \$
Thermo Vision SC 4000	Показывающий прибор	0,025	3...5	320 × 256	30	-40...+71	USB порт. Гигабитн. Ethernet	-	-
Thermo Vision SC 6000	Измерительный прибор для научных исследований	0,025 0,035	0,9...1,7 3...5 8...9,2	InGaAs InSb GaAsQWIP 640 × 512	1...125	-40...+71	USB порт. Гигабитн. Ethernet	-	-
ThermaSAM PM 390	Измерительный прибор -10...+2000 (2000)	0,07	3,4...5	PtSi FPA 256 × 256	50 (60)	-15...+50	РСМС1 карта, 12 бит. PAL	1,7	56 800 \$



Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Маска, кг	Цена, область применения, доп. функции **
ThermaCAM E2 (E1, ES, EM, E4)	Измерительный прибор -20...+250	0,12	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	Флэш-память, до 50 изображений JPEG USB порт	0,7	18 000 \$ 13 000 \$ (показыв. версия)
ThermaCAM B1, B2	Измерительный прибор -20...+250	0,12	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	Флэш-память, до 50 изображений JPEG. USB порт	0,7	Строительство
ThermaCAM B20	Измерительный прибор	-	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	-	1,4	Строительство
BCAM		0,15	7,5...13	120 × 120 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	USB порт. JPEG формат	0,55	Строительство
ThermaCAM Scout	Показывающий прибор -20...+250	0,08...0,1	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	Флэш-память, до 100 изображений JPEG	0,7	Охрана и наблюдение
ThermaCAM E25	Измерительный прибор -20...+250	0,2	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	Флэш-память, до 50 изображений JPEG (100 в модели E4). USB порт	0,7	9 950 Евро. Электроэнергетика
ThermaCAM P25F (для высоких температур)	Измерительный прибор +300...+1500	0,6	3,9	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-	Флэш-карта, 128 Мб	1,4	
ThermaCAM P50F (для высоких температур)	Измерительный прибор +300...+1500	0,6	3,9	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-	Флэш-карта, 256 Мб	1,4	Внешнее управление
ThermaCAM E45	Измерительный прибор -20...+250	0,1	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	-	0,7	22 000 Евро (в России)

ThermaCAM E65	Измерительный прибор -20...+250	0,1	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	200JPEG термограмм в память	0,7	30 000 Евро (в России)
ThermaCAM EX320 (BX320)	Измерительный прибор -20...+500 (-20...+100)	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+45	80JPEG термограмм в память	0,8	-
ThermaCAM P10	Измерительный прибор -40...+1000	0,06	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	50JPEG термограмм, встроенная Флэш- память	1,4	Научные исследования
ThermaCAM P20	Измерительный прибор	-	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-	Флэш-карта, 128 Мб	1,4	-
ThermaCAM P25	Измерительный прибор -40...+500 (расширение- до 1000 °С)	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-	Флэш-карта, 128 Мб	1,4	42 000 Евро (в России)
ThermaCAM P40	Измерительный прибор -40...+2000	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	1,4	55 000 Евро (в России). Запись речи
ThermaCAM P45	Измерительный прибор -40...+500	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	1,4	55 000 Евро (в России). Запись речи
ThermaCAM P60	Измерительный прибор -40...+2000	0,06	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб. Формат JPEG	-	~60 000 Евро Лазерная наводка. Видеокамера. Запись речи
ThermaCAM P65	Измерительный прибор -40...+500 (расширение до 1000 °С)	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 256 Мб. Встроенная память 50 кадров. Формат JPEG, 14 бит	2	~60 000 Евро (в России). Лазерная наводка. Видеокамера. Запись речи

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
ThermaCAM P65HS	Измерительный прибор -40...+500 (расширение до 1500 °С)	0,05	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 256 Мб. Встроенная память 100 кадров. Формат JPEG, 14 бит	2	-
ThermaCAM S40	Измерительный прибор -40...2000	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб. IEEE1394 FireWire	2 (с ак- кум.)	68 000 Евро (в России). Лазерная навodka. Видеокамера
ThermaCAM S65	Измерительный прибор -40...2000	0,08	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC,PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб. IEEE1394 FireWire	1,4	-
ThermaCAM S65HS	Измерительный прибор -40...1500	0,05	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб. IEEE1394 FireWire	4,4	Лазерная навodka. Видеокамера
FLIR T200	Измерительный прибор -20...120 0...350 (до 1200)	0,1	7,5...13	200 × 150	-	-15...+50	USB SD карта	0,88	Экономич- ная модель. Режим слия- ния
FLIR T360	Измерительный прибор -20...120 0...350 (до 1200)	0,06	7,5...13	320 × 240	-	-15...+50	USB SD карта	0,88	Экономич- ная модель. Режим слияния

FLIR T400	Измерительный прибор -20...120 0...350 (до 1200)	0,05	7,5...13	320 × 240		-15...+50	USB SD карта	0,88	Экономичная модель. Режим слияния
ThermaCAM E300	Измерительный прибор -20...500 250...1250	0,1 °C	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	0,8	-
ThermaCAM E320	Измерительный прибор -20...500 250...1250	0,1 °C	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	0,8	-
ThermaCAM P640	Измерительный прибор -20...500 250...1250	0,1 °C	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	0,8	~70 000 Евро
ThermaCAM B640	Измерительный прибор -20...500 250...1250	0,1 °C	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	0,8	-
ThermaCAM SC640	Измерительный прибор -20...500 250...1250	0,1 °C	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60) NTSC, PAL	-15...+50	Флэш-карта, 128 Мб	0,8	-
ThermoVision A10 (бывшая камера Indigo Omega)	Модуль измерительного тепловизора до +150 (до +400)	0,085	-	160 × 120 (неохл.)	25 (30)	0...+40 (спецзаказ -40...+50)	Цифровой: RS-232. Аналоговый: RS-170 А или CCIR	0,12	9 000 – 13 000 \$ (в зависимости от объёма ектива)
ThermoVision A20-M	Модуль измерительного тепловизора -20...+1200	0,12	-	160 × 120 (неохл.)	50 (60)	-	Видеовыход PAL. IEEE-1394 Fire Wire. RJ-45 Ethernet	0,8	Научные исследования и системы автоматизация
ThermoVision A40-M	Модуль измерительного тепловизора 40...+2000	0,08	-	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-	Видеовыход PAL. IEEE-1394 Fire Wire. RJ-45 Ethernet	1,4	Научные исследования и системы автоматизация

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображения, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения **
Photon	Модуль показывающего тепловизора, до +560 °С	0,085	7,5...13,5	324 × 256 (неохл.)	30	-40...+75	Видеовыход NTSC. Цифровой выход 14 бит LVDS	0,115	Научные исследования и системы автоматизация
InfraSAM	Измерительный прибор -10...+350	0,2	7,5...13	120 × 120	9	-15...+50	USB порт. Лазерный целеуказатель. 50 избобр. во встр. память	0,55	9 000 \$ Энергетика, строительство
ThermoVision DoubleQWIP	Показывающий модуль (2 угла зрения)	0,03 °С	8...9	320 × 240 (QWIP, Стирлинг)	50 (60)	-32...+55	14 бит	3	-
ThermoVision TripleQWIP	Показывающий модуль (3 угла зрения)	0,03 °С	8...9	320 × 240 (QWIP, Стирлинг)	50 (60)	-32...+55	14 бит	7,1	-
Thermovision IRMV 320M	Показывающий прибор -20...+500 (+2000)	0,1	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-15...+50	Видеовыход PAL	3,0	-
Thermovision Security HD	Показывающий прибор (+ ТВ камера)	-	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-	Аналоговый RS-170 А или CCR	4,6	-
Thermovision Sentinel	Показывающий прибор	-	7,5...13	320 × 240 (неохл.)	50 (60)	-32...+60	-	6	-
Thermovision WideEye	Показывающий прибор (поле зрения 180 × 38°)	-	7,5...13,5	640 × 120 (неохл.)	60	-40...+55	Аналоговый RS-170A	0,86	-

Thermovision FlashSight	Показывающий прибор (поле зрения 180 × 38°)	–	7,5...13,5	160 × 120	30 (25)	–40...+55	Аналоговый RS-170A	3,5	–
ThermaCAM Phoenix, (бывшая камера Indigo Omega)	Измерительный прибор	0,025	2...5,5	320 × 240 или 640 × 512	100 Гц при 640 × 512, 345 Гц при 320 × 256, 38 кГц при 2 × 128	–20...+71	14 бит	3,2	От 80 до 150 000 \$
ThermoVision Photon	Показывающий прибор (поле зрения 180 × 38°)	–	7,5...13,5	320 × 240 320 × 120 (неохл.)	NTSC	–40...+75	14 бит	0,12	–
ThermaCAM Merlin, Indigo, FLIR Systems, США	Показывающий прибор 0...+70 или 0...+600	0,6	8...13	320 × 240 (неохл.)	NTSC, PAL	–	12 бит	1,8	19 000 \$
ThermoVision 2000MS	Показывающий прибор	0,03	8,2...9,2	320 × 240 (QWIP)	NTSC, PAL	–32...+55	–	25	–
ThermoVision 3000MS	Показывающий прибор	0,03	8,2...9,2	640 × 480 (QWIP)	NTSC, PAL	–32...+55	–	25	–
Jade II, FLIR Systems-SEDIP	Измерительный прибор до +1200	0,02...0,1	8...14 3...5	320 × 240 (неохл.)	150	–	Вывод на РС	2	–
Jade 570M, FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор до +1200	0,02	3,7...4,9	HgCdTe 320 × 256 (Стирлинг)	5...250	–	Вывод на РС	–	–
Emerald, FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор	0,025	3...5	320 × 240 (неохл.)	150	–	Вывод на РС	2	–
Silver 220S, FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор	0,02	0,8...2,5 HgTeCd (TE-cooled)	320 × 256	5...100	–15...+50	Компьютер	3,8	–
Silver 450M, FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор	0,02	3,7...5	InSb 320 × 256 (Стирлинг)	5...400	–15...+50	Вывод на РС	3,8	–
Aquamarine, FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор	0,025	3,7...5	320 × 256 (Стирлинг)	–	–	Вывод на РС	–	Технологические процессы

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображения, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, дуп. функция **
Pharos, FLIR Systems-CEDIP	Двухкан. CCD камера	0,065	8...14	384 × 288 (неохл.)	—	-20...+55	—	7	Наблюдение
SC 7000 (Orion, Titanium), FLIR Systems-CEDIP	Измерительный прибор -20...+3000	0,018	1,5...5 8...2 3...5 8...12	320 × 256 640 × 512	380 (до 20 кГц)	-20...+55	Компьютер	4,95	Научные исследования
Alpha, (бывшая камера Indigo)	Показывающий прибор	—	7,5...13,5	160 × 128	25 (CCIR) 30 (RS170A)	0...+45	Монохромный RS-170 формат. 12-бит цифровой выход	0,2	15 000 \$
i5	0...+250	0,1	7...13	80 × 80	9	—	—	—	3 000 \$
<i>Прочие зарубежные тепловизоры</i>									
IRIS-256ST, Cincinnati Electronics, США	Показывающий прибор -20...+300	0,025	2,2...4,6	256 × 256 (Стирлинг)	—	—	12бит, TTL	3,5	—
Sentinel, Amber, США	Показывающий прибор -20...+150	0,01	8...12	320 × 240	30	-20...+45	NTSC, PAL	—	—
IRC640, David Sarnoff Research Center, США	Показывающий прибор	0,15	PtSi	640 × 480 (азот)	30	—	RS-170, 12 бит	—	—
RayCAM, Gauvin Arnoux	Измерительный прибор -20...+250	0,1	8...14	160 × 120 (неохл.)	9	-10...+50	USB, видео	0,7	Лазер
Ti9, Fluke, США	Измерительный прибор -20...+250	0,2	7,5...14	160 × 120 (неохл.)	20	-10...+50	SD карта	1,2	Фотокамера. Экономичная модель

TI30, Fluke, США	Измерительный прибор -10...+250	0,1	7,5...14	160 × 120 (неохл.)	20	-10...+50	Флэш-карта, до 100 изоб- JPEG, USB	1	15 000 \$ (в России)
TI45FT, Fluke, США	Измерительный прибор -20...+1200	0,08	8...14	160 × 120 (неохл.)	30	-10...+50	Флэш-карта, до 1000 изоб- CSV, TXT, JPEG	1,95	800 000 руб. (в России)
TI55FT, Fluke, США	Измерительный прибор -20...+600	0,05	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-10...+50	Флэш-карта, до 1000 изоб- CSV, TXT, JPEG	1,95	22 000 \$ (в США)
TVS-120, Nippon Avionics, Япония	Измерительный прибор -10...+950	0,2	3,6...5,0	InSb 640 × 512 (Стерлинг)	5...120	-	14 бит	4	-
TVS-200, Nippon Avionics, Япония	Измерительный прибор -20...+900	0,08	3,6...5,0	320 × 240 (неохл.)	60 (50)	-10...+50	Флэш-карта	1,6	-
TVS-2000MKIILW, Nippon Avionics, Япония	Показывающий тепловиз. сканер	0,1 °С	8...12	320 × 240 12 бит	30	0...+40	Видеовыход PAL, NTSC, RS-232 PCMCIA карта	-	-
IR-M700, Mitsubishi Electron- ics, Япония	Показывающий прибор	0,08	1,2...5,9	801 × 512 (охл.)	60	-10...+50	Видеовыход NTSC, RS-32, 10 бит	4,9 (камера)	59 000 \$
LAIRD-3ASH, Nikon, Япония	Показывающий прибор -20...+2000	0,09...0,15	3...5	768 × 494	30	-	NTSC RS-232 Запись на компьютер	2,5	-
LAIRD-S270, Nikon, Япония	Показывающий прибор -20...+2000	0,2	3...5	475 × 422	30	-	Видеовыход RS-422, 10 бит	2,5	48 000 \$
TVS-500 NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+500 (до +2000)	0,06	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-10...+50	Флэш-карта, USB	1,7	Режим слияния



Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, долл. фунт-ции **
ThermoTracer TH7102, NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,08	8...14	320 × 240	60	-15...+50	Флэш-карта. Формат кадров SIT, BMP, JPEG	1,7	До 65 000 \$ (в России)
ThermoTracer TS7302, Mikron, США NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,08	8...14	320 × 240	60	-15...+50	Флэш-карта. Формат кадров SIT, BMP, JPEG	1,4	--
ThermoTracer TH5102, Mikron, США NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -20...+800	0,03	8..12	HgCdTe 255 × 223	22	-20...+50	Встр. память на 64 изображ. РСМСІА карта до 80 Мб. 12 бит	3,8	
MiKroScan-5104, или TN-5104, Mikron, США NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -10...+1500	0,1	3...5,3	255 × 223	2; 22	-10...+50	РСМСІА карта до 80 Мб 12 бит	2,5	25 000 \$ (в России)
TH-6100, Mikron, США NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -20...+500	0,1	8...14	320 × 240	30	-10...+50	Встр. память 64 Мб (124 термограммы 16 бит)	2,5	30 000 \$ (в России)
TH-6200 (S-160), NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -20...+250	0,1	8...14	160 × 120	30	-20...+50	Встр. память 64 Мб (124 термограммы)	0,7	--

ТН-3106, NEC Avio, Япония	Измерительный медицинский прибор -10...+70	0,1		HgCdTe 344 × 207 (азот)	1 / 0,8	+5...+40	Встр. память на 4 изображ. Плата на 5000 изображ.	3 (камера) 3,8 (блок)	56 000 \$
ТН-3108, NEC Avio, Япония	Измерительный медицинский прибор 0...+70	0,1		HgCdTe 261 × 207 (термоэл.)	1 / 0,8	+5...+40	Встр. память на 4 изображ. Плата на 5000 изображ.	3 (камера) 3,8 (блок)	59 000 \$
ТН-7200, NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,1	8...14	320 × 240 (неохл.)	30	-	РСМСІ карта	1,8	35 000 \$
ТН-7700, 7800, NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -20...+250 (до +1000)	0,1	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-15...+50	1000 изображ. во встр. па- мять	1,3	
Термо Tracer ТН-77166 NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+500 (до +1000)	0,1	8...14	160 × 120 (неохл.)	-	-15...+50	Встроен. Флэш-память USB	1,3	Лазер. Режим сляния
Термо Shot F30 NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -20...+350	0,1	8...13	160 × 120 (неохл.)	Одно- кратная съемка	-15...+50	SD карта USB	0,35	-
ТН-9100 Pro (PMV, PWV), NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,02...0,03	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-15...+50	Флэш-карта. Формат кад- ров SIT, BMP, JPEG	1,7	50 000 \$ (в России)
ТН-9260 Pro, NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,02	8...14	640 × 480 (неохл.)	30	-15...+50	-	1,7	-
MikroScan-7515, Mikron, США NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+500	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	30; 60	-15...+50	РСМСІ карта, 16 Мб	-	35 000 \$
TS-7302, NEC Avio, Япония	Измерительный прибор -40...+2000	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-15...+50	14 бит Флэш-карта. Память на 1664 термо- граммы в реальном времени	1,4	-

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
ExplorIR, Raytheon, США	Измерительный прибор -20...+900	0,15	8...14	320 × 240 (неохл.)	30	0...+40	RS-232 PCMCIA карта 10 Мб	2,9	35 000 \$ (цветн.)
PalmIR 225 Digital, Raytheon, США	Показывающий прибор	-	7...14	160 × 120 (неохл.)	30; 25	-20...+49	-	1,2	7 000 \$ (ч/б) 18 000 \$ (цветн.)
PalmIR 250 Digital, Raytheon, США	Показывающий прибор, интервал отн. окр. среды 500 °С	0,1 °С	7...14	320 × 240 (неохл.)	30 (NTSC) 25 (PAL)	-20...+49	-	1,8	13 000 \$ (ч/б) 18 000 \$ (цветн.)
Series 300, Raytheon, США (последняя версия ControlIR 300D)	ИК видеокамера	0,08	7...14	320 × 240 (неохл.)	30	-20...+49	Видеовыход RS-232	0,68	13 000 \$
Pro 400 Digital, Raytheon, США	Показывающий прибор	0,1	7...14	320 × 240 (неохл.)	50; 60	0...+40	Запись на флэш-карту 16 Мб	2,3	-
ProtectIR 400, Raytheon, США	Показывающий прибор	-	7...14	160 × 120 (неохл.)	50; 60	-40...+55	-	4,5	-
Radiometric 500 Digital, Raytheon, США	Измерительный прибор	0,1	7...14	320 × 240 (неохл.)	50; 60	0...+40	Запись на флэш-карту 16 Мб	2,3	25 000 \$ (цветн.)
Galileo, Amber Raytheon, США	Показывающий прибор	0,025	3...5	256 × 256 (охл.)	1400 (при 64 × 64)	0...+50	12 бит	4,5	90 000 \$
IRC640L, David Sarnoff Research Center, США	Показывающий прибор	0,15	-	640 × 480 (жидкий азот или Стирлинг)	-	-	Видеовыход NTSC, RS-232	-	-

IRN32043, David Sarnoff Research Center, США	Показывающая камера и блок питания	0,08	-	320 × 244 PtSi (жидкий азот)	30	-	-	Видеовыход NTSC, RS-170 А видео	-	-
FireOptic, ICC, США	Показывающий прибор (пожарн.) -20...+60	-	-	320 × 240 (неохл.)	-	-	-	-	-	20 000 \$
TIR2 FlexCam, Fluke, США	Измерительный прибор -20...+100	0,07	8...14	160 × 120 (неохл.)	30	-10...+50	1,95	1000 изо- браж., флэш-карта	-	-
TIR4 FlexCam, Fluke, США	Измерительный прибор -20...+100	0,05	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-10...+50	1,95	1000 изо- браж., флэш-карта	-	-
HotShotLT, Electrophysics, США	Измерительный прибор -20...+250	0,1	7,5...14	160 × 120	-	-5...+50	0,86	USB 12 бит tiff, jpeg Встр. память 64 Мб (500 термо- грамм)	-	-
IRI 1001E, IRISYS, Великобритания	Измерительный прибор -10...+30 +30...+300 +300...+1000	0,3	8...14 (пиро- электри- ческая матрица 16 × 16)	96 × 96	8	-5...+50	-	Прямая за- пись в ком- пьютер	-	Лазерный указатель
IRI 1002, IRISYS, Великобритания	Многоочечный термометр -10...+600	0,5	8...14 (пиро- электри- ческая матрица 16 × 16)	16 × 16	8	-5...+50	0,7	RS232	-	-
IRI 1011, IRISYS, Великобритания	Измерительный прибор -10...+300	0,3	8...14 (пиро- электри- ческая матрица 16 × 16)	96 × 96	8	-5...+50	0,6	Прямая запись в компьютер до 100 изо- браж. на 1 Мб памяти	-	Лазерный указатель

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображения, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Маска, кг	Цена, область применения, доп. функции **
IRI 4010, IRISYS, Великобритания	Измерительный прибор	0,15	8...14	160 × 120 (неохл.)	8	-5...+50	До 1000 изображ. на SD карту	-	Лазерный указатель
SAT-GM18, Sat Infrared, Китай	Показывающий прибор, интервал отн. окр. среды +1000 °С	0,25	8...14	-	-	-	-	2,5	20 000 \$
SAT-HY6800, Sat Infrared, Китай	Измерительный прибор -10...+2000	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	50	-	-	2,5	48 000 \$
SDS HotFind-D (DX, DXS, DXT), Sat Infrared, Китай	Измерительный прибор -20...+250 (до 1500)	0,1	7,5...14	160 × 120 (неохл.)	50	-15...+50	USB	0,7	~5 000 \$
IR210, Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай	Показывающий модуль	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	50	-	PAL	0,22	20 000 \$
IR510 (512), Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай	Показывающий прибор	0,1	8...14	320 × 240 (неохл.)	50	-	PAL	1,8	-
IR913, Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай	Измерительный прибор -20...+1000	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	50	-	PCMCIA карта	1,5	20 000 \$

IR928, Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай	Измерительный прибор -20...+1500	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-	PAL NTSC USB	1,5	-
Land Guide MobiR M3 (LAND, Англия, и Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай)	Измерительный прибор -20...+250 (1 изм. точка)	0,12	8...14	160 × 120 (неохл.) 25 × 19°	8,5	-15...+45	Встр. память на 100 кадров	0,27	220 000 руб. Лазер
Land Guide MobiR M4 (LAND, Англия, и Wuhan Guide Electronic Industrial Co., Китай)	Измерительный прибор -20...+250 (4 изм. точка)	0,12	8...14	160 × 120 (неохл.) 25 × 19°	8,5	-10...+50	Встр. память на 600 кад- ров	0,27	400 000 руб. Видеокамера. Лазер
DL-770, Dali, Китай	Измерительный прибор -20...+250	0,1	8...14	160 × 120 (неохл.)	50/60	-20...+50	USB, видео	0,68	5 000... 9 000 \$
DL-700, Dali, Китай	Измерительный прибор -20...+1200	0,08	8...14	320 × 240 (неохл.)	50/60	-40...+70	USB, видео	1,7	13 000... 18 000 \$
ImageR LC, Santa Barbara Fo- calplane, США	Показывающий прибор	0,02	3...5	256 × 256 (охл.)	50/60	-	RS170, 14 бит	-	<10 000 \$
DI-9800, Digital Imaging Infrared, США	Показывающий прибор	0,05	По вы- бору	320 × 240 (неохл.)	-	0...+70	Монохром- ное. RS-232	1,8	28 000 \$
DI-3500, Digital Imaging Infrared, США	Показывающий прибор	0,06	3...5	InSb 320 × 256 (охл.)	-	-20...+55	12 бит	2,6	68 000 \$
µSAM, AEG Infrared-Module, Германия	Показывающий прибор	0,1	3,2...5	PiSi 256 × 256 (Стирлинг)	-	-	Видеовыход 8-бит циф- ровой	1,7	-

Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображений, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
AEG Infrarot-Module, Германия	Показывающий прибор	0,01	8...10	QWIP 256 × 256	200	-	-	-	-
VARIOSCAN-3021, 3021 <sup>ST</sup> , Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерительный прибор -40...+1200	0,03	8...12	HgCdTe 360 × 240 (азот, Стирлинг)	1 / 0,9	-10...+40	Флэш-карта 16 бит	5	-
VARIOSCAN-3022, 3021, Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерительный прибор -10...+1200	0,12	8...12	HgCdTe 360 × 240 (гермозл.)	1 / 0,9	-10...+40	Флэш-карта 16 бит	5	-
Vario THERM, Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерительный прибор -25...+1200	0,1	3,4...5	PtSi 256 × 256 (Стирлинг)	50	-10...+50	PCMCIA	3,9	-
VarioCAM, Jenoptik Laser Optik Systeme GmbH, Германия	Измерительный прибор -40...+2000	0,06...0,1	7,5...14	320 × 240 640 × 480	50	-15...+50	16 бит Fire Wire Compact Flash Внутр. память на 870 термограмм	2,2	Речь. Видеокамера ~62 000 \$ (в России)
Testo 880-3, Testo, Германия	Измерительный прибор -20...+100 0...+350	<0,1	8...14	160 × 120 (лигерполяция до 320 × 240)	9 (33 Гц в странах ЕС)	-15...+40	До 1000 изображ. Карта памяти SD	0,9	-

Leopard, NVT (Night Vision Technology Corp.), США	Измерительный прибор -20...+400	0,08	8...12	320 × 240	30	0...+40	LCD дисплей РСМСІ	2	35 000 \$
Thermosensik System CMT 384M, Thermosensik, Германия	-	0,015	3,4...5,2	384 × 288	130	-	14-бит цифровой выход	-	-
Лух, NVT (Night Vision Technology Corp.), США	Показывающий стационарный прибор	0,08	8...12	320 × 240	30	0...+40	LCD дисплей РСМСІ	2	-
UMFLIR, Boeing, США	Показывающий прибор	0,1	8...12	320 × 240 (неохл.)	PAL	-30...+54	Видеовыход PAL, 12 бит	3,5	-
VisIR Ti 100, Ti 200 Indigo Systems and Thermoteknix Systems, США	Измерительный прибор -50...+500	0,085	7,5...13	160 × 120 (неохл.)	30	-	14 бит РСМСІ карта	1,6	20 000... 30 000 \$
MicroIR LTC550, BAE Systems, США	Показывающий прибор	0,1	8...14	320 × 240 (неохл.)	60	-20...+50	Видеовыход, RS 170, RS 422	2,5	15 000... 25 000 \$
IR Snapshot, ISL, США	Измерительный прибор фотографического типа -30...+600 °С	0,1	8...12	120 × 120	1 / 1,5	0...+50	RS232	<2	-
DVE, AlliedSignal Aerospace, Canada	Показывающий прибор для ночного вождения	0,05	8...12	320 × 240 (неохл.)	Видео-выход	-40...+50	RS 170 или CCIR	-	25 000 \$
Miricle 110K, Thermotechnics Systems, Великобритания	Модуль	0,05	7...14	384 × 288 (неохл.)	PAL, NTSC USB-2	-20...+50	RS 170 или CCIR	0,086	-
Miric Industrial, 500, Thermotechnics Systems, Великобритания	Измерительный модуль -20...+500	-	7...14	164 × 128 (неохл.)	30	0...+50	LVDC 16 бит	1	-



Продолжение табл. 9.3

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Формат кадра и битность цифрового представления	Частота изображения, Гц	Рабочая температура, °С	Система записи термограмм	Масса, кг	Цена, область применения, доп. функции **
NightConqueror 640, L3 Cincinatti Electronics, США	Показывающий прибор -30...+40 °С	0,03	3,5...5	640 × 512 InSb	50	-	RS 170 или CCIR	15,4	-
K6700, K6800, K6900 ICG Thermal Systems USA, США	-40...+2000 (-40... +600 в модели K6700)	0,08	8...14	320 × 240	50	-25...+50	RS 170 или CCIRRS 170 или CCIR	1,8	-
AIR 32 (AIR 16), Vision Electronics, США	Показывающий прибор	0,05	8...12	320 × 240 (160 × 120)	-	-	-	-	6 500 \$ (6 000 \$)
NightStalkerIR, IEC Infrared Systems, США	Показывающий прибор	0,06	8...14	320 × 240	30	-20...+49	NTSC	27	Военная сфера
I-500, Critical Imaging, США	Измерительный прибор -20...+900	0,1	8...12	320 × 240	60	-20...+60	-	1	-
Ruoview 320L (256), DIAS/CMV, Германия	Измерительный прибор -20...+120 или 0...+500 (0...+1300)	0,1	8...12	320 × 240 (256 × 128)	50	0...+50 -25...+150 (с охлажд. водой)	-	-	-
Ruopis 256 (128), DIAS/CMV, Германия	Измерительный прибор -60...+1250	1	3,9...4,55	256 × 128	1	0...+50 -25...+150 (с охлажд. водой)	-	-	Контроль вращающ. печей

Cheetah, XenICs, Lot Oriel Group	Показывающий прибор +200...+800	-	0,9...1,7	640 × 512 InAsGa	60; 400; 1750 Snapshot	-20...+50	Встр. память 8 Гб	
Hot Shot, Multiphysics	Измерительный прибор -20...+350	0,1	7,5...14	160 × 120	-	-5...+50	Встр. память 128 Мб	Встроенная видеокамера
K1000 Elite, ISG Thermal Systems USA, США	Измерение в центральной точке до 1100	0,05	8...14	320 × 240	60	-	Встроенная память USB	Противопожарная деятельность
Game Finder Junior, Game Finder, США****	Показывающий прибор (охота)	5		3 светодиода	-	-	-	4500 руб.
Game Finder Model A Enhanced, Game Finder, США	Показывающий прибор (охота) -5,5...+32	-	-	10-сегментная светодиодная шкала		-	-	9500 руб.
Game Finder PRO-M, Game Finder, США	Показывающий прибор (охота) -5,5...+32	-	-	10-сегментная светодиодная шкала		-	-	12 500 руб.

\*Приведены наиболее представительные модели отдельных серий. Многие отечественные тепловизоры не были доведены до серийного выпуска.

Данные таблицы не носят рекламного или рекомендательного характера и не отражают предпочтений автора.

\*\*Цены завода-изготовителя или отпускные цены в России. Цены указаны на основе частной информации и не могут быть использованы в качестве официальной ссылки; цена зависит от комплектации программным обеспечением и аксессуарами, а также подвержены колебаниям курса валют.

\*\*\*Продукция фирмы FLIR Systems выделена, поскольку эта фирма выпускает наибольшее число моделей. В 2008 г. в фирму FLIR Systems вошла французская фирма CEDIP.

\*\*\*\*Приборы типа Game Finder, строго говоря, являются не тепловизорами, а индикаторами.



**Рис. 9.12. Модели типовых тепловизоров:**

*a* – DVE-1000 (Digital Imaging Infrared); *б* – PalmIR Pro (Raytheon); *в* – Emerald (CEDIP); *г* – Phoenix (FLIR Systems); *д* – ThermoCAM E2 (FLIR Systems); *е* – ThermoCAM S65HS (FLIR Systems); *ж* – Ti30 (Fluke); *з* – Ti55 (Fluke); *и* – i5 (FLIR Systems); *к* – MobIR 4 (Land и Wuhan Guide Electronic Industrial); *л* – ThermoVision A10; *м* – Photon (FLIR Systems); *н* – ThermoTracer TH6100 (NEC); *о* – ThermoTracer TH9100 (NEC); *п* – ИРТИС-2000; *р* – TH-4604 МП

Наибольшим разнообразием тепловизоров характеризуется продукция фирмы FLIR Systems. Тепловизоры этой фирмы выпускаются следующими сериями.

- Серия ThermaCAM P – профессиональные ИК камеры с неохлаждаемыми матричными фотодетекторами. Характеризуются высоким пространственным ( $320 \times 240$ ) и температурным (до 60 мК) разрешением, снабжены параллельным видеоканалом, записью речевого комментария и развитым софтвером.

- Серия ThermaCAM E – низкостоимостные матричные тепловизоры для технической диагностики, главным образом, для контроля электрооборудования.

- Серия ThermaCAM B – версия серии E, предназначенная для строительной диагностики (включает программу автоматического определения температуры точки росы – Automatic Dewpoint Identification).

- Серия ThermaCAM S – малогабаритные тепловизоры на базе неохлаждаемых матриц для научных исследований. Снабжены "огненной шиной" – каналом связи с компьютером FireWire, обеспечивающим цифровую запись в реальном времени.

- Серия ThermoVision A – тепловизионные головки для контроля технологических процессов и комплектации компьютерных термографических систем разнообразного применения. Включает как показывающие, так и радиометрические (измерительные) модули.

- Серия ThermoVision Scout – измерительные тепловизоры и тепловизионные головки на базе серий ThermaCAM E и ThermoVision A, используемые в качестве приборов ночного видения.

Специальными моделями являются: 1) Alpha (Thermovision A10) – миниатюрный тепловизионный модуль спектрального диапазона 7 – 13 мкм с форматом изображения  $160 \times 128$ ; 2) ThermaCAM SC 6000 – тепловизионная система для научных исследований на базе охлаж-

даемого квид-фотодетектора с температурным разрешением 25 мК и частотой цифровой записи 125 Гц (десятки кГц – в режиме "окна"); 3) ThermaCAM Merlin и Phoenix – высокочувствительные быстродействующие тепловизоры на базе охлаждаемого InSb фотодетектора, предназначенные для применения в научных исследованиях, медицине и астрономии.

С точки зрения цены тепловизоры фирмы FLIR Systems можно классифицировать следующим образом. Низкостоимостные тепловизоры i5 (цена в России в 2008 г. около 110 тыс. руб.) и InfraCAM (российская цена 2008 г. около 270 тыс. руб.) рекомендуются для диагностики электрооборудования и поставляются в комплекте с простым софтвером Quick View. Следующую ценовую нишу занимают модели ThermaCAM E45 и E300 (от 14 до 25 тысяч Евро), допускающие решение уже значительного круга диагностических задач. К среднестоимостным тепловизорам относится прибор ThermaCAM P25 (~36 тысяч Евро), а универсальными диагностическими моделями являются P65 и P640 (от 60 до 70 тысяч Евро). Тепловизионные модули A20 и A40 соответственно с матрицами  $160 \times 120$  и  $320 \times 240$  фирмы ULIS могут быть использованы в качестве блоков непрерывной регистрации температуры в компьютерных системах сбора данных, а также в тепловых дефектоскопах (в последнем случае в комплекте с тепловизором применяют нагреватели различного типа). Развитыми исследовательскими системами являются тепловизоры SC3000 (QWIP матрица  $320 \times 240$  шведского производства), а также SC4000/6000 (американские матрицы, требующие оформления лицензии). Для создания стационарных и мобильных систем наблюдения (патрулирование границ и разведка, охрана правительственных объектов, аэропортов и имущества, антитеррористические и поисково-спасательные операции и т.п.) фирмой предлагается модельный ряд показывающих тепловизоров: Thermo-

Vision 3000, ThermoVision Ranger III, ThermoVision IS, ThermoVision Security HD, ThermoVision Scout и др. Тепловизор со сверхшироким полем зрения ( $180^\circ$ ) ThermoVision WideEye обнаруживает человека в полной темноте на расстоянии до 150 м. Другим примером системы непрерывного стационарного наблюдения является модель ThermoVision Sentinel, которая включает функцию автофокусировки тепловых изображений, а также функцию InstAlert, обеспечивающую выделение красным цветом людей и автомашин на черно-белом фоне для немедленного привлечения внимания оператора. Модульная камера Triple QWIP Module чувствительна в диапазоне длин волн 8–9 мкм и свободна от ослепления системами лазерного оружия. В данной камере предусмотрено три поля зрения соответственно с тремя мгновенными углами зрения: 0,054, 0,33 и 1,37 мрад. Специально для совместимости со стандартными корпусами систем наблюдения Pelco EN2508 создан интегральный ряд моделей ThermoVision Integration Series. С учетом суровых климатических условий России компания ПЕРГАМ разработала систему "Титан", обеспечивающую получение четкого изображения в абсолютной темноте, при ярком солнечном свете, засветке от отопительных приборов, при наличии тумана, дымки, а также при снегопаде и дожде. Уникальным параметром данного прибора является возможность работы при температурах до  $-65^\circ\text{C}$ .

**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 тысяч долларов США для установки на легковом автомобиле (рис. 9.12, а). В качестве детектора излучения применена длинноволновая ферро-

электрическая матрица  $320 \times 240$ , масса 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. 9.12, б). Использована длинноволновая матрица  $320 \times 240$  и 2,5-дюймовый цветной монитор; запись изображений производят на PCMCIA карту емкостью до 8 Мб (до 60 изображений); масса тепловизора – 1,8 кг.

**Показывающий тепловизор ThermoVision FlashSight.** Портативный тепловизор ThermoVision FlashSight предлагается фирмой FLIR Systems для охранных и военизированных организаций. Будучи разработанным на базе высокочувствительной камеры ThermoVision Micron, прибор отличается небольшими габаритами и массой ( $25 \times 10 \times 7$  см, 0,86 кг). Изображения могут накапливаться во встроенной памяти, а также передаваться на компьютер через USB порт. Интервал рабочих температур прибора: от  $-40$  до  $+55^\circ\text{C}$ .

**Измерительный тепловизор Emerald.** Данный прибор (рис. 9.12, в) является примером исследовательских тепловизоров, разрабатываемых французской фирмой CEDIP (ныне FLIR Systems). Основные параметры: спектральный диапазон 3,6 – 5,0 мкм (фотоприемник на основе InSb), формат изображения  $640 \times 512$ , температурное разрешение 25 мК, частота полноформатных кадров 5...120 Гц, масса 4 кг, рабочая температура среды от  $-20$  до  $+55^\circ\text{C}$ .

**Измерительный тепловизор Phoenix.** Тепловизионная камера модульного типа Phoenix (рис. 9.12, г), разработанная бывшей фирмой Indigo Systems (ныне FLIR Systems) используется в промышленности, военной технике и научных исследованиях. Прибор обладает высоким

температурным разрешением (25 мК), работает в режиме мгновенной записи (snapshot) и обеспечивает формат изображения  $320 \times 256$  при частоте кадров 120 Гц. В режиме "окна" (windowing) размером  $2 \times 128$  возможна частота записи до 38 кГц. В настоящее время данная модель заменена системой ThermaCAM SC4000.

**Исследовательская измерительная система ThermoVision SC6000.** Одна из последних моделей измерительных систем фирмы FLIR Systems, предназначенная для научных исследований, обладает температурным разрешением до 25 мК, форматом изображения  $640 \times 512$  и частотой кадров до 27 кГц в зависимости от выбранного "окна". В данном тепловизоре отсутствует встроенная шторка-калибратор, что позволило избавиться от периодических "скачков" выходного сигнала при длительном времени наблюдения.

**Измерительный тепловизор ThermaCAM E2.** Малогабаритный измерительный тепловизор, выпускаемый с 2002 г. фирмы FLIR Systems, имеет массу около 0,7 кг, включая аккумуляторы (рис. 9.12, д), и использует матрицу  $160 \times 120$ . Отсутствие видеоискателя компенсируется наличием лазерного целеуказателя. При стоимости в России от 14 до 25 тысяч долларов США данный прибор содержит все основные опции более дорогостоящих систем. Рекомендуемыми областями его применения являются электротехника, строительство и техническая диагностика промышленных установок.

Тепловизор ThermaCAM E2 положил начало целой серии моделей, например, ThermaCAM E45, ThermaCAM B20, ThermoVision Scout и др., которые при сходных технических параметрах рекомендованы для специальных применений.

**Измерительный тепловизор ThermaCAM S65HS (P60, P65).** Данный тепловизор фирмы FLIR Systems является наиболее совершенной версией моделей серии P60 (P65), которые появились на рынке в 2002 г. (рис. 9.12, е). Сохраняя формат кадра  $320 \times 240$ , обладает темпе-

ратурной чувствительностью 50 мК. Особенностью тепловизора является отсоединяемый дисплей, лазерный целеуказатель, параллельный видеоканал и дистанционная система управления, что позволяет размещать прибор в труднодоступных местах. По совокупности параметров может считаться одним из лучших тепловизоров в мире, предназначенных для наружной ИК съемки. Цена прибора зависит от комплектации и в России в среднем составляет 60 тысяч долларов США. Модификации данного прибора связаны с качеством использованного матричного фотоприемника, а также предпочтительной областью применения.

Имеются более простые версии данного тепловизора: ThermaCAM P25 и P45, которые можно расширить до более качественных моделей.

**Измерительный тепловизор Fluke (ThermoView) Ti30.** Данная модель является первым опытом известного производителя ИК термометров фирмы Raytek (США) по созданию недорогого измерительного тепловизора (рис. 9.12, ж). Прибор использует четверть стандартной матрицы, обладает простой оптикой, нешироким диапазоном измерения и относительно невысоким температурным разрешением. Метрологические показатели прибора не очень высоки, но благодаря низкой стоимости, тепловизор Ti30 находит применение, главным образом, для диагностики электрооборудования.

**Измерительный тепловизор Fluke Ti55.** Модели серии Ti45, Ti55 (рис. 9.12, з) являются универсальными тепловизорами высокого уровня. Обладают хорошим соотношением цены и качества, обеспечивая температурную чувствительность  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$  при стандартном формате изображения  $320 \times 240$ . В данных приборах впервые была введена опция слияния видимого и ИК изображения Fusion.

**Измерительный тепловизор InfraCAM.** Компактный и недорогой измерительный тепловизор InfraCAM, выпуск которого начат в 2006 г., явился своеобразным ответом фирмы FLIR Sys-

tems на попытки других производителей создать рыночные модели измерительных тепловизоров невысокой стоимости. Приборы такого типа представляют собой промежуточный вариант между ИК термометрами и тепловизорами высокого качества. Снижение частоты смены изображений до 9 Гц при формате кадра  $120 \times 120$  и температурном разрешении  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  отражает стремление фирмы-производителя обойти жесткие ограничения, накладываемые в США на поставку матричных ИК ПИ в третьи страны. Цена данного тепловизора в России составляет менее 9 тысяч долларов США.

**Измерительный тепловизор i5.** Более поздняя по сравнению с прибором InfraCAM модель i5 фирмы FLIR Systems (рис. 9.12, и) является, по-видимому, одной из самых недорогих в мире (цена ex works 3 тысячи долларов США). Частота кадров 9 Гц при формате кадра  $80 \times 80$  и хорошем температурном разрешении  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  позволяют рекомендовать этот тепловизор для диагностики сравнительно "теплых" и недалеко расположенных объектов с температурой от 0 до  $+250 \text{ }^\circ\text{C}$ , прежде всего, электрооборудования, печей, трубопроводов и т.п.

**Измерительный тепловизор Land MobIR 4.** К этому совместному китайско-английскому тепловизору (разработка фирмы Wuhan Guide Electronic Industrial, Китай с участием фирмы Land, Великобритания), который выполнен в дизайне и размерах мобильного телефона, применим термин "миниатюрный" (рис. 9.12, к). Недостатком прибора является необходимость ручной калибровки с помощью крышки объектива, что делает сомнительными его метрологические характеристики. Тем не менее, данный тепловизор прост в обращении и позволяет сохранять одновременно ИК и видимые изображения. При температурной чувствительности  $0,12 \text{ }^\circ\text{C}$ , частоте кадров 8,5 Гц (возможен вариант поставки быстродействующей модели) и формате кадра  $160 \times 120$  цена прибора в России на конец 2008 г.

составляла около 400 тысяч рублей. Последняя модификация данной модели – прибор MobIR 8.

**Тепловизионный модуль ThermoVision A10.** Миниатюрная сверхлегкая (массой 120 г) ИК камера Indigo Omega в настоящее время поставляется под маркой ThermoVision A10 (рис. 9.12, л). Камера снабжена как аналоговым, так и цифровым выходом, и позволяет вводить в компьютер изображения форматом  $160 \times 120$  пикселей с частотой 25 Гц. Благодаря невысокой стоимости и хорошим параметрам представляет интерес для использования в качестве компоненты активных систем ТК. Еще более совершенным прибором того же ряда является модуль ThermoVision A40 (см. табл. 9.3).

**Тепловизионный модуль Photon.** Дальнейшим развитием миниатюрных тепловизионных модулей является прибор Photon (рис. 9.12, м), в котором использована неохлаждаемая матрица  $324 \times 256$  на окиси ванадия. При массе 115 г и объеме около  $50 \text{ см}^3$  модуль обладает температурным разрешением 85 мК при оптике  $f/1,6$ . Предусмотрен аналоговый (PAL, 25 Гц) и цифровой (8 или 14 бит) выходы.

**Миниатюрный тепловизионный модуль  $\mu$ CAM.** В целом данный модуль фирмы AIM Infrarot-Module аналогичен приборам других фирм. Представляет интерес его модификация  $\mu$ CAM, предназначенный для использования на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах, в частности, типа Aladin германской компании EMT. Неохлаждаемая матрица  $320 \times 240$  обладает уменьшенным временем интеграции (4 мс) с целью минимизировать эффекты смазывания изображения.

**Измерительный тепловизор TH6100.** Фирму NEC (Япония) можно рассматривать в качестве японского аналога американской фирмы FLIR Systems. Начав с продаж на российском рынке устаревшей модели TH-5104, NEC быстро расширяет номенклатуру моделей и отличается хо-

рошим соотношением качество/стоимость. Прибор ТН6100 (рис. 9.12, *н*), использующий длинноволновую матрицу  $320 \times 240$ , является измерительным тепловизором, одна из версий которого работоспособна до температур окружающей среды  $-20^\circ\text{C}$ .

**Измерительный тепловизор ThermoTracer ТН9100.** Данный тепловизор производства фирмы NEC является аналогом прибора ThermoCam Р60 (рис. 9.12, *о*). Использует лицензионную матрицу 5-го поколения. Близкими аналогами являются также приборы серии ТН7102 той же фирмы.

**Измерительный тепловизор ИРТИС-2000 (первые модели: ИРТИС-200).** Самый массовый российский тепловизор последних лет (по некоторым данным, к 2006 г. выпущено более 500 экземпляров, рис. 9.12, *п*)) воплощает опыт отечественного тепловидения последних 20 лет и является одним из немногих выживших на рынке приборов с одиночным фотоприемником и системой оптико-механического сканирования. В ТК данный прибор находит ограниченное применение из-за низкой частоты смены изображений (около 1 Гц); тем не менее, из-за своей разумной цены (около 18 тысяч долларов США) он достаточно широко применяется энергетическими компаниями России для технической диагностики. По мнению экспертов, благодаря удовлетворительному формату изображения ( $256 \times 256$ ) и программному продукту весьма высокого уровня, данный тепловизор обеспечивает хорошее качество изображения. В последних моделях в комплект тепловизора входят компьютеры типа "наладонник", что позволило отойти от обязательного использования на месте съемки компьютера типа "лэп-топ" для цифровой записи результатов съемки на жесткий диск. Недостатком прибора является необходимость использовать жидкий азот для охлаждения фотоприемника, а применение в перспективе матричных

ИК детекторов, по-видимому, приведет к существенному росту цены.

**Тепловизор ТН-4604МП (с элементами измерения).** В данном портативном тепловизоре МНПО "Спектр" (Россия, рис. 9.12, *р*) объединен опыт разработки неохлаждаемых пировидиконных тепловизоров с современными неохлаждаемыми матрицами фотодетекторов. Прибор работает в длинноволновом диапазоне и обладает температурным разрешением  $0,1^\circ\text{C}$ . Возможно измерение температуры в зоне с использованием встроенного ИК термометра.

**Измерительный тепловизор ТКВр-ИФП.** Один из немногих российских тепловизоров, выпускающихся в заметном количестве. Интересен тем, что в нем применена охлаждаемая отечественная матрица разработки Института физики полупроводников СО РАН. Прибор – стационарного типа, аттестован в качестве медицинского тепловизора и нашел применение во многих поликлиниках системы РАН. Обладает высоким температурным разрешением ( $0,03^\circ\text{C}$ ) и развитым программным обеспечением.

### 9.5.11. Выбор тепловизора

Ввиду того, что тепловизор является универсальным прибором для температурных измерений и анализа тепловых полей, потребитель может стремиться 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 ThermoCAM



Scout фирмы FLIR Systems, в то же время наилучшим прибором в данной области применения будет тепловизор ThermoCAM 1000 той же фирмы, который может быть установлен на гироплатформе летательного аппарата. В военной области популярны показывающие тепловизоры фирмы Raytheon. Для ИК диагностики в электроэнергетике оптимальным прибором могут быть приборы серии ThermoCAM E или T. Для многих областей применения важно наличие фильтров, которые позволяют существенно снизить помехи от отраженного солнечного излучения или повысить точность измерений температуры ряда специфических объектов, таких как стекло, пластмассы, горячий газ и т.п. Кроме того, часто в промышленной сфере требуются портативные тепловизоры 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 сети переменного тока. Наконец, для научных исследований оптимальной может быть компьютерная система ThermoCAM SC 3000 (наиболее совершенной является модель SC 6000), а также некоторые тепловизоры фирм CEDIP (FLIR Systems), Santa Barbara Focal Plane Array которые обеспечивают запись последовательностей ИК изображений с высокой скоростью.

В последние годы активными участниками российского рынка тепловизоров стали фирмы NEC (Япония) с моделями TH7102, 7800 и TH9100 различных модификаций, Jenoptik (Германия) с моделями VarioCAM Inspect 130/25 и 170/25, Fluke (Raytek) с дешевой моделью Ti30, Testo с серией 880 (Великобритания), а также китайские производители Guangzhou Sat Infrared Technology и Wuhan Guide Electronic Industrial. В частности, последняя фирма поразила потребителей совместной с английской фирмой Land разработкой тепловизоров серии MobIR, напоминающих по дизайну и размерам мо-

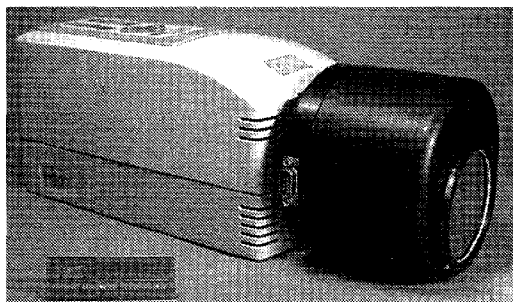
бильный телефон. Как отмечалось выше, вследствие жесткой конкуренции технические параметры самих камер и возможности софтвера для лучших моделей достаточно близки и решающим фактором для российских покупателей становится цена. Важнейшим фактором цены является тип используемой матрицы ИК детекторов. Высококачественные неохлаждаемые матрицы были разработаны американской фирмой Boeing (впоследствии технология была продана фирме DRS). Поскольку для поставки за рубеж *лицензионных* матриц необходима экспортная лицензия Министерства торговли США, в некоторых странах был налажен выпуск так называемых *нелицензионных* матриц. Поставка тепловизоров с такими матрицами осуществляется в третьи страны без ограничений, и соответствующие тепловизоры маркируются специальным образом. Другим средством преодоления экспортных ограничений явилась разработка приборов на матрицах малого формата (до  $80 \times 80$ ) и с пониженной частотой смены изображений (до 7 Гц). В Европе большую популярность приобрели неохлаждаемые матричные ИК детекторы французской фирмы Uliss, на которые ограничения экспортной поставки менее жесткие по сравнению с американскими матрицами. В диагностических работах различие в технических показателях тепловизоров с лицензионными и нелицензионными матрицами может быть несущественным, однако в научных исследованиях предпочтительно применение высококачественных детекторов, обеспечивающих хорошие измерительные возможности тепловизора по всему полю зрения с температурным разрешением до 30 мК.

## 9.6. ИК СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УТЕЧЕК ГАЗА

Помимо собственно тепловизоров, разработаны ИК визуализирующие системы, которые используют эффект избирательного поглощения ИК излучения газами

в узких спектральных интервалах. Применение соответствующих спектральных фильтров позволяет фиксировать наличие искомого газа в облаке утечки. ИК устройства обнаружения утечек бывают *пассивного* и *активного* типа (см. Главу 11). Введение активной лазерной подсветки на длине волны поглощения целесообразно потому, что в пассивном режиме мощность собственного излучения тел в узких спектральных интервалах мала и необходимы специальные спектрометрические системы высокой чувствительности.

Примером ИК визуализирующих 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. 9.13. Для нужд нефтехимической промышленности фирмой FLIR Systems разработан тепловизор ThermoCAM GasFinder, который благодаря встроенному фильтру позволяет качественно выявлять утечки 19 различных газов на относительно небольших расстояниях.



Спектральный диапазон: 3,0...5,0 мкм  
 Номинальное спектральное разрешение:  
 0,25 %  $\Delta\lambda/\lambda$  (0,01 мкм при 4 мкм)  
 Оптика:  $f/2,5$  при 4 мкм  
 Поле зрения:  $5,3 \times 5,3^\circ$  при 4 мкм  
 Мгновенный угол зрения: 372 мкрад при 4 мкм

**Рис. 9.13. Визуализирующий спектрометр IMSS-M1 (Pacific Advanced Technology, США)**

Активные ИК тепловизионные системы с лазерной подсветкой (лазер  $\text{CO}_2$ ) разрабатывались фирмой Inframetrics (ныне FLIR Systems). Модель Gas Vue TG-5 предназначалась для использования в технологических линиях для контроля теплообменников, насосов, цистерн и герметичных сосудов. В объект контроля вводят пробный газ  $\text{SF}_6$  и регистрируют поле отраженного лазерного излучения на расстоянии до 5 м. Минимальная обнаруживаемая утечка – 50 г/год. Система являлась портативной и состояла из трех блоков: лазерно-тепловизионной головки, блока питания с устройством охлаждения и консоли. Модель MG-30 была предназначена для обнаружения утечек основных продуктов из цистерн, трубопроводов, резервуаров и т.п. На расстоянии до 30 м данный прибор позволял различать до 77 различных газов, из которых пять были выбраны для стандартной калибровки. Облако утечки было видно на экране тепловизионного монитора в виде темной зоны, соответствующей повышенному поглощению отраженного от объекта лазерного излучения. Минимальная обнаруживаемая утечка – 1 кг/год.

## 9.7. СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Длина волны терагерцовых волн находится в диапазоне от 10 мкм до нескольких миллиметров. Устройства визуализации таких волн можно назвать тепловизорами терагерцового диапазона, которые занимают промежуточное положение между ИК и СВЧ тепловизорами. Интерес к этим устройствам усилился в последнее время в связи с разработкой технических средств обеспечения антитеррористической деятельности.

Иллюстрация применения устройств терагерцового диапазона в обеспечении антитеррористической деятельности приведена в Главе 11.

### 9.8. ЛИНЕЙНЫЕ ИК СКАНЕРЫ

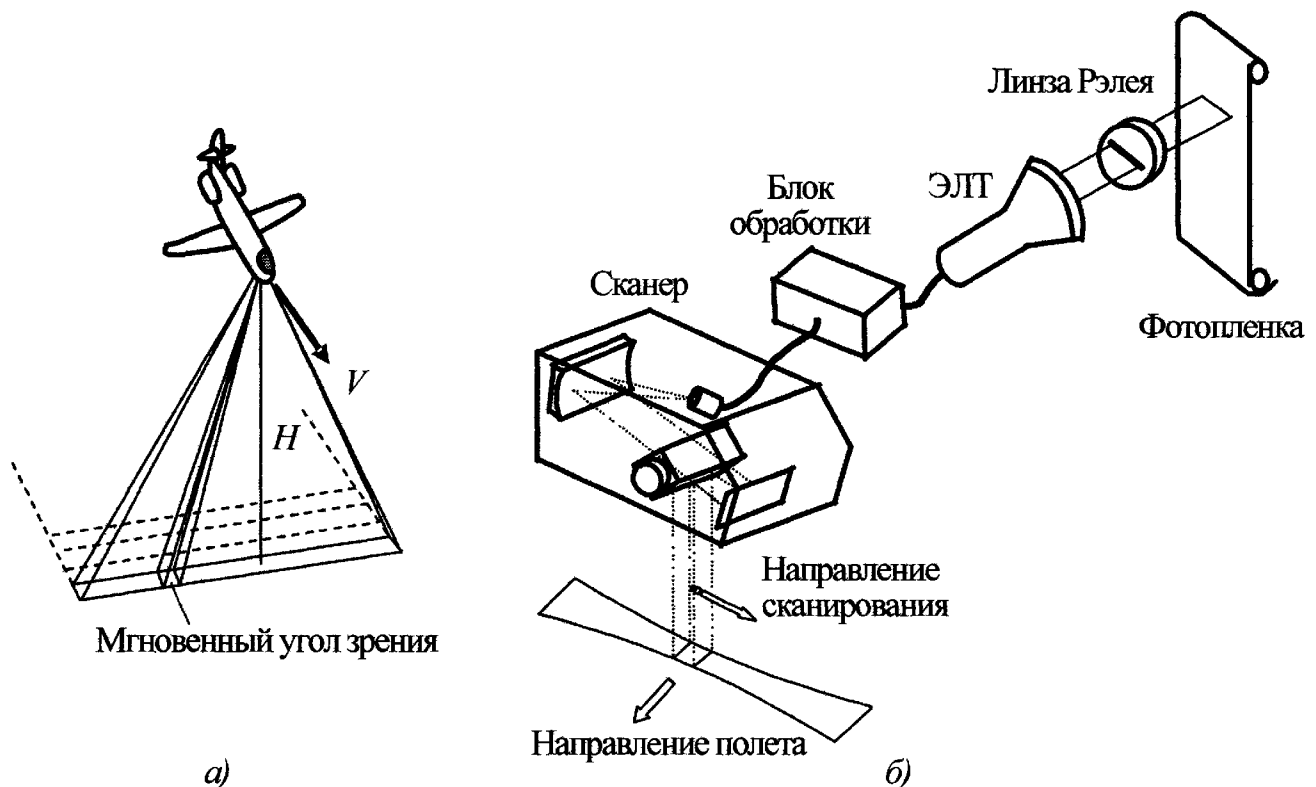
Линейные, или строчно-сканирующие, ИК системы по технической сложности и стоимости занимают промежуточное положение между тепловизорами и ИК термометрами. Термин «сканирующие» применяется к этим системам, поскольку в течение нескольких десятилетий развертку пространства в них осуществляли оптико-механическим способом. В современных моделях все чаще используются 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.

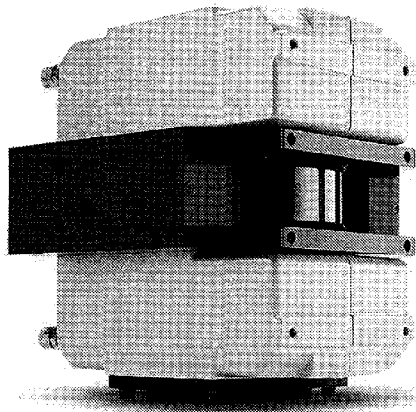
Сканеры первого типа обладают малым углом зрения, и их система развертки должна быть привязана к высоте  $H$  и скорости полета  $V$ , точнее к величине  $V/H$ , для того, чтобы обеспечить плотную укладку строк сканирования (рис. 9.14, а).

При чрезмерно большой величине  $V/H$  будет происходить пропуск участков исследуемой поверхности, а при чрезмерно малой – наложение строк друг на друга. Приборы такого типа разрабатываются для ИК аэросъемки, в основном, в военных целях.

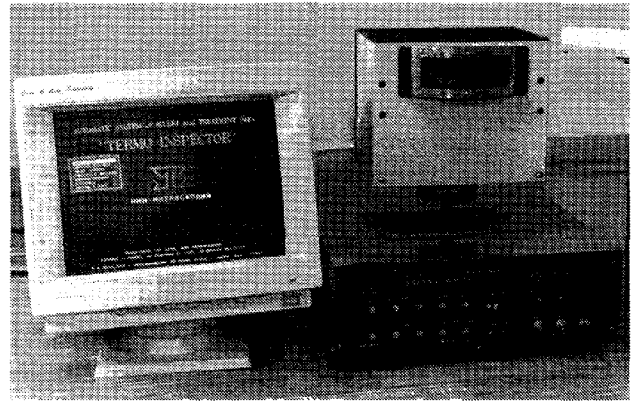
За рубежом главными производителями являются фирмы FLIR Systems, Raytheon, Digital Imaging Infrared и др. Оптико-механические ИК сканеры с высокими параметрами для космических применений были созданы в СССР. Среди систем, устанавливаемых на самолетах и вертолетах, следует отметить бортовой тепловизор «Везувий-ЭК» (развитие прибора «Вулкан»), разработанный ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова» для решения геофизических задач. При угле обзора 84 градуса прибор имеет типовое пространственное разрешение 1 мрад (с улучшением до 0,2 мрад) и работает в 4-х спектральных каналах. Непрерывное тепловое изображение земной поверхности может фиксироваться на фотопленку (рис. 9.14, б)



**Рис. 9.14. Линейные ИК сканеры, устанавливаемые на летательных аппаратах:**  
 а – схема ИК аэросъемки подстилающей поверхности;  
 б – бортовой ИК сканер с оптико-механической разверткой



а)



б)

Диапазон измеряемых температур:  
 0...+1600 °С  
 Частота строк: 48 Гц  
 Угол зрения: 90°  
 Число элементов на строке: 256

Диапазон измеряемых температур:  
 +50...+600 °С  
 Частота строк: 8 Гц  
 Угол зрения: 105°  
 Число элементов на строке: 360

**Рис. 9.15. ИК системы с линейной (строчной) разверткой:**

*а* – Thermoprofile-50 (FLIR Systems); *б* – "Интрокон-05Ц" (Томский НИИ интроскопии)

или электронную память с последующей передачей информации на станцию слежения. В космической аэросъемке широко применяют спектрональные системы, регистрирующие электромагнитное излучения Земли сразу в нескольких (до 24-х) каналах. В спутниковых системах ИК разведки и в военных системах раннего обнаружения целей применяют разнообразные схемы сканирования, отличные от изображенной на рис. 9.14. Описание этих систем выходит за рамки данной книги (см., например, справочник [163]).

В промышленных сканерах (строчно-сканирующих ИК пирометрах) частота развертки фиксирована, и сопутствующие компьютерные программы позволяют строить непрерывные тепловые изображения движущихся объектов. Основными потребителями строчно-сканирующих ИК пирометров являются металлургическая, цементная, стекольная и целлюлозно-бумажная промышленность (см. табл. 9.4 и Главу 11). На рис. 9.15, *а* показан внешний вид и основные параметры прибора Thermoprofile-50. Несколько типов линей-

ных ИК сканеров были разработаны в России (Томский НИИ интроскопии, Омский государственный технический университет и др.) для контроля температуры на поверхности вращающихся обжиговых печей, используемых, в частности, для производства цемента. Внешний вид и характеристики отечественной системы "Интрокон-05Ц" приведены на рис. 9.15, *б*.

## 9.9. ИНФРАКРАСНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ (пирометры)

ИК термометры (оптические пирометры) предназначены для бесконтактного измерения температуры в локальных зонах, выбираемых на поверхности объекта. В НК материалов эти приборы практически не используются (за исключением специализированных исследовательских систем, в ряде случаев стыкуемых с точечными нагревателями), но их широко применяют в пассивной технической диагностике электротехнических установок, теплоэнергетике и строительстве, а также непосредственно для измерения темпера-

## 9.4. ИК системы с линейной (строчной) разверткой

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Частота строк (Гц) и/или формат кадра, угол зрения	Масса, кг	Цена *
<i>Системы, устанавливаемые на летательных аппаратах (гиростабилизированные)</i>						
Thermovision 1000/Argus 350, FLIR Systems, США	—	0,08	8...12	5-ти элементный спрайт-детектор 800 × 445	25 кг – гироскоп-форма Argus 350	140 000 \$
DI-2000, Digital Imaging Infrared, США (на базе системы DI-9800)	—	0,08	8...12	320 × 240	—	100 000 \$
ИК сканер ГосНИИ АС, г. Москва	Показывающий прибор	0,1	3...5 8...14	—	—	—
"Везувий-ЭК", ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова"	Многоспектр. авиац. сканер. (показывающий прибор)	0,1...0,3	0,4...1,0 3...5 8...12	12,5; 25; 50; 100	80	—
<i>Приборы для промышленного применения</i>						
Thermoprofile-NT FLIR Systems, США	+75...+600	1	3...5	8...20 Гц 90°	—	~20 000 \$
Pyroline 256, DIAS/CMV, Германия	0...+80 50...+550 450...+1250 600...+1300	0,5	8...12 1,4...1,8 4,8...5,2 3...5	136 Гц 272 544	3,2	—
NZK 256, DIAS/CMV, Германия	250...+900	0,5	1,3...1,8	5000 Гц	—	Для измерения температуры тормозных дисков
HRP 250, DIAS/CMV, Германия	50...+180	0,5	3...5	До 18 кГц	—	Для контроля гипсокартонных плит
Pyroline 128L, DIAS/CMV, Германия	0...+80 50...+550	0,2	8...14	До 256 Гц	3,2	—

Продолжение табл. 9.4

Модель, фирма, страна	Диапазон измеряемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Спектральный диапазон, мкм	Частота строк (Гц) и/или формат кадра, угол зрения	Масса, кг	Цена *
Thermoprofile-50 FLIR Systems, США	0...+1600	—	3...5	48 Гц 256 элементов/ строку	—	—
GS100, Raytek, США (для стекольного производства)	+20...+950	—	—	36 Гц и 48 Гц	—	—
MP50, Raytek, США (для стекольного производства)	+20...+1200	—	1; 1,6; 3,43; 3,9; 5,0; 3...5	36 Гц	—	—
"ИКСА-04", Томский НИИ ИН	+100...+450	—	2...20 (пироприем- ник)	2 Гц 150 элементов/ строку	8	~16 000 \$
"Интрокон-05Ц", Томский НИИ ИН	+50...+600	—	1,5...5,3 (PbSe)	2 Гц 360 элементов/ строку	6	~18 000 \$ (с программой "Термоинспектор-3")
СТК-1 ("Эталон")	+100...+500	Привед. погрешность 3 %	2,5...5,5	4 Гц	5	—
ТСС-1 ("Эталон")	+200...+650	1	—	150 элементов на строке. Угол поля зрения 120°		
"Иволга", Техноас	Измерит. прибор для визуализации профиля температуры -20...+170	0,1	3...5	150 элементов на строке. Угол поля зрения 40°	1,5	—

\*Цены завода-изготовителя. Ряд цен указан на основе частной информации; цена зависит от комплектации тепловизора.

туры в технологических процессах. Приборы выпускают трех типов: портативные ИК термометры, бесконтактные датчики температуры, встраиваемые в промышленные установки, и исследовательские системы ТК, в том числе ИК микроскопы. Пирометры для промышленного применения должны быть сертифицированы Ростехрегулированием и проходить поверку каждые 1–2 года.

Основными параметрами ИК термометров являются:

- диапазон измеряемых температур (стандартный диапазон  $-30...+900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако возможно его расширение в обе стороны, в частности, до  $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

- 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;

- основная погрешность (у приборов высокого уровня:  $\pm 1\%$  или  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

- постоянная времени (в зависимости от типа используемого фотоприемника может составлять от микросекунд до сотен миллисекунд);

- рабочая температура (многие зарубежные приборы работают при температуре окружающей среды от 0 до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому их использование при отрицательных температурах требует определенных ухищрений, например, ношения в одежде; в любом случае, резкие изменения температуры окружающей среды приводят к ухудшению метрологических показателей ИК термометров);

- наличие лазерного целеуказателя, возможность определять зону измерения, тип источника питания и массогабаритные показатели.

Оптическая пирометрия как научно-техническая дисциплина хорошо развита как в теоретическом, так и в практическом плане (см. основополагающие работы Д.Я. Света в СССР). Основным заказчи-

ком научных исследований в данной области являлась металлургия и двигателестроение. В металлургии до сих пор стоит проблема измерения температуры поверхности блестящих расплавленных металлов, в частности, алюминия. При разработке и эксплуатации двигателей, например, в авиации, необходимо измерять температуру не только быстровращающихся лопаток турбин, но и температуру газа в камерах сгорания. Для устранения влияния коэффициента излучения на показания пирометров при высоких температурах применяют многоволновые (цветовые, бихроматические и т.п.) схемы измерения, а также подсветку контролируемой поверхности лучом лазера. Разработаны оптоволоконные (эндоскопические) ИК термометры, в которых тепловое излучение от труднодоступных мест измерения передается к фотоприемнику через гибкие ИК световоды.

### 9.9.1. Портативные ИК термометры

В большинстве западных и ряде российских портативных ИК термометров «пистолетного» типа наводка на объект осуществляется с помощью лазерного целеуказателя. Луч лазера указывает либо центр визируемого пятна (одиночный лазер), либо действительные размеры пятна (круговой лазер; в моделях последних лет используют линейчатый целеуказатель, который показывает диаметр зоны измерения). На открытом воздухе и на больших расстояниях, лазерный луч не виден, поэтому применяется оптическая наводка. Портативные пирометры высокого уровня, например, приборы серии Zi фирмы Raytek (ныне Fluke), 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 долла-

ров США. Среди западных производителей этих приборов следует выделить фирму Fluke выпускающую широкую номенклатуру бесконтактных ИК термомет-

ров. Данный сегмент рынка успешно осваивается и рядом российских фирм.

Технические параметры ИК термометров приведены в табл. 9.5 и на рис. 9.16.

### 9.5. Портативные ИК термометры

Модель	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Дополнительные функции	Масса, кг
<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. излучения	—
Center-358 (БЕЛВАР)	-18...+315	5 : 1	Фиксир. коэфф. излучения	0,1
КТА ("КОНТАР")	+50...+2500	30 : 1	Многоканальный	0,5
ДИЭЛТЕСТ-ТВ ("Веста-С")	+500...+1800 +700...+3000	—	Память на 63 значения	
ДИЭЛТЕСТ-ТВ ("Веста-С")	+200...+1200	—	Память на 63 значения	
АСТРОТЕМ ("АстронЭлектро")	-20...+200	10 : 1; 30 : 1; 40 : 1; 120 : 1; 150 : 1	Лазерный или оптический прицел	
Кельвин (НПО "Диполь")	-30...+400 -20...+600 50...+700 -30...+1300 -20...+1800 +200...+1300 +500...+1500 +700...+1800 +800...+2200	90 : 1 120 : 1 150 : 1 180 : 1 200 : 1 250 : 1 400 : 1	Лазерный или оптический прицел. Модель Кельвин- Технология воз- можна в стац- варианте (АСУТП)	1,1
ПИТ-500 (ЗАО "Хорус")	+300...+600 +500...+700 +650...+1100 +1000...+1500 +1300...+1800 +1500...+2500	от 1 : 25 до 1 : 500	Двухволновой с автоматическим учетом коэффициента излучения	—



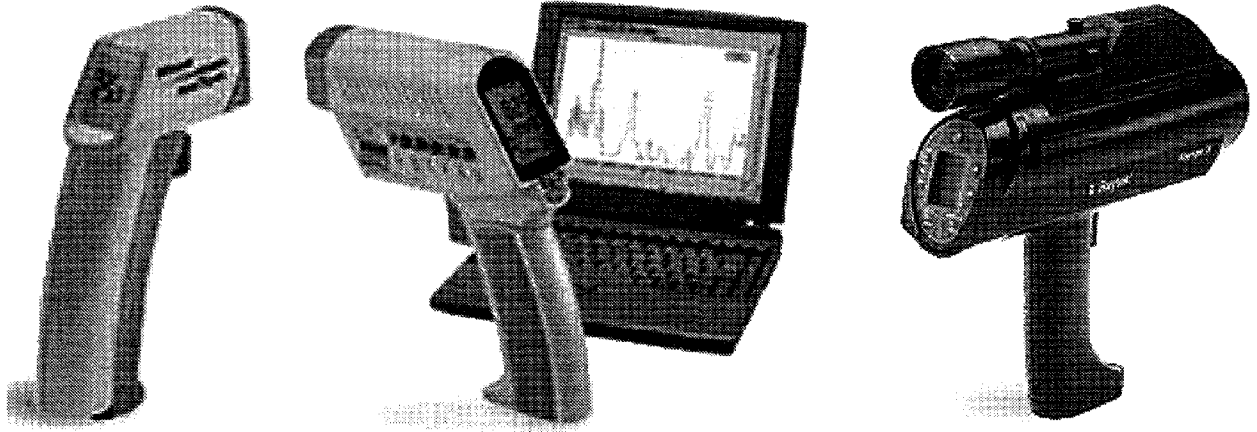
Продолжение табл. 9.5

Модель	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Дополнительные функции	Масса, кг
Пентермик-5	+1250...+1750 +650...+3500	1 : 50	Многоволновой пирометр (5 длин волн) с автоматич. учетом коэфф. излучения	—
ПП-1 ("Эталон")	-20...+400 +100...+1200 +400...+2000	1 : 10 1 : 15 1 : 30	—	—
СТ-1 ("Эталон")	+150...+2000	—	—	—
Смотрич-7	+150...+900	1 : 150	—	—
<i>Зарубежные приборы</i>				
MT2, Raytek, США*	-18...+275	8 : 1	—	—
MT4, Raytek, США	-18...+275	8 : 1	Точечный лазер	—
MiniTempFS, Fluke (Raytek), США	-30...+200	4 : 1	Точечный лазер. Фиксир. коэфф. излучения	0,34
Raynger ST20, Fluke (Raytek), США	-30...+400	12 : 1	Точечн. Лазер. Фиксир. коэфф. излучения	0,32
Raynger ST30, Fluke (Raytek), США	-30...+545	12 : 1	Круговой лазер. Фиксир. коэфф. излучения	0,32
Raynger ST60, Fluke (Raytek), США	-30...+600	30 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. Излучения. Термопара	0,32
Raynger ST80 (80-IS), Fluke (Raytek), США	-30...+760	50 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. Излучения. Термопара	0,32
MX2, Fluke (Raytek), США	-30...+900	60 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. Излучения (имеется модель с цифровым выходом и памятью на 100 точек)	0,48
MX4+, Fluke (Ray- tek), США	-30...+900	60 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. Излучения. Цифровой выход. Компьют. программа	0,48

Продолжение табл. 9.5

Модель	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Дополнительные функции	Масса, кг
PhotoTemp, Fluke (Raytek), США	-30...+900 (-50...+500)	60 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. излучения. Цифровой выход. Компьют. программа. Цифровой фото-аппарат	0,58
3i, Fluke (Raytek), США	-30...+1200 (модель 1М до +1800 °С, модель 2М до +3000 °С)	от 25 : 1 до 180 : 1	Круговой лазер. Регулир. коэфф. излучения. Цифровой выход. Компьют. программа. Спектральные фильтры для стекла и пластмасс	0,8...1
FoodPro и FoodPro Plus, Fluke (Raytek), США	-30...+200 (-35...275)	2,5 : 1	Пищевые продукты	0,1 (0,15)
ULTIMAX-10 (IRCON, США)	+900 ... +3000	–	Видоискатель RS 232	–
ULTIMAX-20 (IRCON, США)	+600...+3000	–	Видоискатель RS 232	–
ULTIMAX-40 (IRCON, США)	-50...+1000	–	Видоискатель RS 232	–
ULTIMAX-400 (IRCON, США)	-20...+300	10 : 1	Точечный лазер	0,18
Optris LaserSight (Optris, США)	-35...+900	75 : 1	Лазер. USB интерфейс. Термопара	–
Optris LaserSight (Optris, США)	-32...+530	20 : 1	Лазер. Сигнализация	0,15
TI120EL	-20...+500	8 : 1	Лазер	0,17
TI210EL	-20...+1200	35 : 1	Лазер	0,17
TI315E	500...+3000	120 : 1	Коаксиальный лазер. Оптический прицел	0,2

\* В 2005 г. в связи с приобретением фирмой Fluke фирмы Raytek и выделением фирмы Optris номенклатура пирометров изменена. Модели MT-2,4, ST-20, 30, 60, 80 выпускаются под названием Fluke 61, 63, 65, 66, 68 (их параметры могут отличаться от приведенных в таблице). Фирма Raytek специализируется на производстве стационарных ИК термометров. Портативные ИК термометры также выпускаются Фимой Optris.

**MiniTemp FS**

Диапазон измерений:  
–30...+200 °С

Показатель визирования: 4 : 1  
Одиночный лазер

**MX4+**

Диапазон измерений:  
–30...+900 °С

Показатель визирования: 60 : 1  
Круговой лазер  
Цифровой выход и компьютерная обработка

**3i**

Диапазон измерений: –  
30...+3000 °С

Показатель визирования: 180 : 1  
Круговой лазер  
Цифровой выход и компьютерная обработка

**Рис. 9.16. Портативные ИК термометры фирмы Raytek/Fluke (США)**

### 9.9.2. Устанавливаемые бесконтактные датчики температуры

Недостатками широко распространенных контактных измерителей температуры, в частности, термопарных, являются их относительно невысокий срок службы (без специальной защитной оболочки) или большая постоянная времени (при наличии защитной оболочки), а также невозможность измерять температуру в зонах, удаленных от места установки. Рядом фирм выпускаются ИК датчики температуры, которые могут заменять термопары. 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 сигналом 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, который охлаждают водой или воздухом. Стоимость датчиков – того же порядка, что и портативных ИК термометров. Особое место в номенклатуре стационарных ИК термометров занимают пирометры спектрального отношения, с помощью которых в значительной степени решена проблема учета коэффициента излучения при пирометрии жидких металлов (следует заметить, что до настоящего времени затруднительно измерение температуры жидкого алюминия).

Из специализированных бесконтактных термометров следует отметить устройства, применяемые на железнодорожном транспорте для контроля температуры корпусов букс (в том числе, с вычислением температуры шейки оси). На российских железных дорогах в течение длительного времени применяется система ПОНАБ (прибор обнаружения нагретых букс). При появлении сигнала тревоги

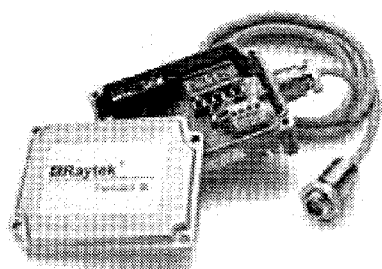
одного из двух уровней производится осмотр крепления колесной пары к вагону через подшипник на ближайшей станции или непосредственно на перегоне. Из последних разработок можно отметить автоматизированный температурный инди-

катор ТИ-2 фирмы "ИРТРАНС", включающий звуковую и световую сигнализацию при обнаружении перегретых букс.

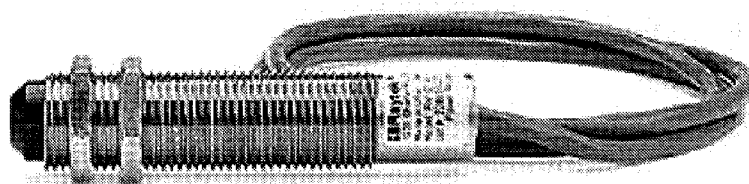
В табл. 9.6 и на рис. 9.17 описаны устанавливаемые ИК датчики температуры трех зарубежных фирм.

### 9.6. Устанавливаемые ИК датчики температуры

Модель	Диапазон измерений, °С	Показатель визирования
<i>Приборы фирмы Raytek, США</i>		
Серия Compact		
MID LT	-40...+600	2 : 1 и 10 : 1
MID G5	+150...+850	2 : 1 и 10 : 1
MID MTB	+200...+1200	2 : 1 и 10 : 1
CI	0...+500	4 : 1
GP (с лазерной наводкой)	-18...+540	50 : 1
Серия Thermalert	-18...+3000	60 : 1 и 90 : 1
Серия Marathon MM, MR, FR, FA (вкл. цветные и оптоволоконные пирометры)	-40...+3000	от 60 : 1 до 300 : 1
<i>Приборы фирмы IMPAC (Серия Infratherm), Франция</i>		
ISQ 10-LO	+600...+3300	Оптоволоконный кабель (до температуры +250 °С). Диаметр зоны измерения 0,45 мм
IS 10/LGA 10	+300...+3300	Диаметр зоны измерения 0,2 мм
IS 100/LGA 100	+300...+1800	Диаметр зоны измерения 0,35 мм
ISQ 5 (цветовой)	+600...+3000	—
<i>Приборы фирмы Optris (США)</i>		
CT	-40...+900	20 : 1



а)



б)

Рис. 9.17. Устанавливаемые ИК датчики температуры фирмы Raytek, США:

а – серия Compact MID; б – серия Compact CI

### 9.10. 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 образцовых низкотемпературных излучателей (моделей АЧТ). Фактически только небольшое число российских организаций метрологического профиля, а также ряд специализированных фирм, в состоянии выполнять аттестацию и поверку ИК приборов для измерения температуры. Следует отметить, что на практике зачастую поверяют диапазон измерения температуры и основную погрешность, хотя, например,

тепловизоры характеризуются достаточно большим набором метрологических параметров. Процедура аттестации и поверки может различаться в зависимости от назначения тепловизоров, например, в СССР была 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 данной книги (см. [12, 155, 162 – 163]), поэтому ограничимся техническими характеристиками некоторых серийных моделей АЧТ, приведенными в табл. 9.7.

### 9.7. Эталонные излучатели для поверки тепловизоров и ИК термометров

Модель	Диапазон температур, °С	Погрешность	Температурное разрешение, °С	Стабильность	Диаметр апертуры, мм	Коэффициент излучения
<i>Зарубежные приборы</i>						
BB1000 (Raytek)	–20...+150	±0,3 °С	0,1	0,1 °С/8 ч	51	0,98
BB2500 (Raytek)	+10...+300	± °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
IR-2100 (Infrared Systems Development)	–5...+140	–	–	–	50	–
IR-160 (Infrared Systems Development)	от окр. среды до +350	–	–	–	250	–
M340 (Mikron)	–20...+150	±0,3 °С	1	0,1 °С/8 ч	51	0,99

Продолжение табл. 9.7

Модель	Диапазон температур, °С	Погрешность	Температурное разрешение, °С	Стабильность	Диаметр апертуры, мм	Коэффициент излучения
M300 (Mikron)	+200...+1150	±1 °С	1	0,5 °С/8 ч	51	0,995
M335 (Mikron)	+300...+1500	±1 °С	1	1 °С/8 ч	16,5	0,99
<i>Отечественные приборы</i>						
АЧТ-165/40/10 ("Эталон")	+40...+100	–	0,01 (дисплей)	0,1 °С/30 мин	165	0,98
АЧТ-100/1100 ("Эталон")	+100...+1100	–	–	0,5 °С/1 мин	35	0,985
АЧТ-16/900/2500 ("Эталон")	+900...+2500	–	–	5 °С/15 мин	16	0,98

### 9.11. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Поскольку одним из основных преимуществ теплового метода НК является оперативный характер испытаний, который реализуется только в случае использования ИК устройств измерения температуры, 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 [2].

Четыре основных типа температурных датчиков описаны в табл. 9.8. 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).

#### 9.11.1. Термопары

Открытый Т. Зеебеком 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

$$e_{AB} = \alpha T, \quad (9.10)$$

где  $\alpha$  – термоэлектрический коэффициент.

В табл. 9.9 описаны свойства некоторых распространенных материалов, используемых для изготовления термопар.

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

### 9.8. 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

медь – медь, но вызывает ее в месте контакта медь – константан (рис. 9.18, а). Распространенным способом учета этого эффекта является термостабилизация дополнительного спая, например, помещая его в тающий лед (рис. 9.18, 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 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. Гавинским были разработаны тепловые дефектоскопы активного типа для сканирования поверхности многослойных цилиндрических изделий с дефектами типа расслоения [1]. В дефектоскопах были использованы многоэлементные термоэлектрические датчики площадью  $1 \times 1 \text{ см}$ , которые прижимались

9.9. Свойства термопар [2]

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

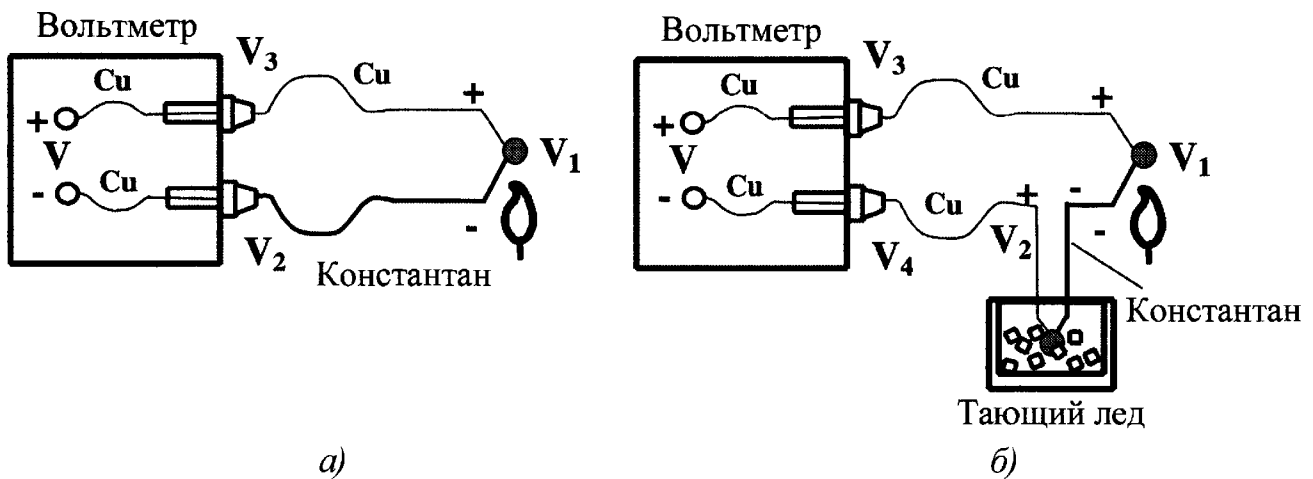


Рис. 9.18. Включение термопар:

а – непосредственное ( $V_1 = 0$ ); б – с использованием эталонного спая ( $V_3 = V_4 = 0$ )

к контролируемой поверхности через фторопластовые прокладки с воздушным зазором около 0,1 мм. Теплопередача в таком зазоре происходит путем теплопроводности; большая постоянная времени делает такие датчики пригодными для обнаружения дефектов достаточно большой площади, характеризующихся оптимальным временем регистрации до нескольких секунд (изделия типа резина-металл). Преимущество приборов: простота и невысокая стоимость. Сведения о продолжении данной разработки в настоящее время отсутствуют.

9.11.2. 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 сопротив-



ления 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. 9.10) 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

$$R_T = R_0 \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T^3}{100} \right) \right], \quad (9.11)$$

где  $R_T$  – сопротивление при температуре  $T$ ;  $R_0$  – сопротивление при температуре  $T = 273$  К;  $\alpha$  – температурный коэффициент;  $\delta \approx 1,49$ ;  $\beta = 0$ , если  $T > 273$  К и  $\beta = 0,11$ , если  $T < 273$  К. Более точные значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  определяют путем тарировки термометра сопротивления при четырех температурах.

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

## 9.10. Электропроводность металлов

Металл	Электрическое сопротивление, Ом · мм <sup>2</sup> · м
Золото	21,61
Серебро	14,63
Медь	15,39
Платина	98,08
Вольфрам	49,87
Никель	59,85

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.

### 9.11.3. Термисторы

Термисторы подобны термометрам сопротивления, но в качестве чувствительного элемента они используют полупроводники, у которых зависимость сопротивления от температуры может быть весьма крутой. Поэтому термисторы являются наиболее чувствительными 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 термомет-

ров приведено на рис. 9.19. Видно, что термисторы являются весьма нелинейными датчиками; их характеристика описывается уравнением Штейнхарта-Харта [2]

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3}, \quad (9.12)$$

где  $T$  – температура, К;  $R$  – сопротивление, 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.

#### 9.11.4. 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

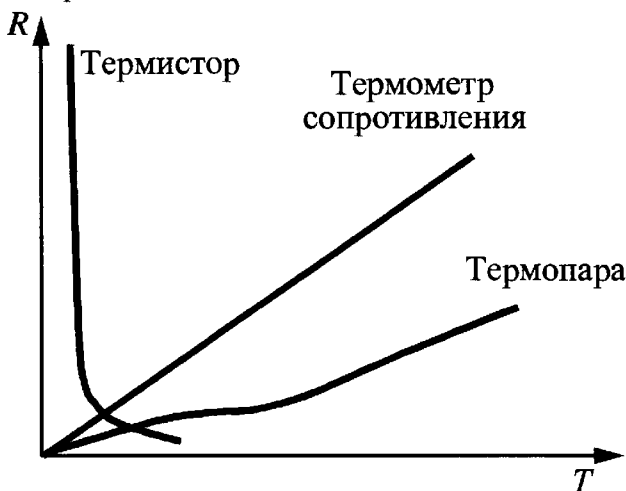


Рис. 9.19. Зависимость электросопротивления контактных термометров от температуры

диапазоном измеряемых температур. Их часто используют для компенсации ошибок измерения термопар, а также для создания многоканальных автоматизированных систем измерения температуры в промышленности.

#### 9.11.5. Жидкокристаллические термоиндикаторы

Открытые более ста лет назад жидкие кристаллы, которые занимают промежуточное положение между твердыми кристаллическими веществами и жидкостями, долгое время рассматривались в качестве физического курьеза. В 70-х годах прошлого века произошло стремительное нарастание исследований и практического применения этих специфических веществ.

В качестве датчиков температуры используют жидкие кристаллы, в которых молекулы выстраиваются в определенном порядке в зависимости от температуры, создавая так называемые нематические, холестерические или смектические мезофазы. Рассеивая белый свет, такие 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 ультрафиолетового (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 теплообменни-

ков, 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 трассирующих веществ в водных средах (размер капсул 5 – 10 мкм); 4) пленки на полиэфирной основе; 5) компаунды и смеси для мало-размерных объектов (в последнем случае пространственное разрешение достигает нескольких микрометров).

Химический состав жидких кристаллов определяет их цветовой отклик на изменение температуры. Производители обычно указывают начальную температуру цветоизменения 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 (см. книгу [164]).

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 температуры радиоэлектронных компонент в процессе конструирования и эксплуатации. 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, использующие RGB (Red-Green-Blue) модель цвета.

Методика применения жидкокристаллических термоиндикаторов включает следующие этапы [2].

- Оценка 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).

- Минимизация экспонирования объекта контроля ИК и УФ излучению.

- Калибровка цветов по температуре (если это необходимо).

- Оценка температурного распределения по визуальной или зарегистрированной цветовой картине.

#### 9.11.6. 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  $3,4$  °C, хотя основная погрешность составляет от  $14$  до  $28$  °C. 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 промышленных установок.

# ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДАННЫХ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

### 10.1. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТЕПЛОМ КОНТРОЛЕ

Как отмечалось выше, любой метод НК включает фазу *обнаружения* дефектов и фазу *оценки* их параметров. Фаза обнаружения завершена, если оператором или автоматическим устройством объект контроля либо признан бездефектным, т.е. соответствующим нормативным требованиям по качеству, либо принято решение о наличии в нем тех или иных дефектов. На этой стадии обработки результатов НК параметры дефектов не определяются, а процесс принятия решения носит статистический характер. На стадии дефектометрии, используя математические методы решения обратных задач, оценивают параметры дефектов и степень их серьезности с точки зрения безотказного функционирования объекта контроля; в ряде случаев прогнозируется качество (срок службы, работоспособность) объекта. В ТК процедуры обработки данных согласно указанным стадиям разработаны слабо, в особенности, если речь идет о прогнозировании срока службы изделий. В большинстве случаев решения о степени серьезности обнаруженных дефектов принимается конечным пользователем (заказчиком) на основе существующих норм и стандартов.

В ТК заключение о качестве изделий принимается на основе анализа: 1) амплитуды 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 де-

фектов отличались от ТФХ основного материала (или на поверхности раздела материалов, в том числе однотипных, имели бы место специфические граничные условия, например, возникало контактное сопротивление); 2) дефекты должны создавать максимальное возмущение для тех тепловых потоков, которые ответственны за возникновение температурных аномалий. Из последнего условия следует, что активный 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 изменения ТФХ, включая зоны аномальной влажности; 5) локальный унос материала (коррозия); 6) участки контакта двух материалов с повышенным тепловым сопротивлением, включая так называемые "целующиеся" (kissing) дефекты.

### 10.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Рассмотрим схему НК, представленную на рис. 10.1. Входную информацию поставляет объект контроля, о состоянии (качестве) которого оператор или автоматическое устройство должен 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 – ИП (ис-

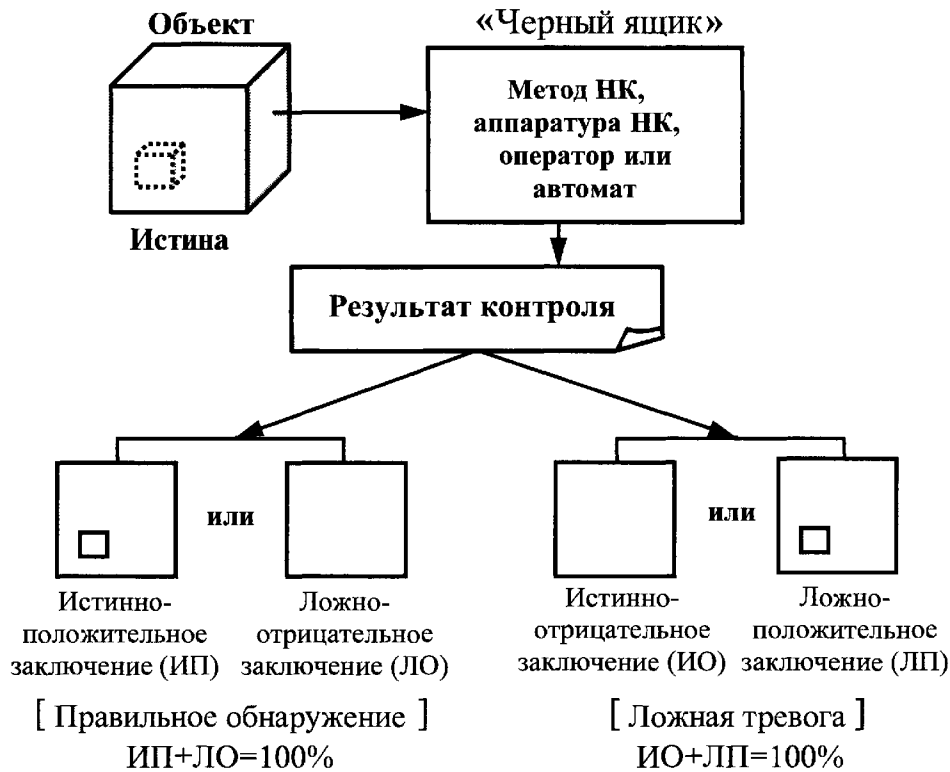


Рис. 10.1. Схема НК

тина: "дефект есть", заключение: "дефект есть"), ложно-отрицательным – ЛО (истина: "дефект есть", заключение: "дефекта нет"), истинно-отрицательным – ИО (истина: "дефекта нет", заключение: "дефекта нет") и ложно-положительным – ЛП (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. 10.1). Истинно-положительное заключение характеризуется вероятностью правильного обнаружения (*correct detection*)  $P_{cd}$ , а ложно-положительное заключение – вероятностью ложной тревоги (*false alarm*)  $P_{fa}$ . Заметим, что  $P_{cd} + P_{fa} \neq 100\%$ . Как будет показано ниже, в НК чаще всего применяют стратегию принятия решений Неймана-Пирсона, согласно которой фиксируют величину  $P_{fa}$  и оценивают  $P_{cd}$ .

Простейший случай принятия решения в одномерном пространстве информативных признаков изображен на рис. 10.2. 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 пиксельных амплитуд; таким образом, каждая зона может быть отнесена либо к классу "дефектных", либо "бездефектных". Результатом классификации являются *бинарные карты дефектов*.

В статистике принятие решения сводят к проверке нулевой ( $H_0$ ) и альтернативной ( $H_A$ ) гипотезы:  $H_0: \bar{T}_d = \bar{T}_{nd}$  и  $H_A: \bar{T}_d \neq \bar{T}_{nd}$ , где  $\bar{T}_d$ ,  $\bar{T}_{nd}$  суть средние температуры соответственно в дефектной и бездефектной области. При этом используют различные статистические критерии, выбор которых зависит от характера распределения амплитуд сигнала и шума. Описание некоторых статистических критериев приведено в табл. 10.1.

Отношение *сигнал/шум*, определяемое как

$$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}, \quad (10.1)$$

служит общепринятым статистическим критерием при обнаружении дефектов

(напомним, что  $\sigma_{nd}$  есть стандартное отклонение информативного параметра в бездефектной области).

Если значения информативного параметра распределены по нормальному закону, часто используется *Z-критерий* [165]

$$\hat{z} = \frac{|\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}|}{\sqrt{\frac{\sigma_d^2}{n_d} + \frac{\sigma_{nd}^2}{n_{nd}}}}, \quad (10.2)$$

где  $n_{nd}$  и  $n_d$  – количество пикселей в анализируемых зонах (бездефектной и дефектной).

Определенное таким образом значение  $\hat{z}$  сравнивается с критическим значением  $z_{cr}$ , которое рассчитывается из уравнения

$$\alpha = P_{f.a} = 1 - F(z_{cr}), \quad (10.3)$$

где  $F(z_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{cr}} e^{-x^2/2} dx$  – функция

распределения,  $\alpha$  – вероятность того, что стандартная нормальная переменная величина  $z$  примет значения больше  $z_{cr}$  ( $\alpha$  есть вероятность ложной тревоги  $P_{f.a}$ ).

Две сравниваемые зоны (*популяции*) считаются статистически различными, если  $\hat{z} \geq z_{cr}$ . Заметим, что описываемый подход не всегда оправдан при анализе пиксельных значений. Из-за большого

количества пикселей в изображениях *z*-тест практически всегда подтверждает статистическое различие между зонами. Поэтому *z*-критерий рекомендуется для сравнения различных техник НК или алгоритмов обработки данных: при прочих равных условиях наиболее эффективная техника (алгоритм) обеспечивает наибольшее значение  $\hat{z}$ .

Для сравнения распределений, не подчиняющихся нормальному закону, используют другие статистические параметры, например, *D*-критерий Колмогорова-Смирнова (см. табл. 10.1).

Статистические распределения, показанные на рис. 10.2, служат простой графической иллюстрацией введенных выше вероятности ложной тревоги  $P_{f.a}$  и вероятности правильного обнаружения  $P_{c.d}$ , которые могут быть определены после того, как выбран *порог принятия решения*  $z_{cr}$ . Величина  $P_{f.a}$  численно равна площади под кривой "бездефектного" распределения справа от порога  $z_{cr}$ . Это означает, что *Риск I*  $\alpha$  принятия решения равен  $P_{f.a}$ . Соответственно, величина  $P_{c.d}$  численно равна площади под кривой "дефектного" распределения также справа от порога  $z_{cr}$ . *Риск II*  $\beta$  принятия решения связан с принятием ложной нулевой гипотезы и равен  $\beta = 1 - P_{c.d}$ .

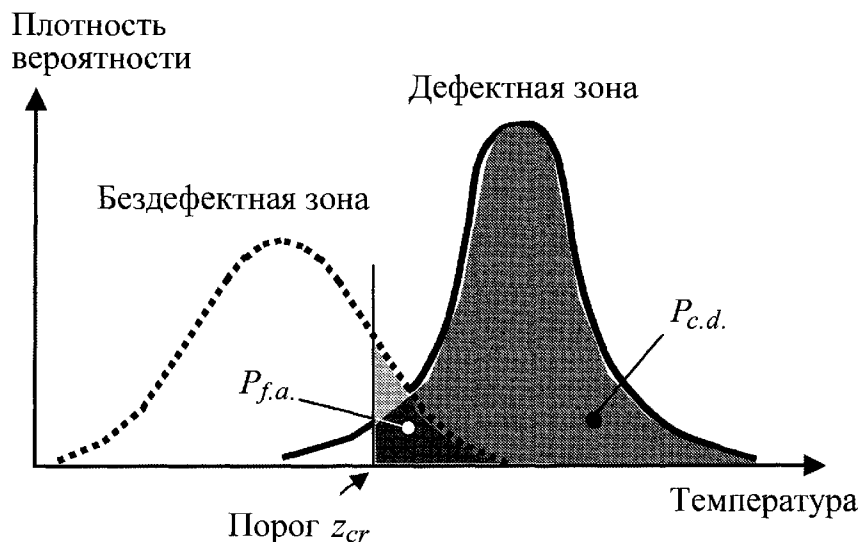


Рис. 10.2. Статистика принятия решений

(одномерное пространство признаков)

**10.1. Статистические критерии сравнения двух распределений**

Критерий	Формула	Примечание
Отношение сигнал/шум ( $S$ )	$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}},$ <p>где <math>\sigma_{nd}</math> – стандартное отклонение в бездефектной области</p>	<p>Значения <math>S &gt; 1</math> 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 <math>n_{nd}</math> и <math>n_d</math> – количество пикселей в сравниваемых областях; <math>\sigma_d</math> – стандартное отклонение в дефектной области</p>	<p>Значение z-критерия сравнивают с критическим значением <math>z_{cr}</math>, полученным из уравнения:</p> $\alpha = P_{f.a} = 1 - F(z_{cr}),$ <p>где <math>F(z_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{cr}} e^{-x^2/2} dx</math> – функция распределения; <math>\alpha</math> – вероятность того, что переменная <math>z</math> примет значения <math>\geq z_{cr}</math> (вероятность ложной тревоги <math>\alpha = P_{f.a}</math>). 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 <math>F_d</math> и <math>F_{nd}</math> – эмпирические кумулятивные частоты</p>	<p>Максимальное значение D-критерия сравнивают с критическим значением <math>D_{cr}</math>, которое при <math>n_d + n_{nd} &gt; 35</math> определяют по формуле [165]:</p> $D_{cr} = K_\alpha \sqrt{\frac{n_d + n_{nd}}{n_d n_{nd}}},$ <p>где <math>K_\alpha</math> – константа, зависящая от уровня значимости <math>\alpha</math> (табулирована в [165]); например, <math>K_\alpha = 0,136</math>, если <math>\alpha = 0,05</math>. D-критерий применим к любым распределениям</p>
Вероятность ложной тревоги $P_{f.a}$	<p>Величина <math>P_{f.a}</math> численно равна площади под кривой "бездефектного" распределения справа от выбранного порога <math>z_{cr}</math> (рис. 10.2)</p>	<p>Решение о статистическом различии двух областей принимают с Риском I (уровнем значимости) <math>\alpha</math>, равном <math>P_{f.a}</math></p>
Вероятность правильного обнаружения $P_{c.d}$	<p>Величина <math>P_{c.d}</math> численно равна площади под кривой "дефектного" распределения справа от выбранного порога <math>z_{cr}</math> (рис. 10.2)</p>	<p>Риск II принять ложную нулевую гипотезу равен <math>\beta = 1 - P_{c.d}</math></p>

При *нормальном* распределении признаков дефектности в теории статистических решений известны следующие соотношения:

$$P_{c,d} = 1 - \Phi \left( Z = \frac{\bar{U}_d - U_{thr}}{\sigma_{nd}} \right);$$

$$P_{f,a} = \Phi \left( Z = \frac{U_{thr} - \bar{U}_{nd}}{\sigma_{nd}} \right),$$

(10.4)

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.

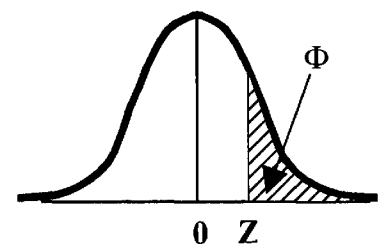
Некоторые значения интеграла вероятности приведены в табл. 10.2. Например, для получения  $P_{f,a} = 5\%$  необходимо порог принятия решения установить равным  $\bar{U}_{nd} + 1,6\sigma_{nd}$ .

В качестве информативного параметра можно использовать избыточную температуру поверхности  $T$ , абсолютный перепад температуры  $\Delta T$  относительно условно-бездефектной точки или текущий контраст  $C^{rum}$ . Неокрашенные металлические поверхности часто создают ложные дефектные отметки, обусловленные наличием ржавчины, грязи, царапин и т.п. При этом статистические распределения информативных параметров в бездефектных и дефектных зонах могут быть сходными. Очевидно, что существенное совпадение

этих распределений означает практическую невозможность обнаружения скрытых дефектов. Другим крайним случаем является полное разделение статистических распределений в дефектных и бездефектных зонах, что имеет место в случае больших дефектов. Во всех других случаях принятие решения по выбранному порогу, как отмечалось выше, приводит к определенной комбинации значений  $P_{c,d}$  и  $P_{f,a}$ , которые принимают значения от 0 до 1.

Связь между  $P_{c,d}$  и  $P_{f,a}$  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 показан на рис. 10.3

При практическом сравнении методов НК часто используют зависимость  $P_{c,d}$  от размеров дефектов (probability of detection – POD), усредненную по нескольким операторам, что учитывает также человеческий фактор. Пример такого подхода приведен на рис. 10.4, где зависимости вероятности правильного обнаружения от размеров дефектов приведены для УЗ, ИК термографического и голографического 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,



10.2. 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



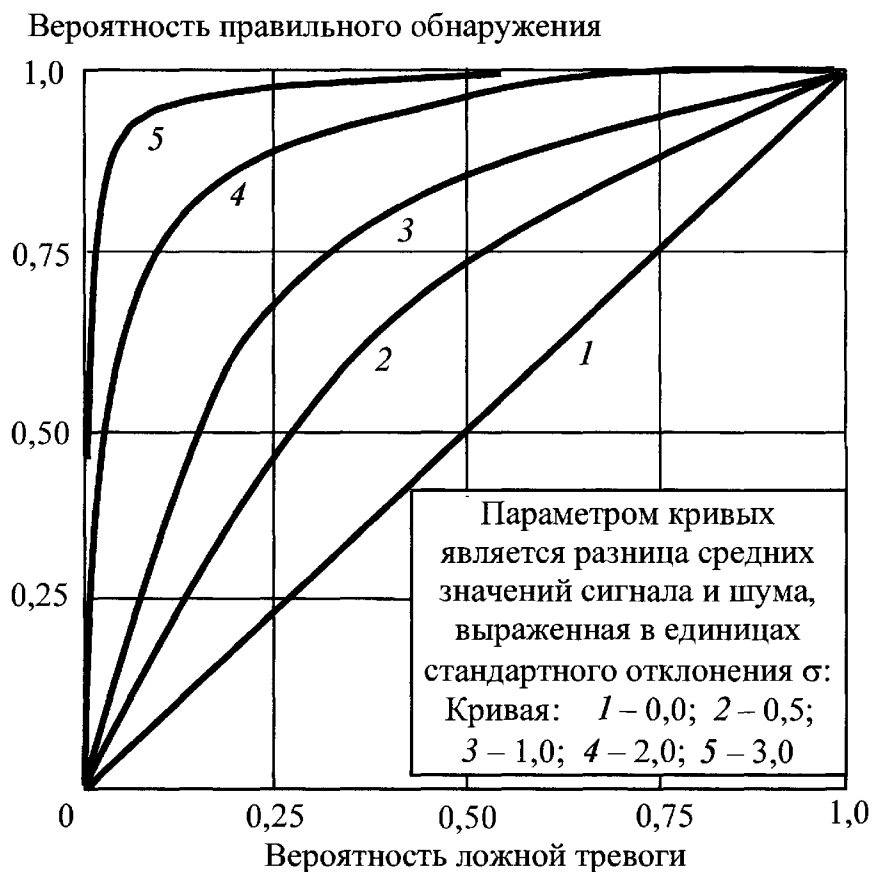


Рис. 10.3. Рабочая характеристика детектора (обнаружителя)

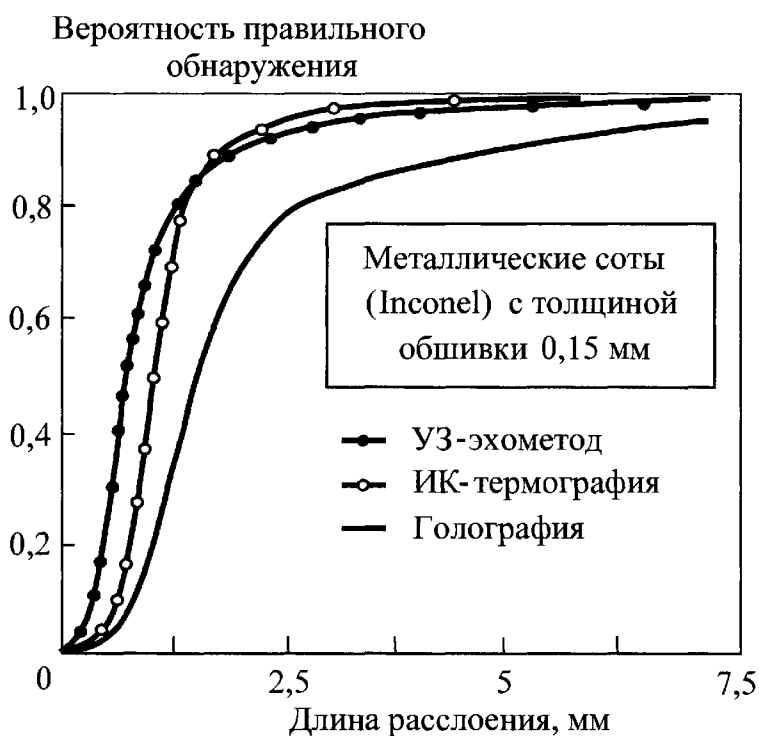


Рис. 10.4. Кривые вероятности правильного обнаружения для трех методов НК металлических сот (адаптировано из [166])

разрабатывавшегося в США [166] (см. Главу 11). Статистические данные рис. 10.4 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 ТК оказался предпочтительным для дефектов бóльшего размера. Результаты голографических испытаний были значительно хуже для всех типов дефектов.

При анализе полутонных термограмм был предложен простой критерий дефектности, известный в теории распознавания образов как критерий Танимото [1]

$$B = \frac{N_{r,d} - N_{m,d}}{N_{r,d} - N_{f,d}}, \quad (10.5)$$

где  $N_{r,d}$ ,  $N_{m,d}$ ,  $N_{f,d}$  – 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  $P_{c,d} = 100$  % и  $P_{f,a} = 0$ . Данный критерий целесообразно применять при сравнении различных методов НК и процедур обработки данных применительно к стандартным образцам.

Описано использование критерия Танимото при обработке результатов одностороннего ТК образца из углепластика с 9-ю искусственными дефектами в виде фторопластовых вставок размером  $3 \times 3$ ;  $6 \times 6$  и  $12 \times 12$  мм, расположенных на глубинах 0,25; 1,25 и 2,5 мм [3]. Статистические результаты, усредненные по 11-ти операторам, приведены в табл. 10.3. Сделаны следующие выводы: 1) вопреки распространенному мнению количество ложных дефектных отметок было невелико (это можно объяснить регулярным расположением дефектов); 2) разнообразные формы графического представления данных (цветные, черно-белые изображения и их ксероксные копии) не оказали существенного влияния на достоверность обнаружение дефектов; 3) самые высокие значения  $B$  соответствовали таймограмме и ее производным.

### 10.3. 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

### 10.3. КАРТА ДЕФЕКТОВ

Карта дефектов представляет собой бинарное изображение (binary, hit-miss), в котором единичный пиксель приписывается дефектным зонам, а нулевой – бездефектным. Карты дефектов, построенные для конкретной области на поверхности объекта контроля, характеризуются статистическими показателями  $P_{f.a}$  и  $P_{c.d}$ , которые возникают после введения порога бинаризации (порога принятия решения). Как отмечалось выше, в НК чаще всего используется критерий принятия решения Неймана-Пирсона, согласно которому фиксируется значение  $P_{f.a}$ , что эквивалентно заданию порога принятия решения  $Z_{cr}$ , после чего определяется  $P_{c.d}$ . Простейший алгоритм построения карты дефектов можно выразить следующим условием:

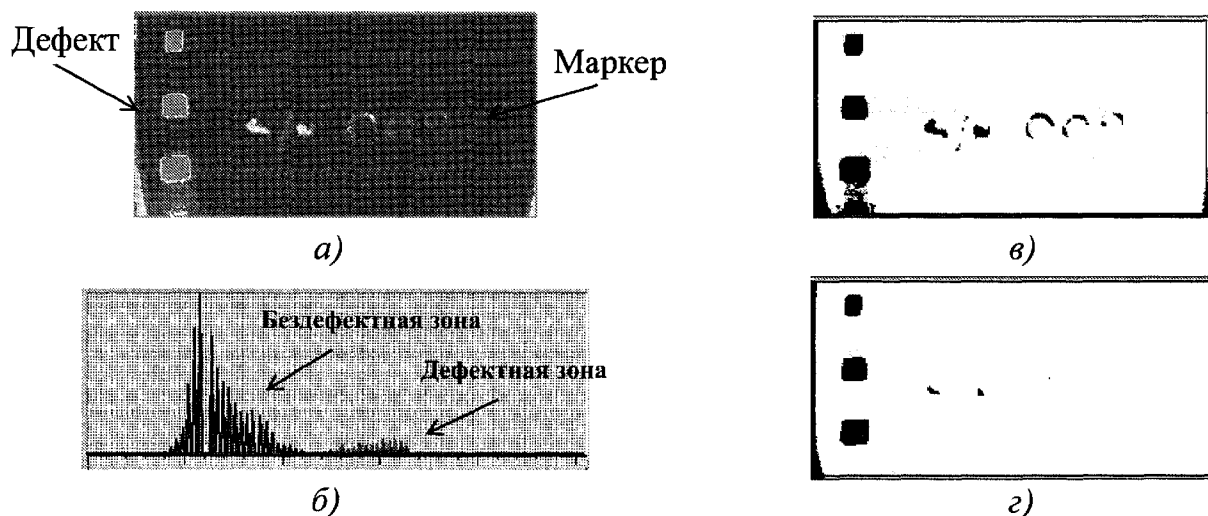
$$T(i, j) = 1, \text{ если } T(i, j) \geq T_{thr}, \text{ иначе} \\ T(i, j) = 0, \quad (10.6)$$

где  $T(i, j)$  – используемый информативный параметр;  $T_{thr}$  – порог принятия решения.

Построенная таким способом карта дефектов, согласно стратегии Неймана-Пирсона, характеризуется определенными значениями  $P_{f.a}$  и  $P_{c.d}$ .

Простая иллюстрация статистической обработки данных в медицинской ИК термографии приведена на рис. 10.5 (см. цветную вкладку) (программа ThermoFit Pro, "Инновация"). Оператор выделяет на термограмме две области, покрывающие интересующие его зоны (на рис. 10.5, *а*, *б* для наглядности показаны прямоугольные зоны), после чего оценивает степень статистического совпадения зон. Например, у здоровой пациентки (рис. 10.5, *а*) отношение сигнал/шум  $S = 0,064$ , что говорит об идентичности температурных распределений в зонах. Рак левой молочной железы III-й степени (рис. 10.5, *б*), сопровождающийся некрозом тканей и резким понижением температуры, характеризуется значением  $S = 3,45$ , что свидетельствует о резком различии температурных распределений. Карта дефекта на рис. 10.5, *в* отчетливо показывает пораженный орган.

Примеры карт дефектов, полученных в результате обработки данных ТК образца из углепластика (см. табл. 10.3), показаны на рис. 10.6. На исходном ИК изо-



**Рис. 10.6. Результаты статистической обработки результатов ТК образца из углепластика:**

*а* – исходная термограмма; *б* – распределения пиксельных амплитуд; *в* – карта дефектов ( $P_{f.a} = 10\%$ ,  $P_{c.d} = 100\%$ ,  $S = 5,5$ ); *г* – карта дефектов ( $P_{f.a} = 5\%$ ,  $P_{c.d} = 100\%$ ,  $S = 5,5$ )

бражении можно выделить три дефекта прямоугольной формы, а также маркерную надпись на поверхности образца, выполненную краской белого цвета (рис. 10.6, а). Сравнение *a priori* известных дефектных зон с фоном показало, что отношение сигнал/шум для всех трех дефектов равно  $S = 5,5$  (рис. 8.6, б). Размещая между двумя распределениями порог принятия решения, можно определить вероятности  $P_{f.a}$  и  $P_{c.d}$ . Снижение уровня ложной тревоги, достигаемое перемещением порога вправо (рис. 10.6, б), позволяет устранить температурный отпеча-

ток маркера, но одновременно уменьшает размеры дефектных зон (сравнить карты дефектов на рис. 10.6, в и 10.6, з).

### 10.4. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ В ТЕПЛОВМ КОНТРОЛЕ

Как отмечено выше, в простейшем случае решение о качестве принимают по одному информативному параметру, например, по температуре. В качестве примера рассмотрим обнаружение зон коррозии в образце из стали (рис. 10.7, а). Практический интерес представляет случай, когда гистограммы температуры в

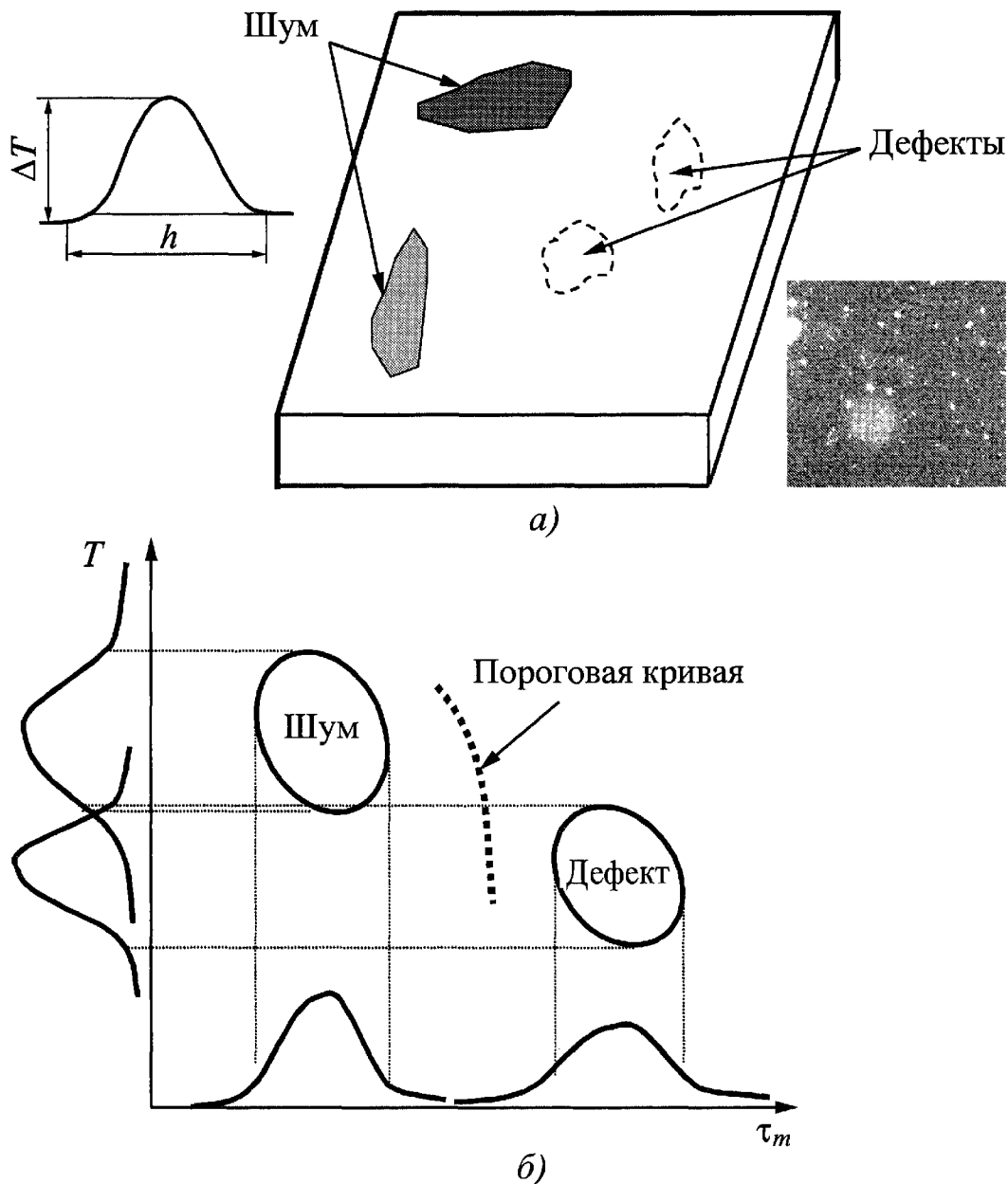


Рис. 10.7. Распознавание образов в ТК:

а – обнаружение скрытой коррозии; б – двумерное пространство информативных признаков

дефектной и бездефектной области частично перекрывают друг друга, что снижает надежность принятого решения. Улучшить статистические параметры обнаружения можно, введя в рассмотрение второй информативный параметр, например, момент оптимального наблюдения  $\tau_m(\Delta T_m)$ . 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  $\Delta T_m$  и длительными временами  $\tau_m$ , тогда как для поверхностных аномалий соотношение этих двух параметров является случайным. Графическая иллюстрация принятия решения в пространстве двух признаков представлена на рис. 10.7, б. В этом случае границей разделения областей служит кривая в плоскости, параметры которой следует определить, исходя из требуемых показателей  $P_{c,d}$  и  $P_{f,a}$ . Еще одним информативным параметром может служить характерный геометрический размер анализируемой температурной аномалии  $h$  (см. рис. 10.7, а), что позволяет разделить сигналы, обусловленные 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; 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. 10.7, б обладают сходными распределениями пиксельных амплитуд, но сильно различаются по параметру  $\tau_m$ . Анализ степени корреляции различных информативных признаков в ТК не проводился.

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 детально проанализировал Д. Ллойд [162]. Автоматическое распознавание образов на практике часто сводится к простым пороговым устройствам; также разработаны сложные компьютерные алгоритмы распознавания образов. В частности, в последние годы в НК эффективно используют нейронные сети, которые обучают подобно операторам.

## 10.5. ПОМЕХИ В ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ

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*  $\tilde{M}$ ):

$$u(x, y, \tau) = \tilde{M}T(x, y, \tau) + \tilde{A}. \quad (10.7)$$

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  $\Delta T_{res}$ , приближающееся в современных моделях к  $0,01$  °С. Дальнейшее улучшение температурного разрешения возможно путем применения метода накопления. Тем не менее, в естественных условиях конвекция воздуха и посторонние излучатели создают шум приблизительно на уровне  $0,1$  °С, что и можно считать пределом чувствительности ТК в реальных условиях (см. законы ТК в Приложении 2).

Каждый тип шума можно выразить в температурных единицах. Различают *структурный* ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{str}^2}$ ), *аппаратурный* ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{app}^2} = \Delta T_{res}$ ) и *внешний* ( $\sqrt{\Delta \bar{T}_{ext}^2}$ ) шум. С использованием этих терминов отношение сигнал/шум можно определить как

$$S = \frac{\Delta T(\tau)}{\sqrt{(\Delta \bar{T}_{res})^2 + (\Delta \bar{T}_{str})^2 + (\Delta \bar{T}_{ext})^2}}. \quad (10.8)$$

При использовании временных параметров эквивалентный шум можно оценить по выражению

$$\Delta T = \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} \Delta \tau. \quad (10.9)$$

Шум окружающей среды создается тепловым потоком от 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 бленды, экраны, фильтры и т.п. Труднее устраняется излучение, отраженное от объекта контроля. В активном ТК основным ис-

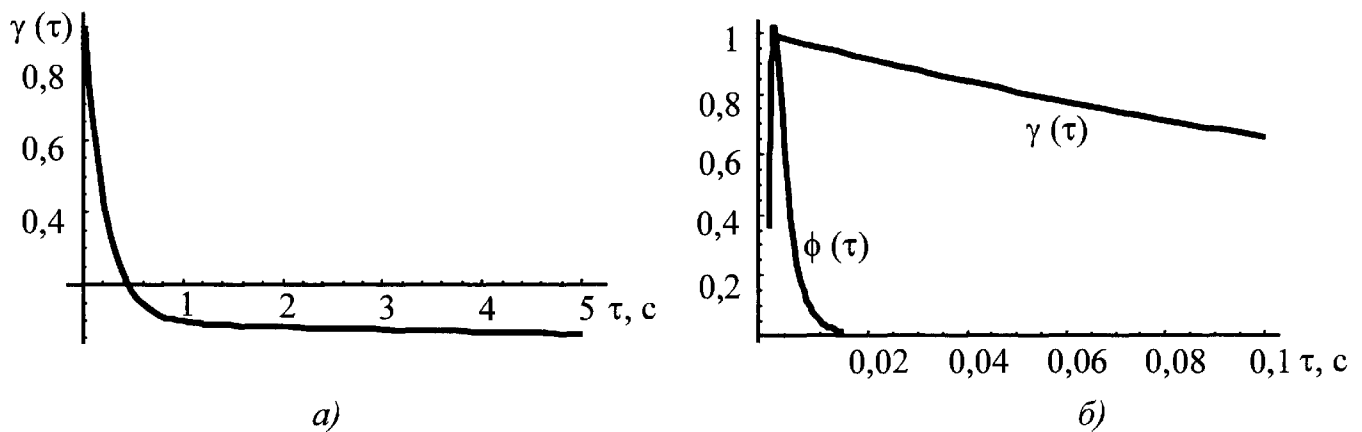
точником внешнего шума является нагреватель. Например, при оптическом нагреве металлов остаточное излучение ламп может серьезно исказить вид термограмм и приводить к некорректным оценкам параметров дефектов, если используются чисто температурные модели тепловой дефектометрии. Если коэффициент излучения 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. В современных тепловизорах соответствующая процедура называется введением поправки на "отраженную (reflected) температуру".

На рис. 10.8 показаны временные профили излучения импульсной лампы Bowens с энергией  $2,4$  кДж. Профиль  $\gamma(\tau)$  на рис. 10.8, а, зарегистрированный с помощью длинноволновой камеры ThermoCam SC 3000, показывает, что значительная энергия поступает к изделию в течение первой секунды, при этом полное излучение вспышки  $\phi(\tau)$ , сосредоточенное, в основном, в видимой части спектра, находится в интервале времен до  $10$  мс (рис. 10.8, 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):

$$\gamma(\tau) = 0,8933e^{-4,761\tau} + 0,09082e^{-0,08477\tau}; \quad (10.10)$$

$$\phi(\tau) = \frac{-0,00174\tau^2 + 3,52 \cdot 10^{-5}\tau + 4,39 \cdot 10^{-9}}{\tau^4 + 0,00272\tau^3 + 2,40 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 6,02 \cdot 10^{-8}\tau + 7,08 \cdot 10^{-11}}, \quad (10.11)$$

где  $\tau$  – время, с.



**Рис. 10.8. Временные профили импульсной лампы Bowens:**

*a* –  $\gamma(\tau)$  – профиль нагрева, зарегистрированный длинноволновым тепловизором ThermoCam SC3000; *b* –  $\phi(\tau)$  – профиль энергии нагрева во всем спектральном диапазоне (зарегистрирован "всеволновым" пироэлектрическим приемником)

#### 10.4. 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 пассивной диагностике внешние источники теплового излучения могут создавать ложные сигналы, которые оператор будет трактовать как дефектные отметки. Внешнее излучение отражается не только металлическими, но и гладкими неметаллическими поверхностями; например, в строительной диагностике при нормальном угле визирования окон оператор наблюдает свое собственное тепловое отражение от стекла. В табл. 10.4 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 1...1,3 кВт/м<sup>2</sup>. 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 11). 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 –40 °С в зависимости от состояния атмосферы и 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 только в аспекте военной ИК съемки [155, 159, 163].

В наибольшей степени результаты ТК зависят от уровня *структурных* шумов, создаваемых объектом контроля. Эти шумы возникают вследствие как поверхностных, так и объемных флуктуаций физических свойств материалов. Наибольшие неприятности в процедурах пассивного и активного ТК доставляют поверхностные флуктуации излучательно-поглощательных свойств объекта контроля, которые могут изменяться в пространстве, времени и по спектру. 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  $\sigma_n(\tau)$ , °С, и текущего контраста шума  $C_n^{run}$ . Для строго мультипликативной помехи, определяемой только источником нагрева, шумовой контраст не должен изменяться во времени. На практике, в силу действия различных факторов, в том числе, влияния аддитивных шумов, контраст шума изменяется во времени при нагреве/охлаждении изделия. Тем не менее, во многих случаях относительный шум поверхности можно считать постоянным во времени и выражать его в терминах контраста  $C_n^{run} = \sigma_n(\tau)/T(\tau)$ , усредненного по времени и пространству.

На рис. 10.9 показано поведение контраста шума керамического теплозащитного покрытия турбинных лопаток в процессе импульсного ТК. Видно, что шумы покрытия не являются строго мультипликативными, по-видимому, вследствие того, что в течение приблизительно 25 мс после импульса нагрева, помимо структурных помех, имеет место аддитивный шум, например, вызванный отраженным остаточным излучением горячих компо-

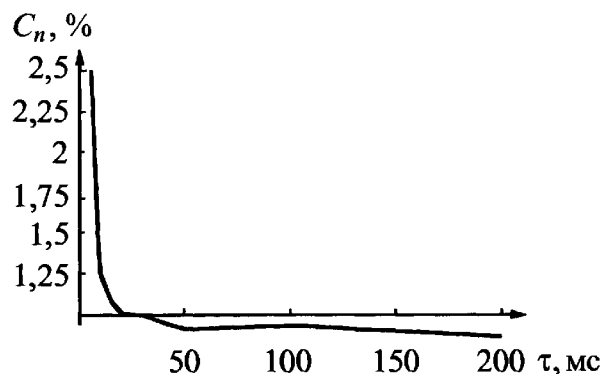


Рис. 10.9. Изменение шумового контраста во времени при ТК покрытия толщиной 250 мкм (тепловизор JADE, импульсный нагрев ксеноновой лампой)

нент импульсных ламп или другими факторами. Следовательно, наивысшие значения отношения сигнал/шум можно ожидать для тех сигналов, которые появляются через 25 мс и более после импульса нагрева, когда  $C_n \sim 1\%$ . Следует заметить, что в экспериментах с другими покрытиями шум достигал 5%.

Оценки шумовых контрастов для некоторых материалов приведены табл. 10.5. Величина  $C_n^{run}$  зависит от материала, состояния его поверхности, а также от размера пространственной области, в пределах которой 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  $\epsilon$  является принципиальной, поскольку именно флуктуации  $\epsilon$  и коэффициента поглощения  $\alpha \approx \epsilon$  вносят основной вклад в шум. Данные табл. 10.5 иллюстрируют, что: 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.



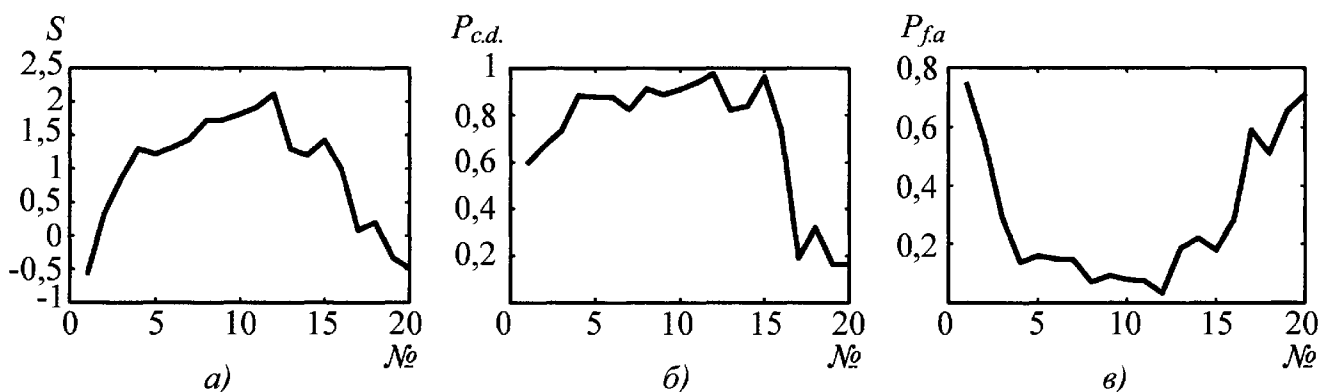
**10.5. Текущие шумовые контрасты (на уровне одного  $\sigma_n$ ) для различных материалов (процедура активного ТК; нагреватель с открытой спиралью; детектор на основе антимолибдита индия; размер пятна сканирования 0,8 мм) [1]**

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.

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

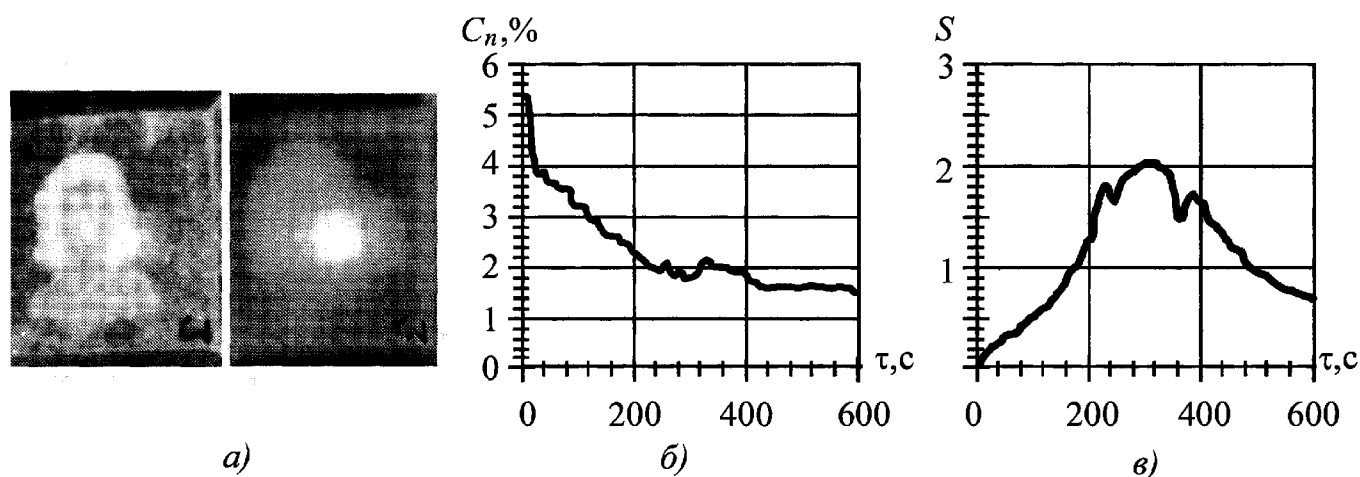
проведения ТК. Иллюстрация этому положению приведена на рис. 10.10 (ТК расслоения размером 6 мм в углепластике на глубине 1,25 мм). По оси абсцисс отложены номера изображений в последовательности, поэтому графики рис. 10.10 позволяют выбрать изображение с наилучшей "видностью" дефектов, а именно № 12.



**Рис. 10.10. Выбор оптимального момента ТК дефектов в углепластике ( $N$  – номер изображения):**

$a$  – отношение сигнал/шум;  $b$  – вероятность правильного обнаружения;

$v$  – вероятность ложной тревоги



**Рис. 10.11. Тепловий неразрушаючий контроль настиєних фресок:**

*a* – термограма в кінці нагріву (слева) і в оптимальний момент спостереження повітряного дефекта (справа); *б* – текучий шумовий контраст; *в* – відношення *сигнал/шум*

Другий приклад тимчасового поведіння вищевказаних параметрів зображено на рис. 10.11 (виявлення повітряного розшарування під фрескою, см. також Главу 11) [165]. Непосередньо після рівномірного нагріву фрески в течение 120 секунд з допомогою 4-х електричних ламп вид термограми суттєво визначається самою фрескою, неоднорідне "окрашування" котрої приводить до різ-

ко неоднорідному поглинненню оптичного випромінювання (ліва термограма на рис. 10.11, *a*); при цьому шумовий контраст максимальний. Далі, внаслідок дифузії тепла, шумовий контраст неперервно зменшується з часом (рис. 10.11, *б*). Максимальне значення відношення сигнал/шум має місце при 300 с (рис. 10.11, *в*), хоча максимальне значення сигналу  $\Delta T$  було відзначено вже при 180 с.

# ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИК ТЕРМОГРАФИИ И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

### 11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как отмечалось выше, области применения тепловых методов (ИК термографии) подразделяют на *техническую диагностику* объектов со стационарными или квазистационарными тепловыми полями 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 российских специалистов по НК относительно невелико. В ведущих западных странах ТК получил относительно широкое практическое применение в аэрокосмической технике, где разнообразие задач НК не позволяет ограничиться одним или несколькими методами. Следует заметить, что в пассивной технической диагностике можно использовать приемы активного ТК, например, при обследовании настенных фресок, анализе состояния штукатурки на фасадах зданий, обнаружении противопехотных мин и т.п. В настоящей главе рассмотрены основные области применения ТК, вне зависимости от степени стационарности исследуемых тепловых полей.

Прейскурант на различные виды тепловизионных обследований был в свое время разработан Минэнерго СССР (специализированный преЙскурант принят также компанией "Лукойл"). С учетом изменения масштаба цен стоимость обследований в настоящее время составляет от 300 до 3000 долларов США на объекты типа электрической подстанции, жилого дома, дымовой трубы, участка теплотрассы и т.п. Тепловизионная техническая диагностика была признана Минэнерго РФ и РАО "ЕЭС России" в качестве штатного средства испытаний электроустановок. Расширяется применение тепловиде-

ния при обследованиях дымовых труб, котлов и печей, изотермических резервуаров для хранения сжиженных газов и т.п. Тепловидение рассматривается органами энерго- и архитектурного надзора, а также администрациями городов, в качестве важного инструмента диагностики качества строительства и энергосбережения.

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

В Швеции длительное время проводился 100 % контроль подстанций (до 150 тысяч узлов в год), в результате чего был сделан вывод о том, что альтернативы тепловизионной диагностике нет ввиду того, что электрические контакты непрерывно деградируют и требуют регулярной проверки. В Бельгии в результате планомерной диагностики число отказов на подстанциях снизилось с 2,35 % в 1971 г. до 0,24 % в 1977 г. Применение тепловизоров для контроля высоковольтных линий электропередач в СССР сэкономило до 20 тысяч долларов США в год на регион в результате уменьшения числа аварий, отключений и недоотпуска энергии. Американская фирма H-E-V Bryan, производящая пищевые продукты, в результате аварии в системе коммутации и последовавшего пожара понесла ущерб около 100 тысяч долларов, после чего внедрила программу

ИК термографического контроля электрооборудования. При проверке отремонтированного оборудования была вновь обнаружена предаварийная ситуация, которую своевременно ликвидировали. На одной из американских фирм-производителей бумаги в результате тепловизионного осмотра была обнаружена неисправность трансформатора, которая могла нанести ущерб от 200 до 300 тысяч долларов из-за возможных потерь продукции. В теплоэнергетике Великобритании экономический ущерб от неисправного парового крана оценивается на уровне тысячи английских фунтов в год, в то время как на его тепловизионное обследование требуется несколько минут. Неисправные тепловые коммуникации (за рубежом 0,8 % всех труб считаются дефектными) наносят ущерб до 1200 долларов США на 1 километр труб. В металлургии продление срока службы футеровки ковша для разлива стали сэкономило английской

компании British Steel Corporation в двух случаях соответственно 160 и 180 тысяч фунтов. Для фирмы Usinor (Франция) экономический эффект от аналогичной работы составил 1 миллион франков. По данным фирмы Pilkington (Великобритания) контроль износа печей для производства стекла экономит до 250 тысяч фунтов, причем производительность тепловидения в 25 раз выше визуального осмотра. Сведения об окупаемости тепловизора в течение одного года на среднем нефтехимическом предприятии были сообщены фирмами Shell (Германия) и ICI (Великобритания). Специальные программы тепловизионных обследований и соответствующие службы контроля имеются на всех атомных электростанциях и многих нефтехимических предприятиях США.

В табл. 11.1 перечислены основные направления тепловизионной технической диагностики и приведены сведения о ее экономической эффективности.

### 11.1. 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 незащищенности 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 пульта 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

Продолжение табл. 11.1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
Трансформаторы (преобразователи)	Неплотные или расставшиеся соединения, плохие контакты, перегретые шины, дисбаланс трехфазной нагрузки, блокирование трубок охлаждения, уровень жидкости	Дуга, короткие замыкания, пожар. Перемотка 5000 КВт: до 70 тыс. долларов США. Замена: 80...140 тыс. долларов США
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 подключения батарей, выход из строя батарей, испорченные или неработающие контакторы или аварийные переключатели	Потеря резервных систем электропитания 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 клапанов	Повышенные теплотери и механическое разрушение. Замена секций: 1,2...5 тыс. долларов США. Замена бойлера: 8...30 тыс. долларов США. Перегрев и выход из строя печных, 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. 11.1

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 долларов США 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. 11.1

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, сбои 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 топок, огнеупорный материал, теплоизоляция	Наброс факела на стенку топки, образование нагара на внутренних поверхностях труб, сбои 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 постоянно-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

*Здания и сооружения*

Электричество	См. <i>Электрическое оборудование</i>	
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

Продолжение табл. 11.1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
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 приводит 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: <i>Системы охлаждения и нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха</i>	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
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 коррозия структуры



Продолжение табл. 11.1

Тип оборудования	Обнаруживаемые дефекты	Технико-экономические последствия дефектов
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. Большое количество влаги 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

## 11.2. АДМИНИСТРАТИВНЫЕ, ПРОМЫШЛЕННЫЕ И ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ

### 11.2.1. Общие сведения

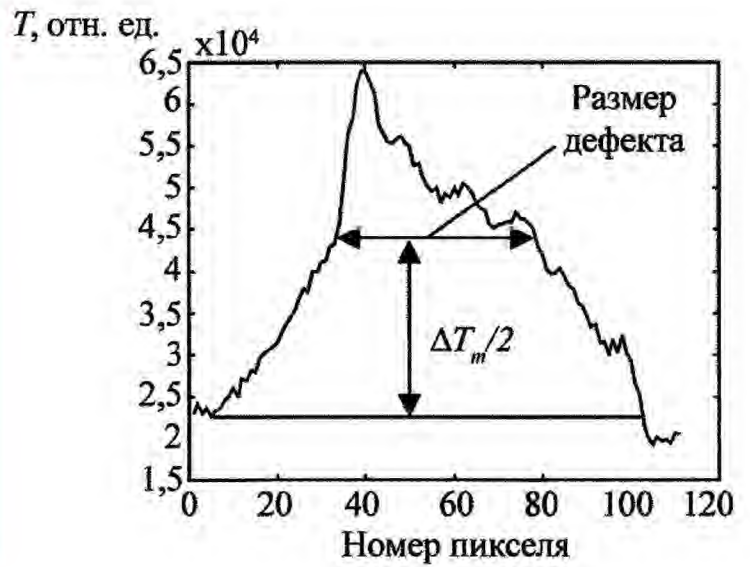
Одним из основных путей экономии энергоресурсов является уменьшение теплотерь через ограждающие конструкции строительных сооружений, которые составляют до 30 % общих энергопотерь.

Тепловизионное обследование строительных сооружений, благодаря своей оперативности, наглядности и достоверности получаемых результатов, успело зарекомендовать себя как один из основных способов диагностики ограждающих конструкций по окончании строительства

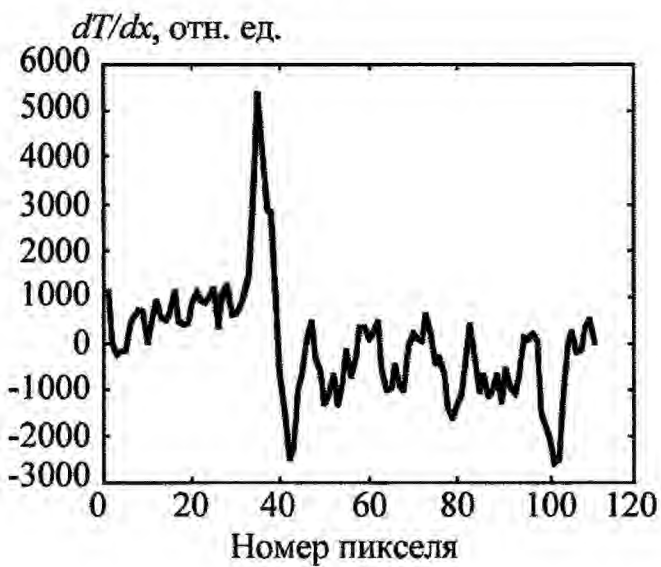
и в период эксплуатации [11, 167, 169 – 177]. Первые систематические исследования в области строительной тепловизионной диагностики были выполнены по инициативе фирмы AGA (ныне фирма FLIR Systems) в Швеции и других скандинавских странах, где необходимость экономии энергии диктуется климатом. Аналогичные работы проводились в Германии, Канаде и США, причем, например, в южных штатах США решалась обратная задача не допустить проникновение наружного тепла внутрь зданий. В период с 1980 по 2000 гг. за рубежом был выпущен ряд стандартов и методических документов по применению тепловидения в строительстве (см. Главу 12). В СССР



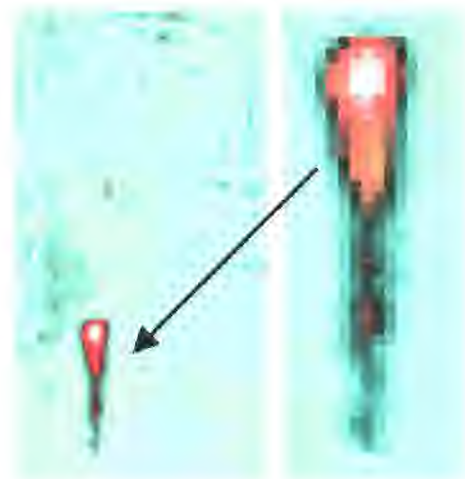
а)



б)

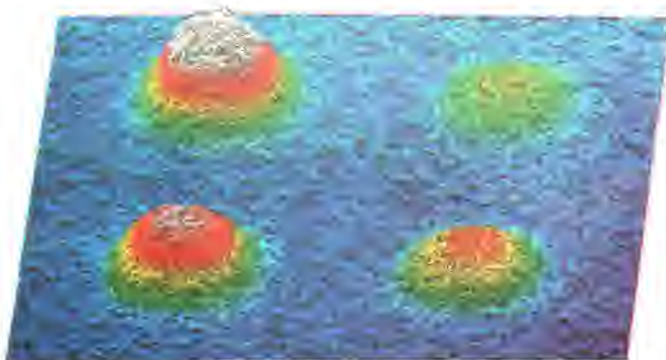


в)



г)

**Рис. 5.7. Определение поперечного размера искусственного дефекта в иконе на дереве:**  
 а – ИК термограмма (оптимальный момент наблюдения); б – профиль температуры в области дефекта; в – первая производная профиля б) по пространственной координате; г – таймограмма



а)



б)

**Рис. 6.5. ИК термограмма (а) и таймограмма (б) дефектов в пластике (1989 г., эксперименты в Университете Уэйна, США)**

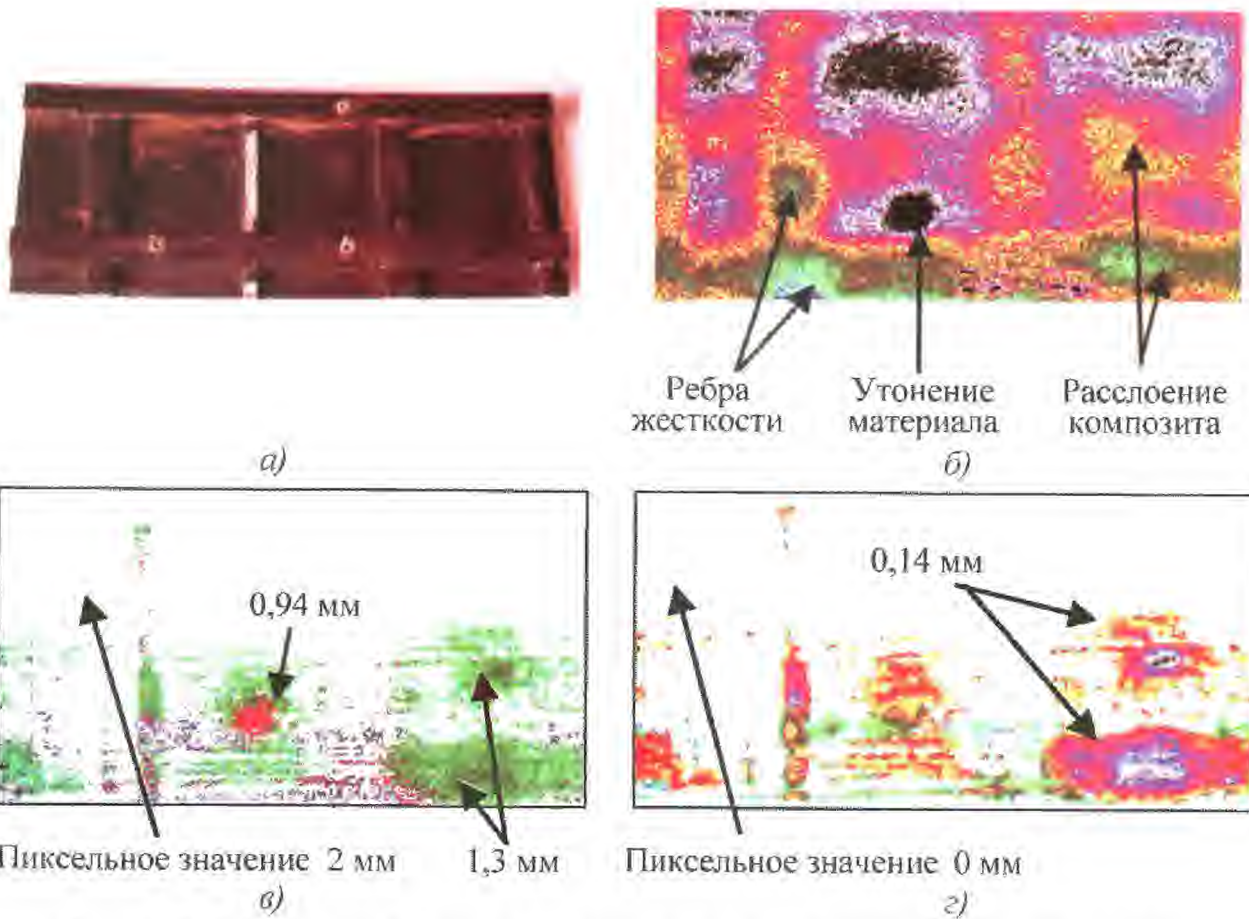


Рис. 6.17. Тепловая дефектометрия углепластиковой панели толщиной 2 мм:  
*а* – внешний вид изделия; *б* – оптимальная термограмма; *в* – глубинограмма; *г* – толщинограмма

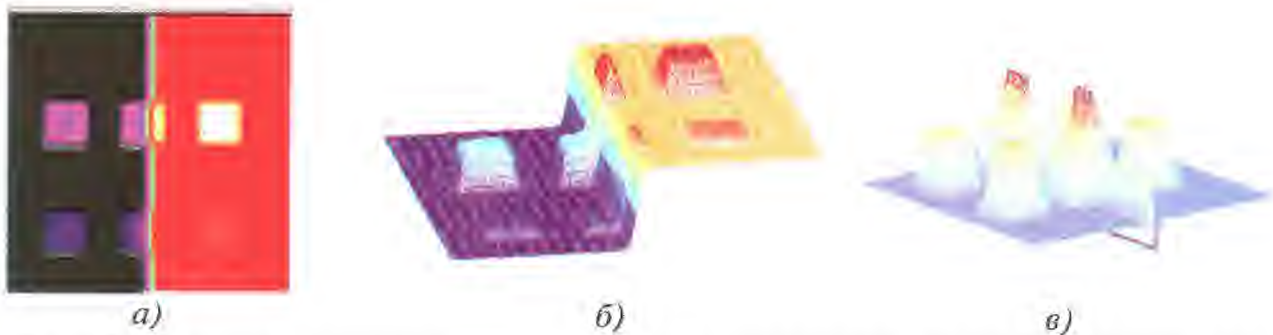


Рис. 6.22. Логарифмическая аппроксимация (ЛА) искусственной последовательности (нагрев иконы на дереве толщиной 20 мм, содержащей 6 скрытых дефектов, в течение 5 с):  
*а* – исходная термограмма в оптимальный момент наблюдения (дефекты верхнего ряда расположены на глубине 1 мм, нижнего ряда – на глубине 2 мм); *б* – изображение  $A_0$  (полином 3-й степени); *в* – изображение  $A_1$  (полином 3-й степени)

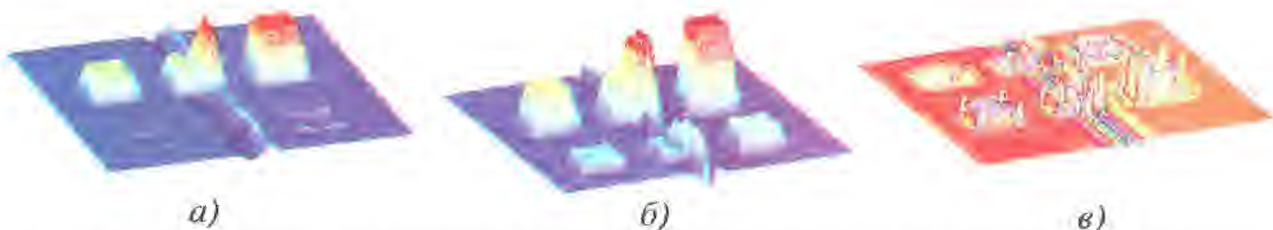
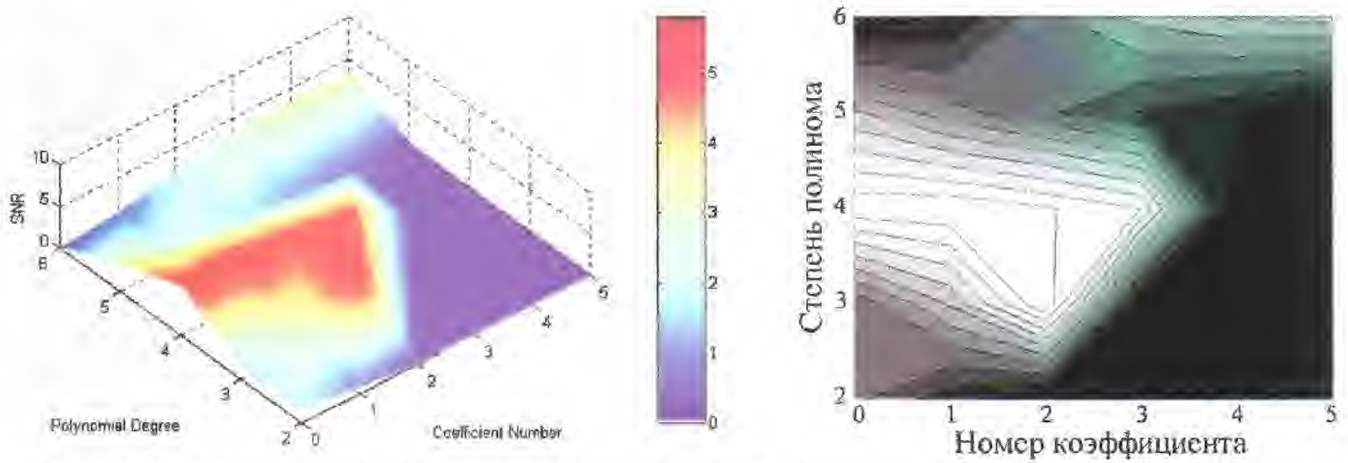
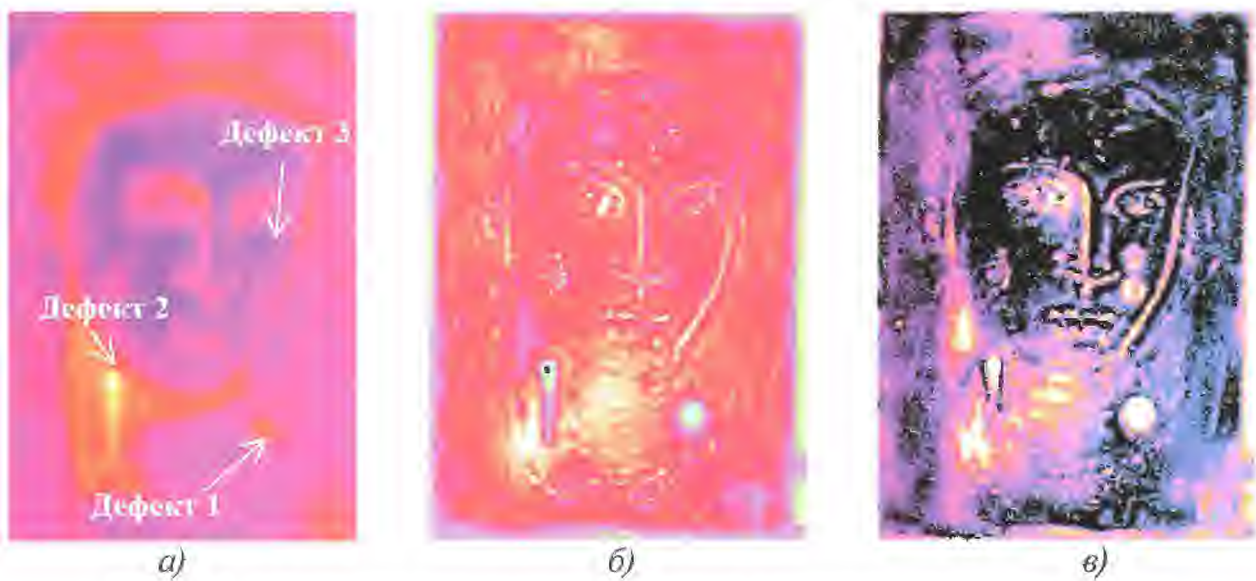


Рис. 6.23. Применение алгоритма КАА для данных рис. 6.22 (полиномы 3-й степени):  
*а* – изображение  $A_0$ ; *б* – изображение коэффициента  $A_2$ ; *в* – изображение коэффициента  $A_6$

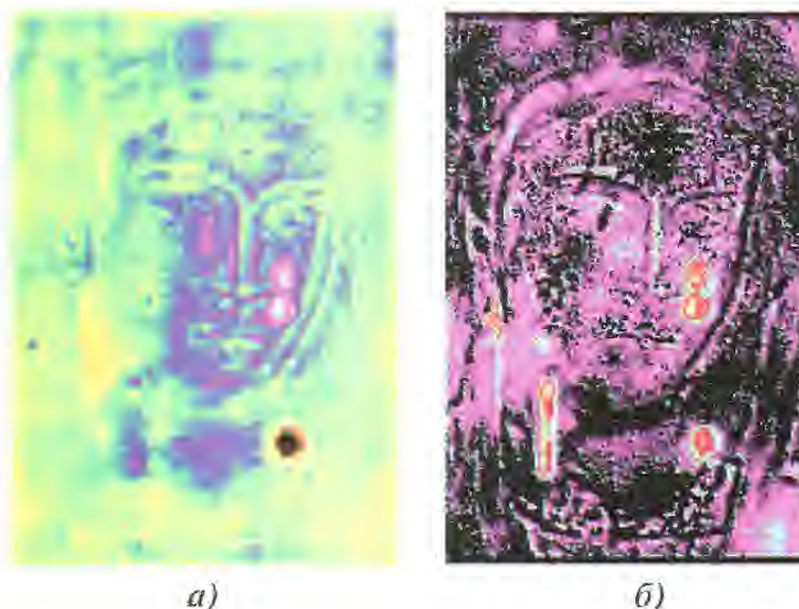


**Рис. 6.24.** Зависимость отношения сигнал/шум  $S$  от номера коэффициента и степени полинома при использовании алгоритма КАА применительно к ТК иконы на дереве, результаты которого показаны на рис. 6.25 (трехмерное и контурное представление)



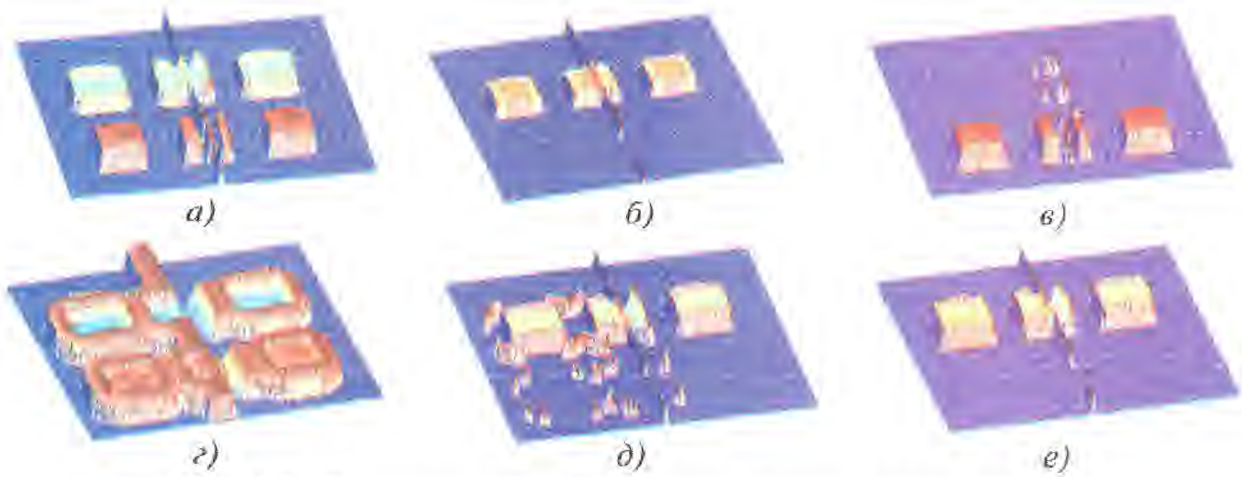
**Рис. 6.25.** Обработка результатов теплового контроля иконы на дереве с использованием полиномиальной аппроксимации:

$a$  – исходная термограмма в оптимальный момент наблюдения 2,5 с после нагрева в течение 5 с ( $S = 1,3$  для Дефекта 1);  $b$  – изображение коэффициента  $A_2$  image (КАА, полином 2-й степени,  $S = 5,8$  для Дефекта 1),  $c$  – изображение критерия  $\chi^2$  (КАА,  $S = 9,9$  для Дефекта 1),



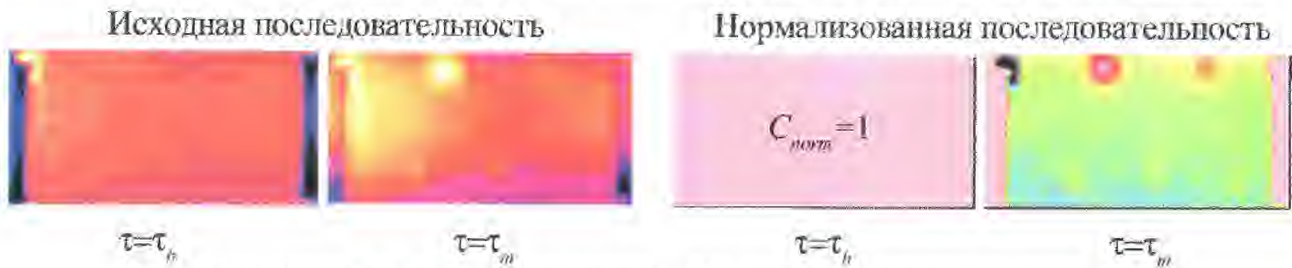
**Рис. 6.26.** Иллюстрация к данным табл. 6.3:

$a$  – изображение коэффициента  $A_3$  image (ЛА, полином 4-й степени,  $S = 0,8$ );  $b$  – максиграмма ( $S = 4,4$ )

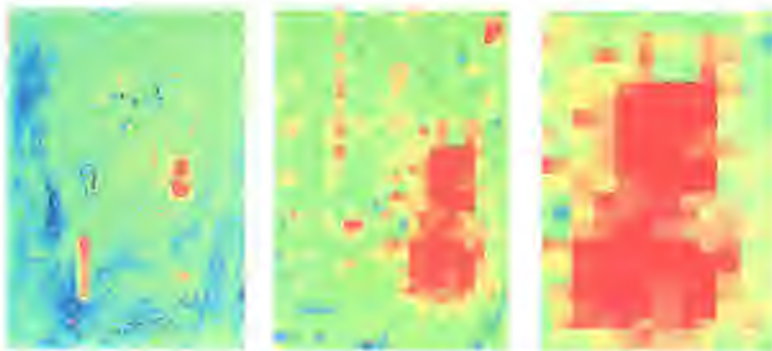


**Рис. 6.28. Тепловая томография при анализе искусственной последовательности рис. 6.22, имитирующей ТК иконы на дереве:**

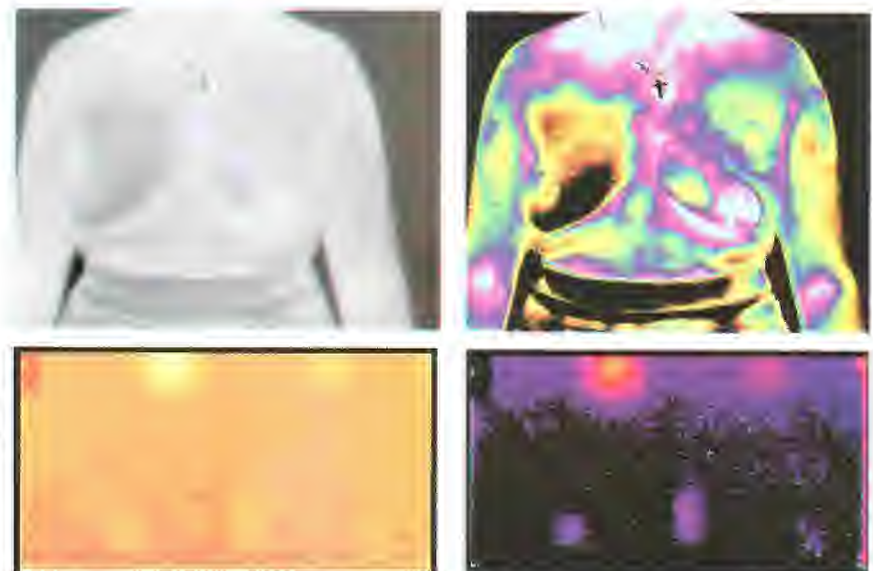
- a* – томография с использованием алгоритма  $T^{(6)} - T^{(2)}$  (выбранный слой включает все дефекты);
- б* – то же, что *a*) (выделен верхний слой);
- в* – то же, что *a*) (выделен нижний слой);
- г* – «классическая» томограмма (выбранный слой включает все дефекты; амплитудный порог отсутствует);
- д* – то же, что *г*) (выделен верхний слой; амплитудный порог отсутствует);
- е* – то же, что *г*) (выделен верхний слой; амплитудная отсечка на уровне 2%)



**Рис. 6.31. Нормализация результатов ТК углепластикового композита**



**Рис. 6.46. Увеличение (zoom) цифрового изображения показывает его пиксельную структуру**



**Рис. 6.47. Улучшение изображения путем изменения его динамического диапазона и цветовой палитры (медицинская диагностика и дефекты в углепластике)**

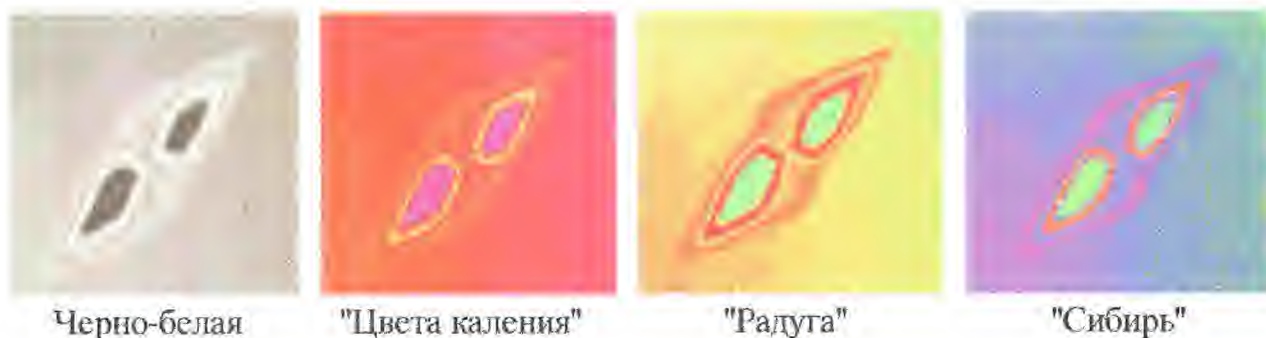


Рис. 6.48. Использование различных цветовых палитр при анализе ударного повреждения в углепластике

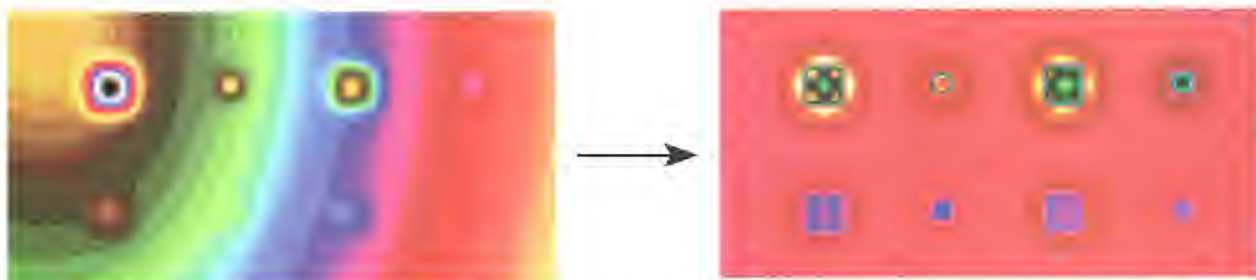


Рис. 6.49. Повышение резкости изображения дефектов путем высокочастотной цифровой фильтрации (искусственное изображение)

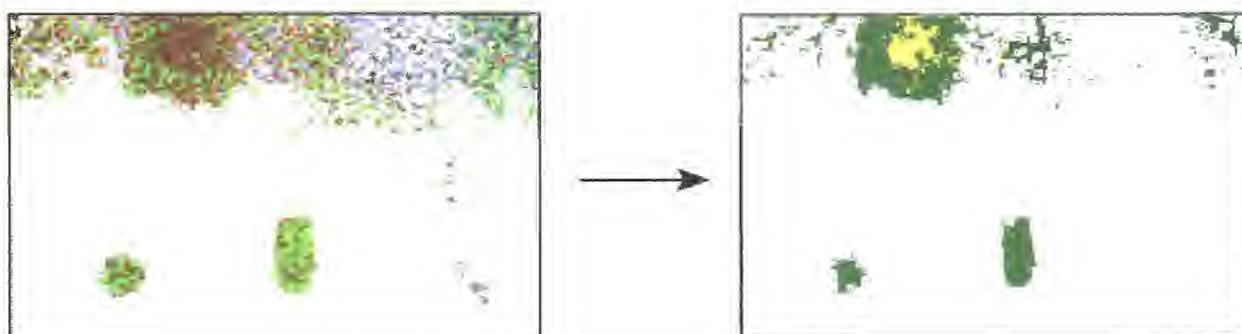


Рис. 6.51. Морфологическая фильтрация (эрозия)

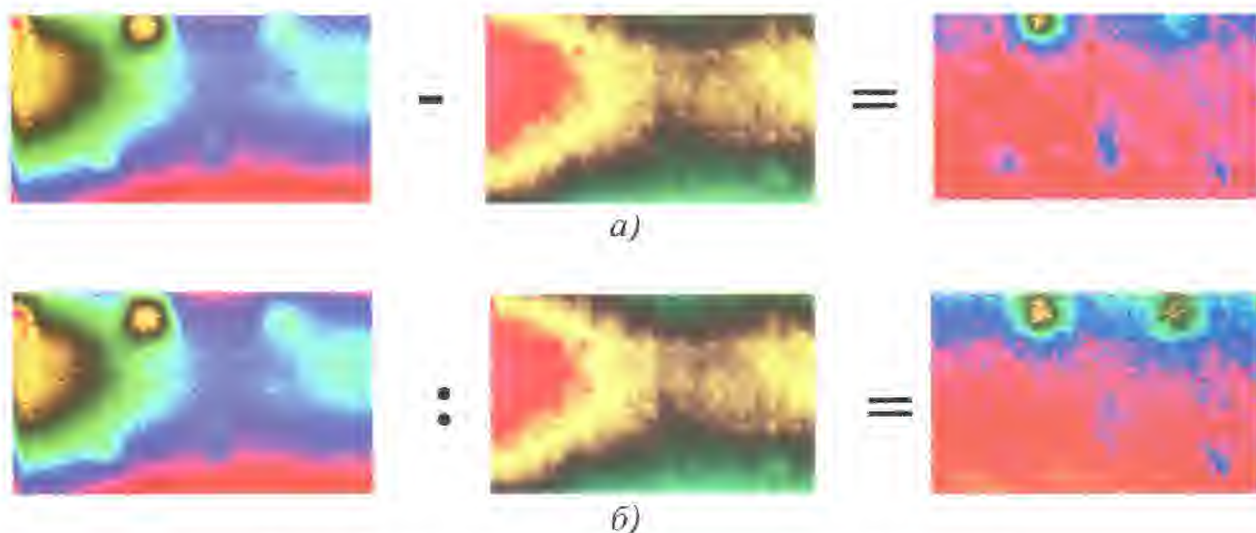
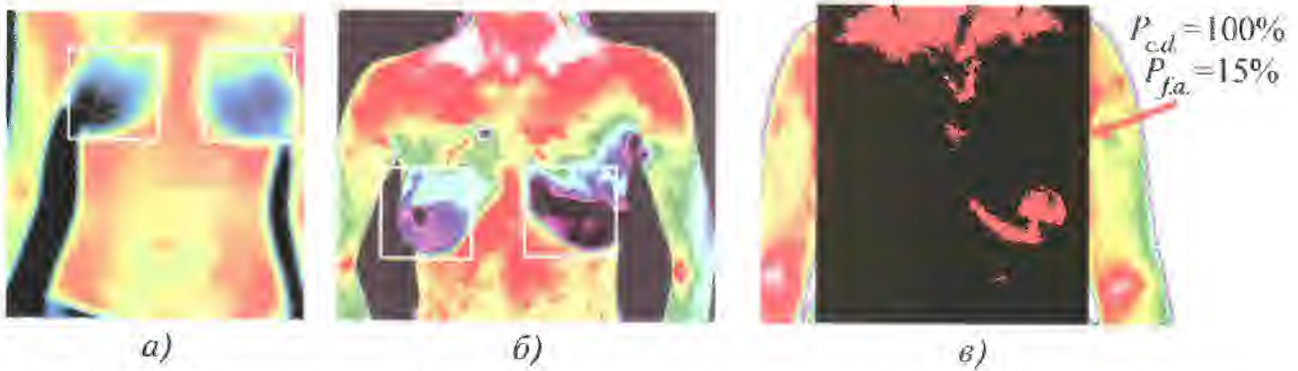


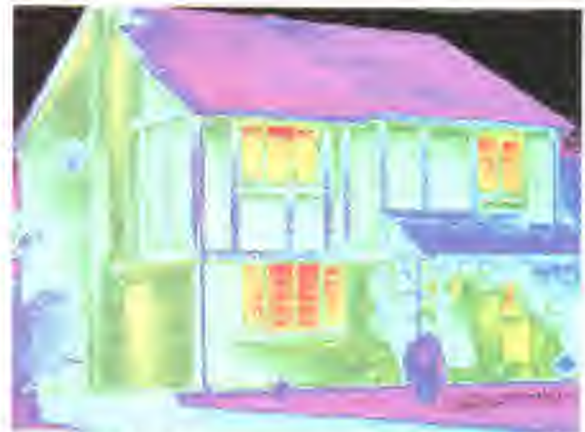
Рис. 6.52. Вычитание (а) и деление (б) изображений (фторопластовые вставки в углепластике)



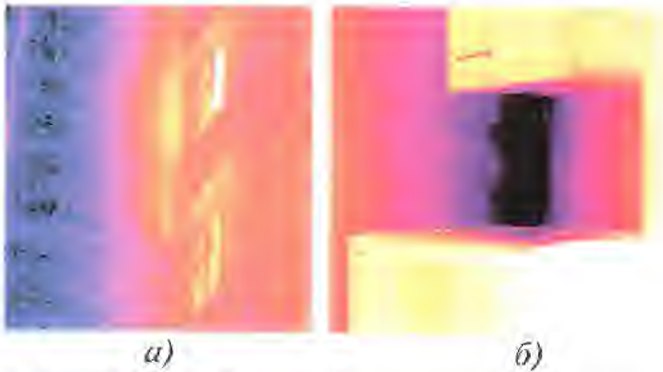
**Рис. 10.5. Статистическая обработка данных в медицине (программа ThermoStat):**  
*a* – пациент без патологии ( $S = 0,064$ ); *б* – рак левой молочной железы III-й степени ( $S = 3,45$ );  
*в* – карта «дефекта»



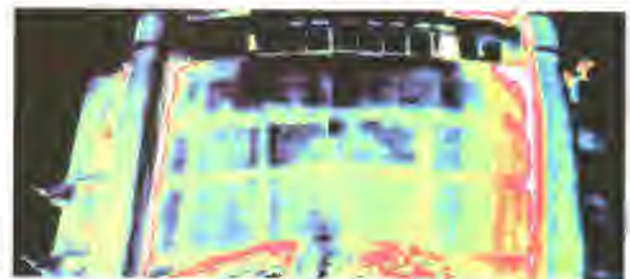
**Рис. 11.8. Пример наложения ИК термограммы на видимое изображение жилого дома**



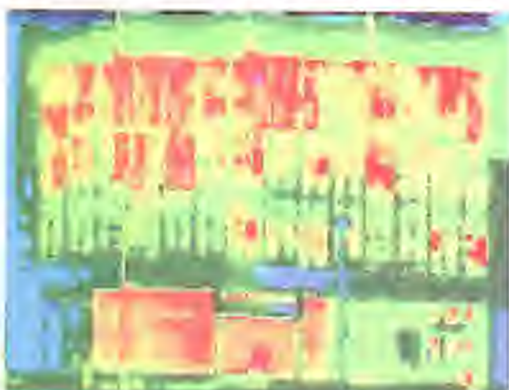
**Рис. 11.9. Индивидуальный жилой дом**



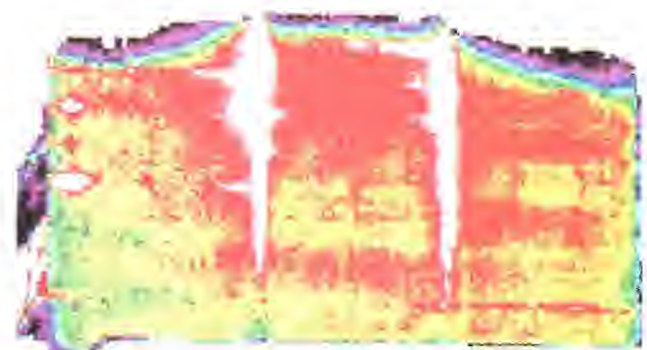
**Рис. 11.10. Дефектный вертикальный шов: температурный градиент по шву  $3^{\circ}\text{C}$  при наружной съемке (а) и  $8^{\circ}\text{C}$  при внутренней съемке (б)**



**Рис. 11.13. Отслоение декоративной штукатурки от основной стены (температурный градиент  $2^{\circ}\text{C}$ )**



**Рис. 11.14. Фасад административного здания со сплошным остеклением**



**Рис. 11.15. Торец главного корпуса тепловой станции**

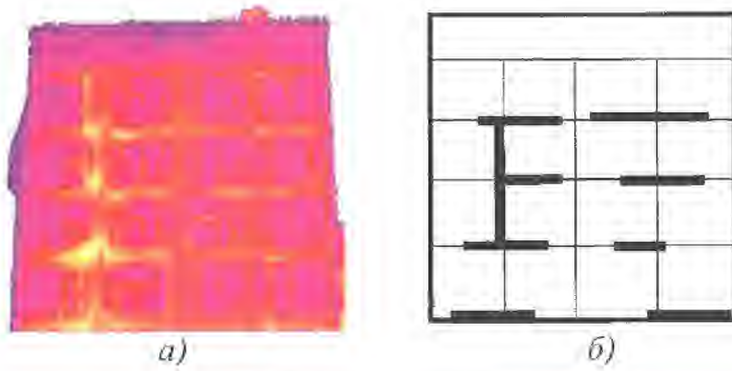


Рис. 11.16. Торец жилого панельного дома и карта дефектов

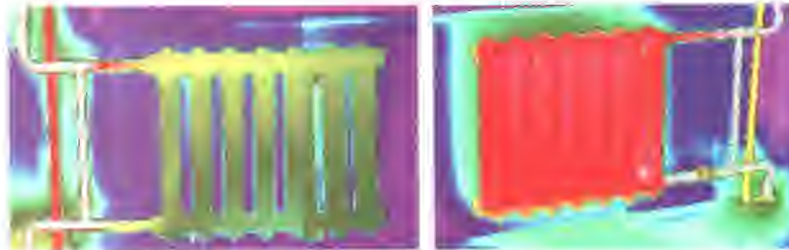


Рис. 11.17. Термограмма радиаторов отопления (температура левого радиатора +32 °С, правого +60 °С, температура «прямой» трубы +84 °С, «обратной» +60 °С)

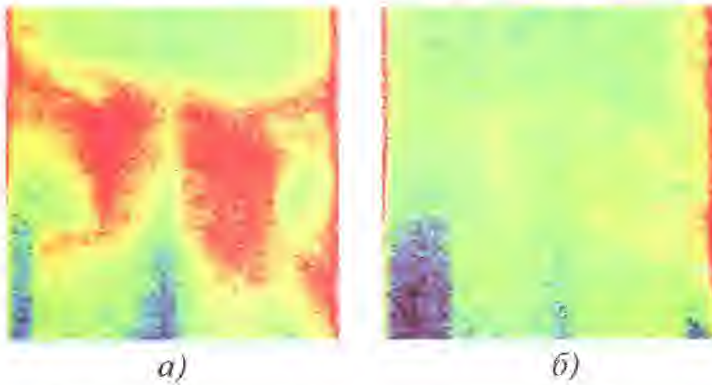


Рис. 11.20. Результаты тепловизионной съемки стыков ригелей и вертикальных колонн развалин казармы ТВВКУС после катастрофы 17 июля 1997 г. [174];

*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)

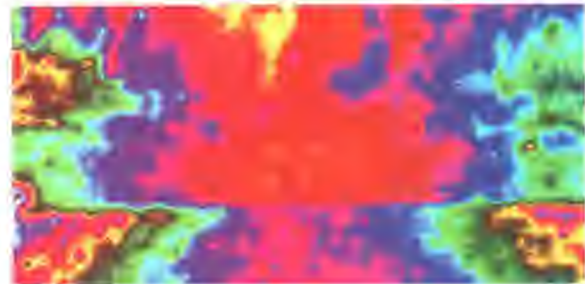


Рис. 11.24. Тепловой контроль фрески Фоголино в г. Бергамо (Италия; исходные изображения предоставлены Э. Гринцато):

*a* – схема ТК; *б* – термограмма в конце нагрева; *в* – термограмма в оптимальный момент наблюдения; *г* – томограмма слоя 8,1 - 9,3 мм



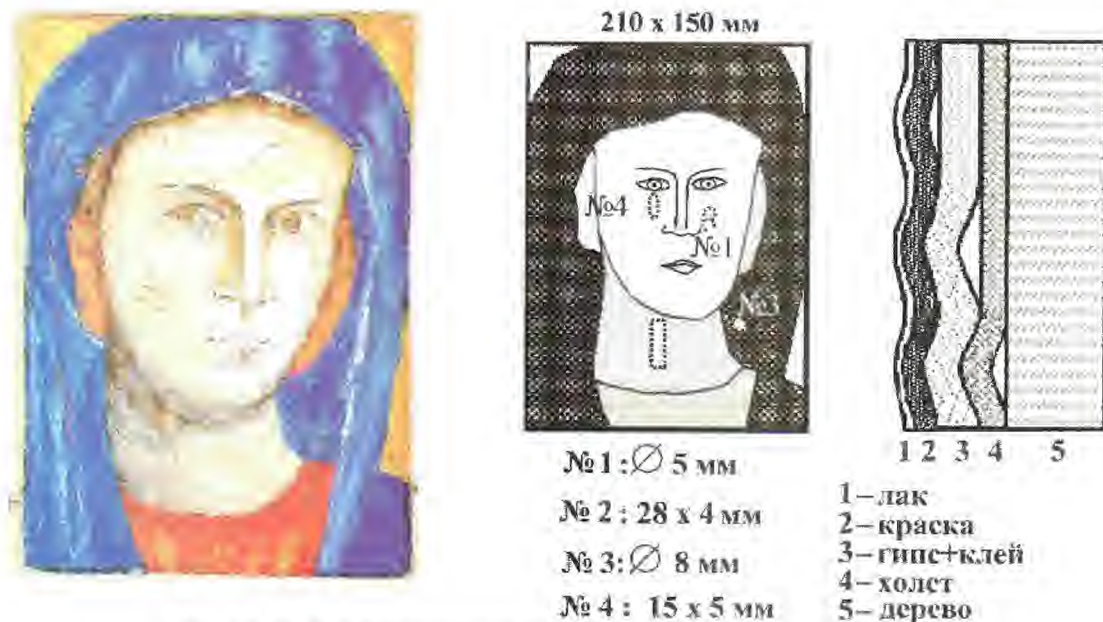


Рис. 11.25. Стандартный образец иконы на дереве [192]

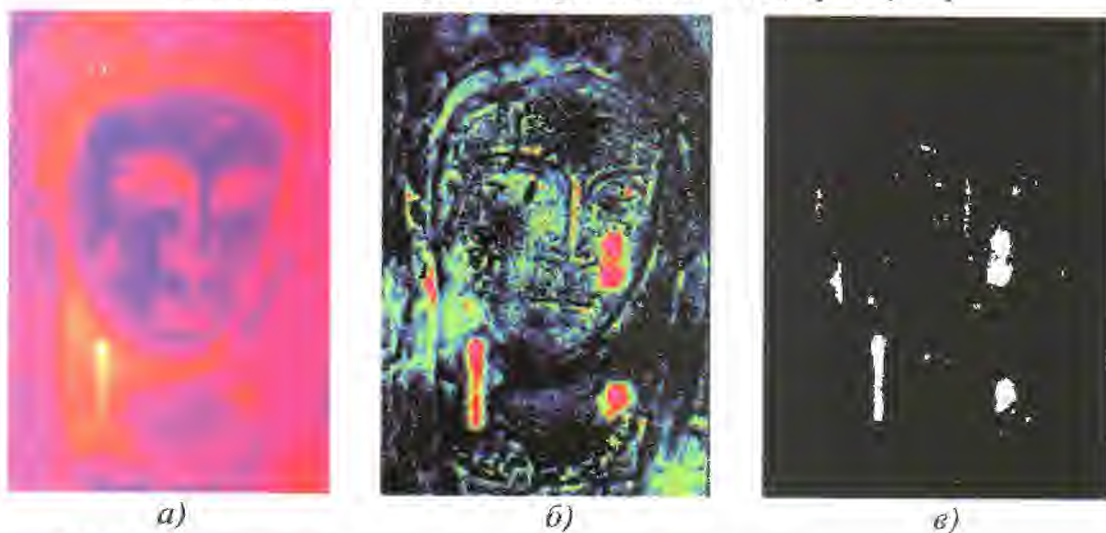


Рис. 11.26. Экспериментальные результаты ТК иконы на дереве (оптимизация по дефектам «Стержень», «Пузырьки» и «Точка»):

*a* – исходная термограмма через 2,5 с после окончания нагрева,  $S = 1,29$  (идентично рис. 6.20, *a*);

*б* – максиграмма после полиномиальной аппроксимации и нормализации,  $S = 3,51$ ;

*в* – дефектная карта,  $P_{c.d.} = 80\%$ ,  $P_{f.a.} = 3\%$ ; изображение *б*

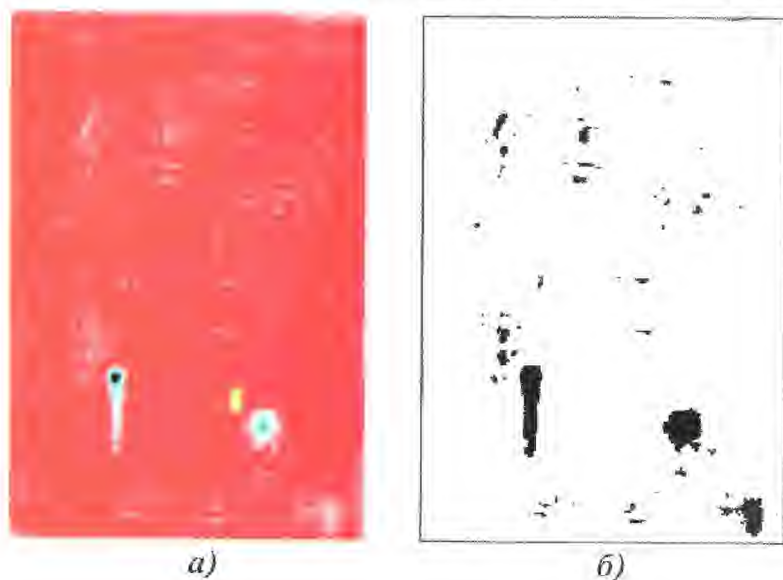
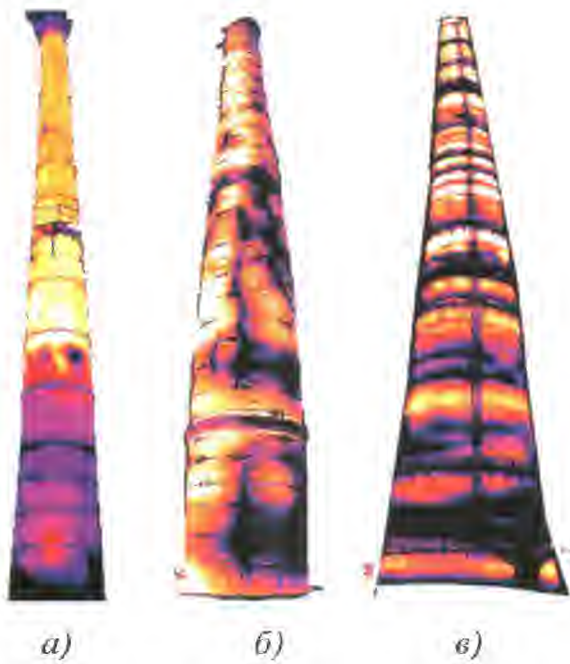


Рис. 11.27. Экспериментальные результаты ТК иконы на дереве (оптимизация по дефекту «Точка»):

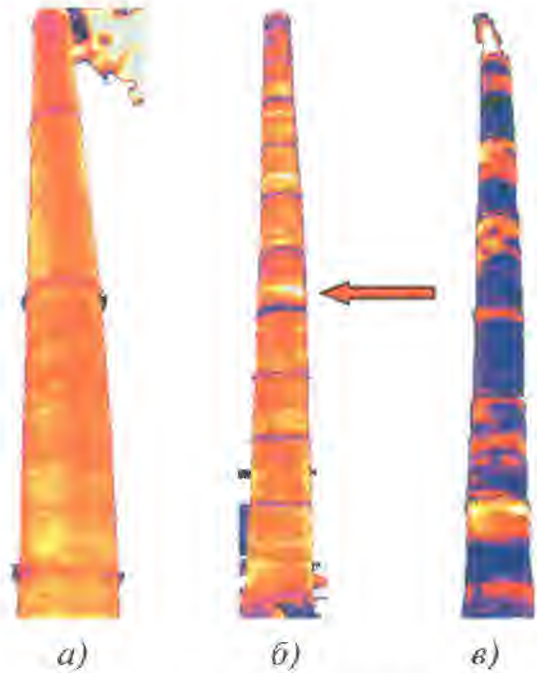
*a* – изображение коэффициента (три члена полинома),  $S = 5,79$ ;

*б* – дефектная карта по изображению *a*,  $P_{c.d.} = 100\%$ ,  $P_{f.a.} = 3\%$



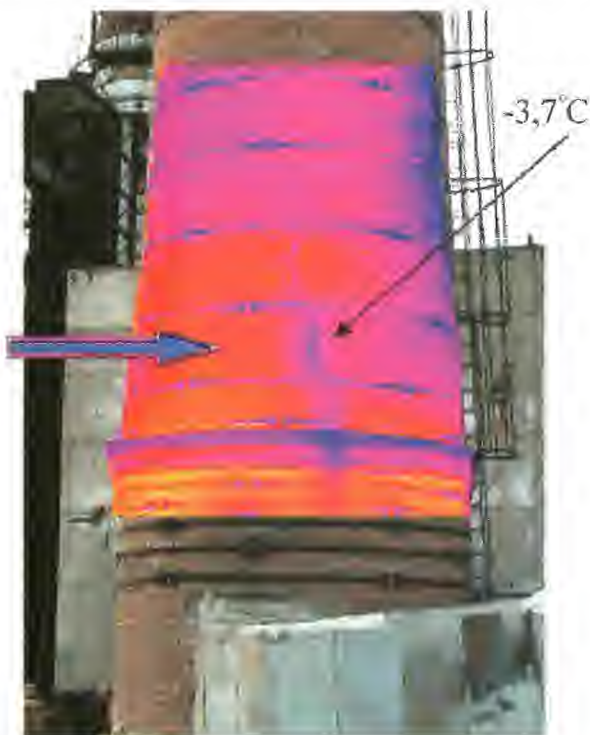
**Рис. 11.30. Панорамные термограммы ДТ различной конструкции:**

*а* – 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)

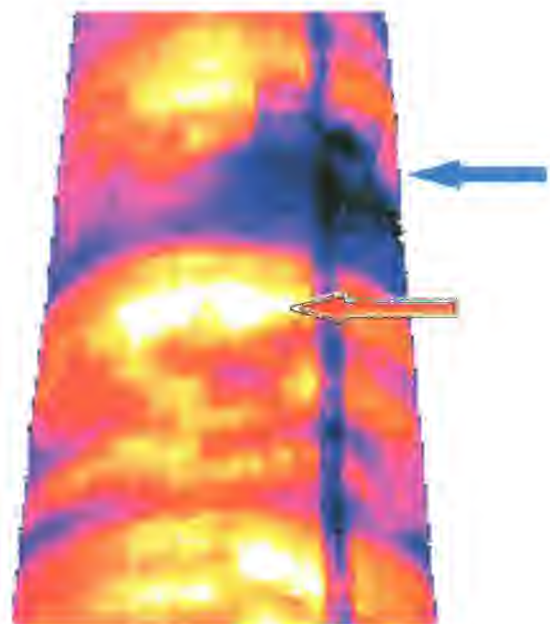


**Рис. 11.31. Сравнительные термограммы железобетонных ДТ различного качества:**

*а* – условно «хорошее» качество; *б* – «среднее»; *в* – «низкое»



**Рис. 11.32. Термограмма отремонтированной вертикальной трещины в кирпичной трубе обнаружила сохранение присоса атмосферного воздуха с градиентом до -2,7 °С**



**Рис. 11.33. Термограмма зон пониженной теплозащиты (температурный градиент до +4 °С) и повышенной пористости бетона (температурный градиент до -5 °С) железобетонной ДТ**



Рис. 11.34. Термограмма зоны примыкания кирпичного газохода к железобетонной ДТ (градиент температуры в зоне снижения теплозащиты +5 °С, в зоне присоса атмосферного воздуха -6 °С)

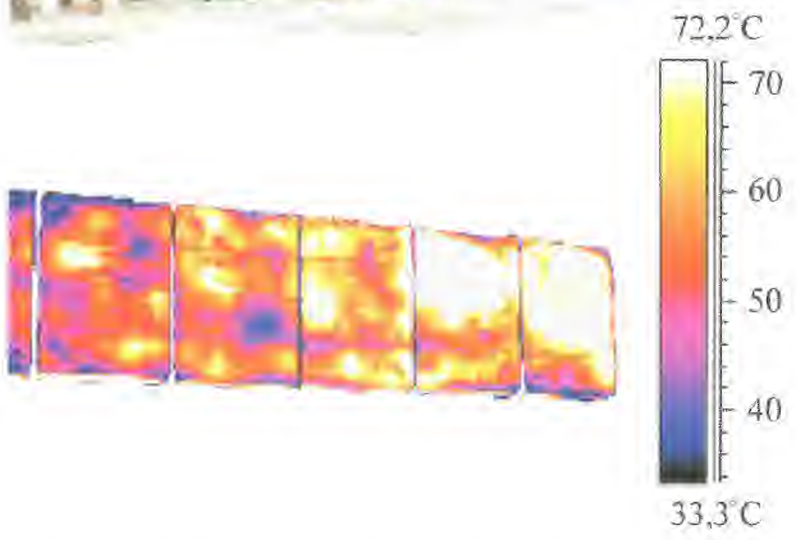


Рис. 11.35. Термограмма зоны износа внутренней футеровки металлического газохода

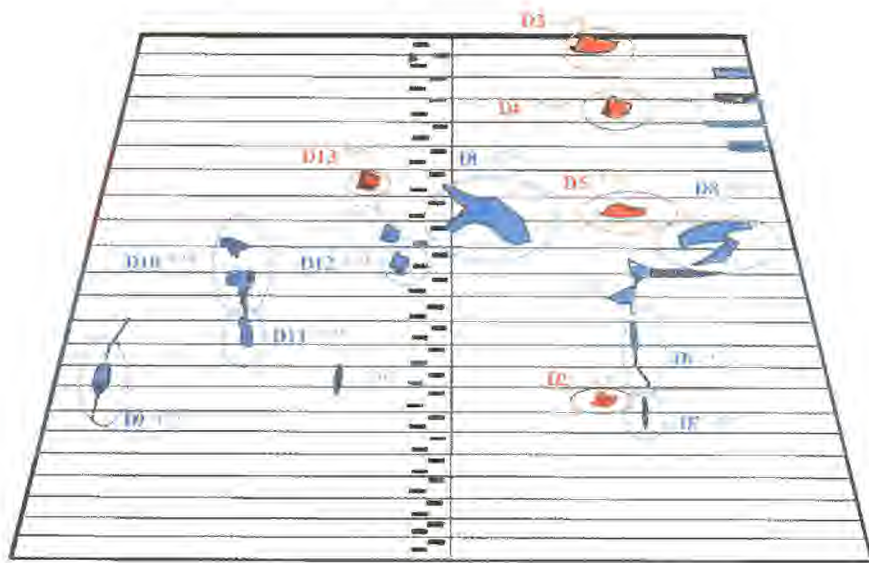


Рис. 11.36. Пример карты дефектов железобетонной ДТ, выявленных методом ИК термографии (зоны красного цвета соответствуют пониженной теплозащите, зоны синего цвета – присосам атмосферного воздуха; дефекты, отнесенные оператором к существенным, выделены овалом)

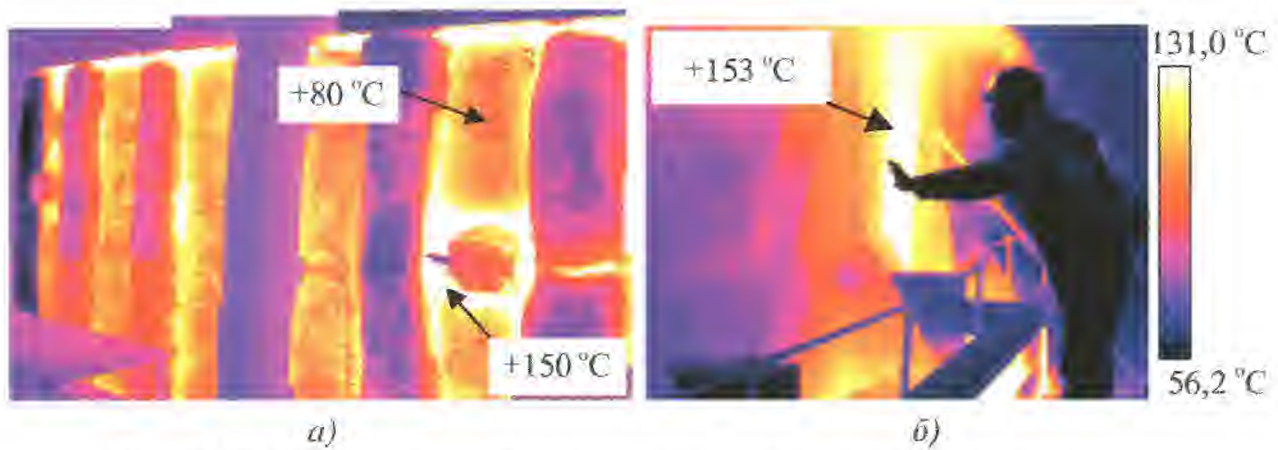


Рис. 11.38. Обследование обмуровки котла на тепловой электростанции:  
*а* – фронтальная поверхность; *б* – зона «рассечки»

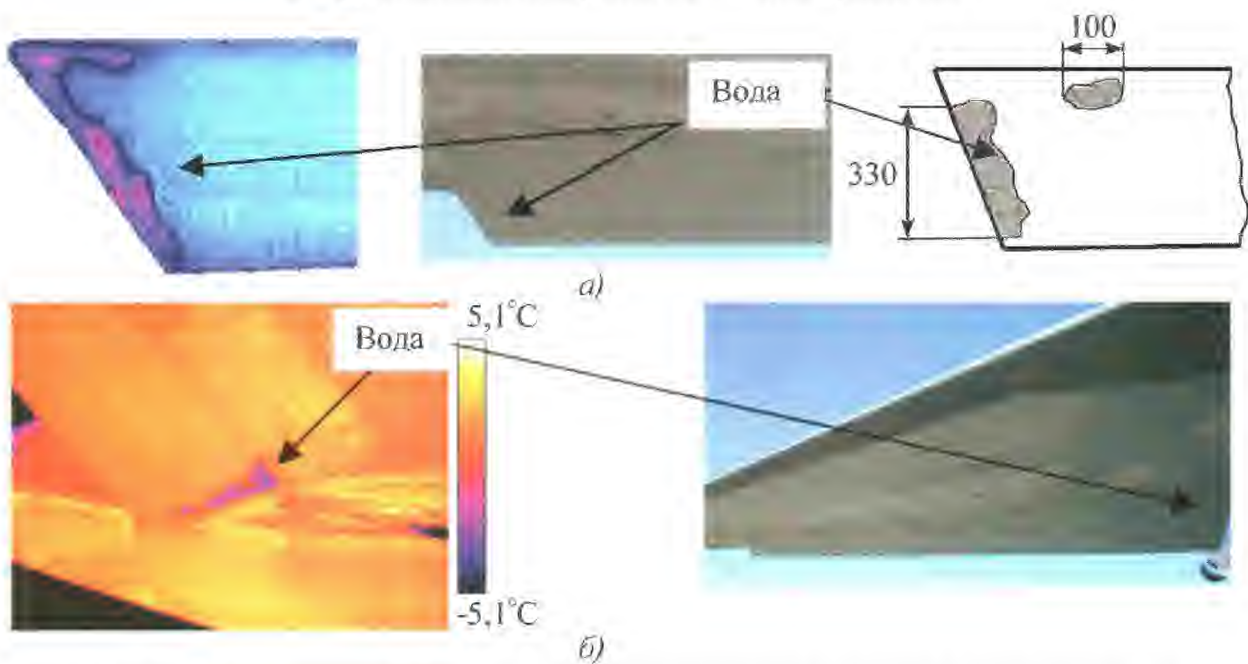
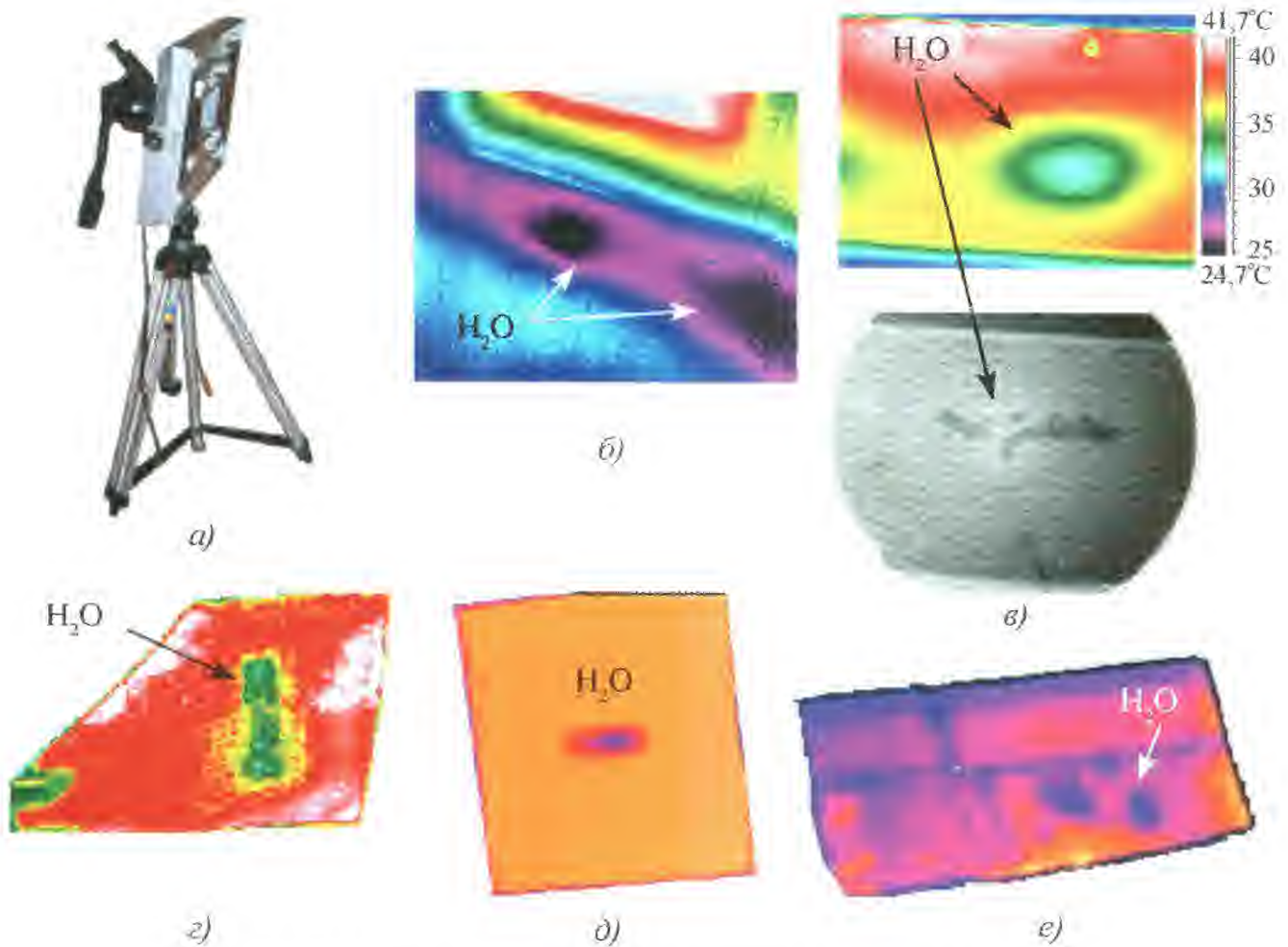


Рис. 11.44. Пассивный ТК воды в композиционных сотовых конструкциях самолета ТУ-204 (через 1 ч после посадки);  
*а* – элерон (справа карта дефектов, полученная УЗ методом за 2 месяца до тепловизионной съемки); *б* – руль высоты

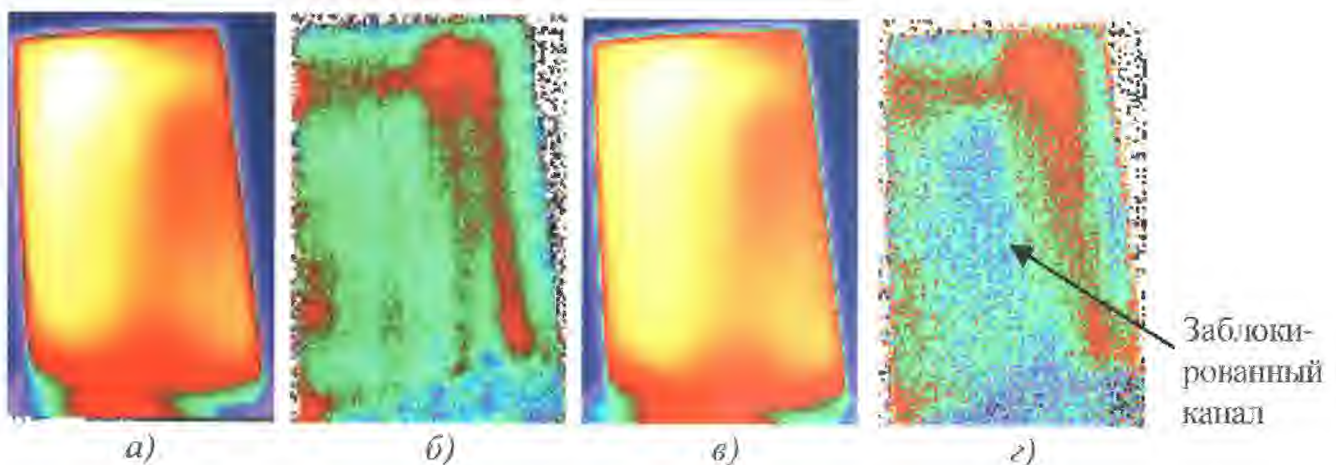


Рис. 11.45. Пассивный ТК воды в алюминиевых сотах воздухозаборников двигателей самолета ИЛ-96 (через 1 ч после посадки)



**Рис. 11.46. Активный ТК воды в авиационных сотовых панелях:**

- a* – оптический нагреватель, совмещенный с тепловизором; *б* – термограмма алюминиевой сотовой панели с двумя зонами воды; *в* – термограмма и рентгенограмма алюминиевой панели;
- г* – термограмма панели «стеклопластиковая обшивка – алюминиевые соты»;
- д* – термограмма панели «углепластиковая обшивка – бумажные соты»;
- е* – термограмма стальной сотовой панели



**Рис. 11.48. ТК турбинных лопаток в процессе нагрева горячим воздухом:**

- a* – термограмма бездефектной лопатки в оптимальный момент времени; *б* – фазограмма бездефектной лопатки; *в* – термограмма дефектной лопатки в оптимальный момент времени;
- г* – фазограмма дефектной лопатки

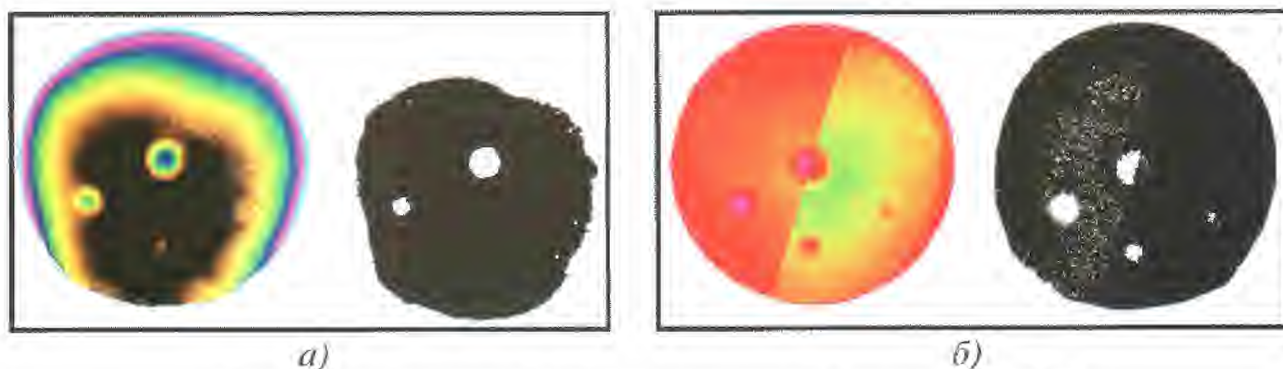


Рис. 11.51. Активный ТК стандартного образца рис. 11.45 (с разрешения фирмы CESI, Италия):

*a* – исходное изображение в оптимальный момент времени и карта дефектов ( $S = 0,85$ ;  $P_{c,d} = 78\%$ ;  $P_{f,a} = 30\%$ ); *b* – фазограмма и карта дефектов ( $S = 2,59$ ;  $P_{c,d} = 63\%$ ;  $P_{f,a} = 5\%$ )



Рис. 11.52. Тепловой контроль покрытия толщиной 150 мкм: *a* – исходное изображение; *b* – карта дефектов ( $P_{f,a} = 5\%$ ,  $P_{c,d} = 96\%$ )

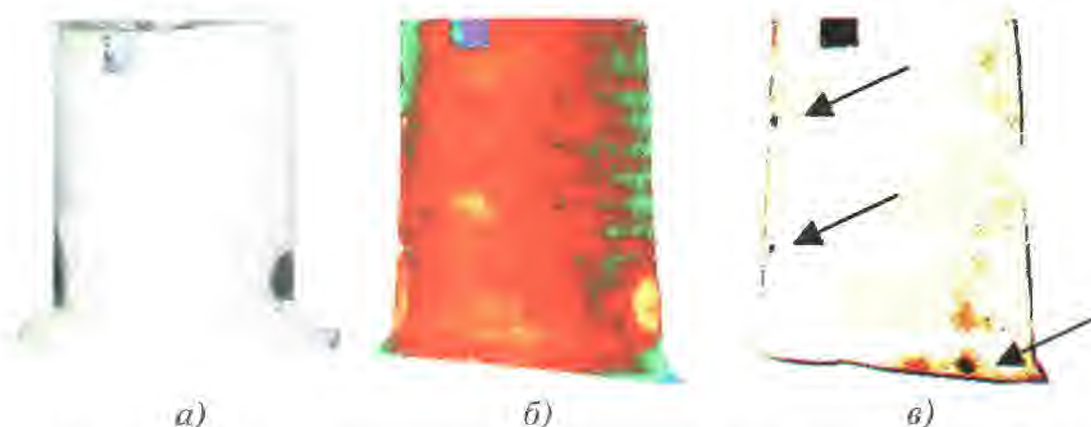


Рис. 11.53. ТК турбинной лопатки (с разрешения фирмы CESI, Италия):

*a* – фотография турбинной лопатки; *b* – исходное изображение в оптимальный момент времени; *в* – «коррелограмма»

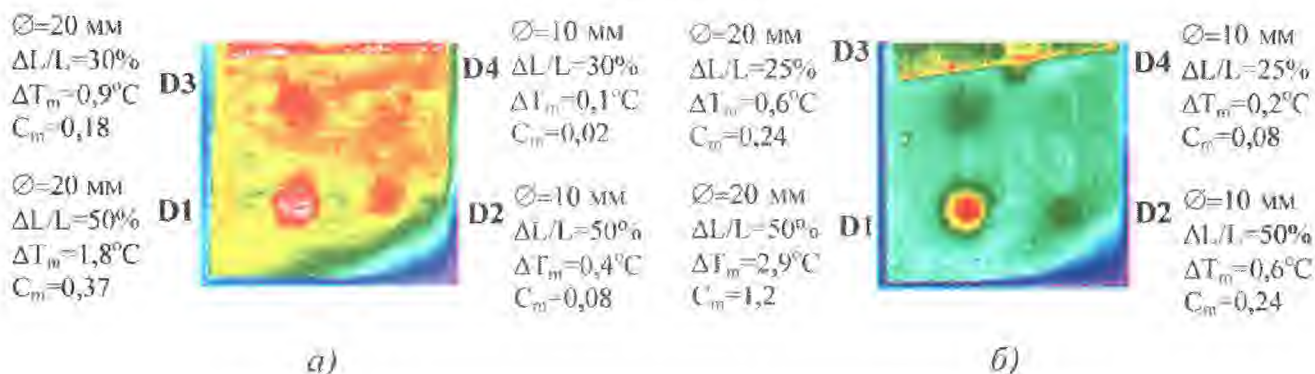
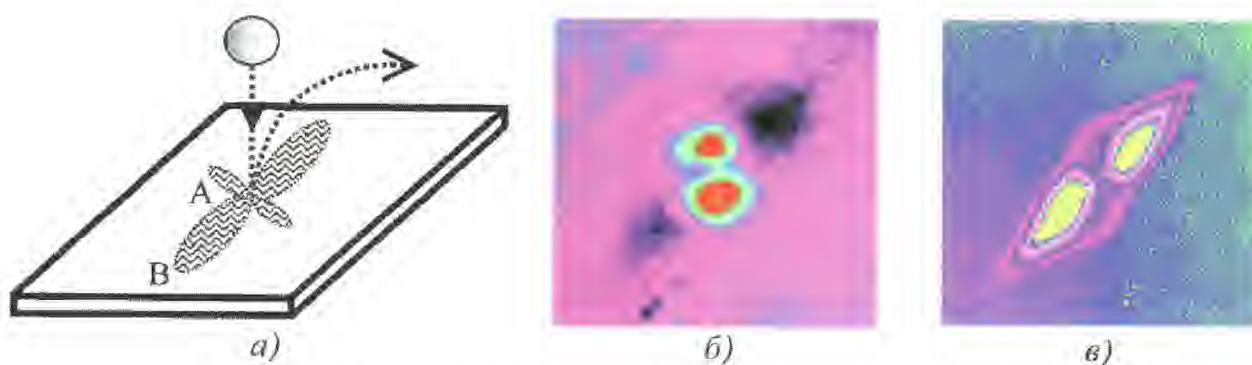


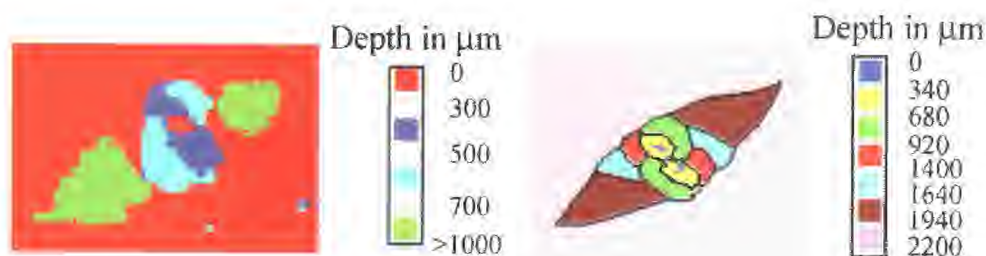
Рис. 11.55. ТК коррозионного износа в алюминиевых листах:

*a* – толщина алюминия 1 мм (термограмма при 150 мс); *b* – толщина алюминия 2 мм (термограмма при 300 мс)

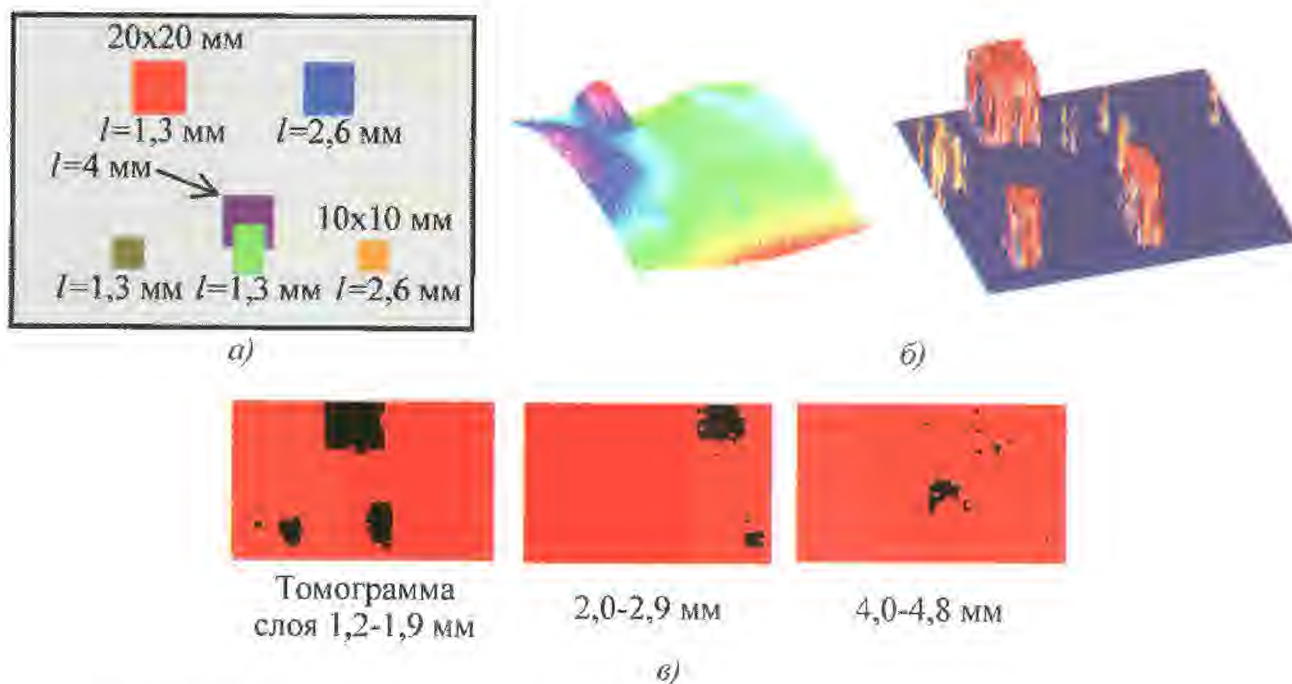


**Рис. 11.57. Ударное повреждение углепластикового композита:**

*a* – производство эталонного ударного повреждения; *б* – термограмма передней поверхности при импульсном возбуждении; *в* – термограмма задней поверхности при импульсном возбуждении (метод раннего обнаружения)



**Рис. 11.58. Глубинограмма ударного повреждения в углепластике, полученная методом тепловой томографии (слева) и УЗ С-сканирования (справа)**



**Рис. 11.59. Тепловая томография образца из углепластика толщиной 5 мм с искусственными дефектами в виде фторопластовых вставок (*l* – глубина залегания дефектов; программа ThermoFit Pro):**

*a* – схема расположения дефектов; *б* – исходное изображение (слева) и томограмма слоя 1,2...1,9 мм (справа); *в* – тепловые томограммы

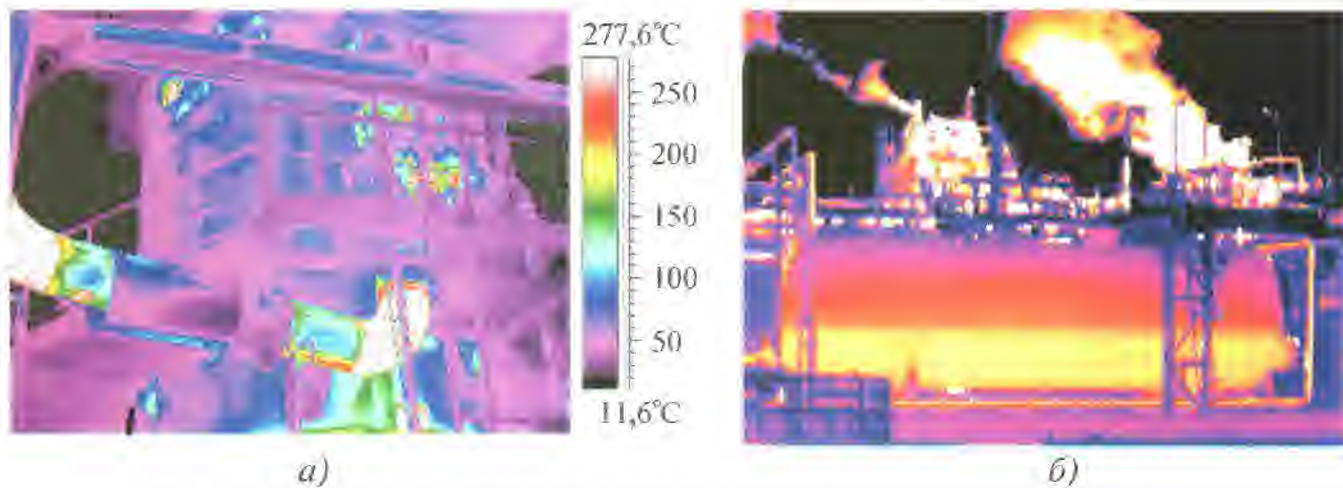


Рис. 11.63. Температурное поле химического реактора (а) и резервуара (б)

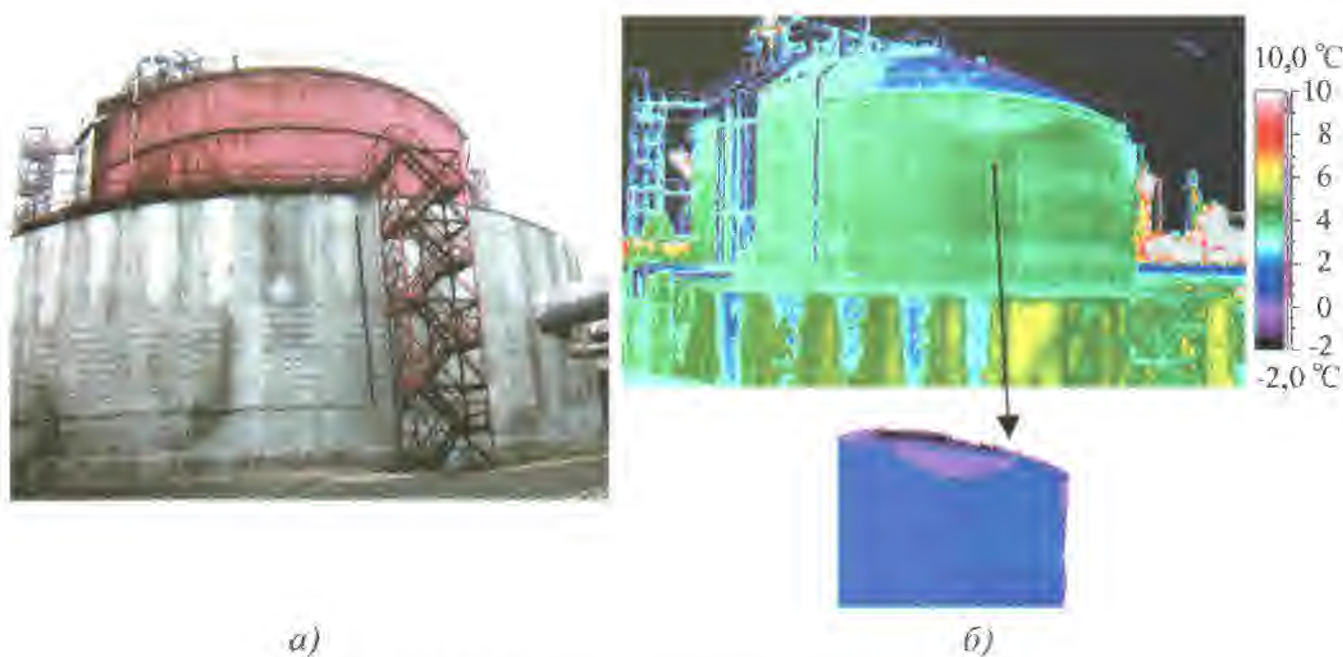


Рис. 11.64. Контроль качества теплоизоляции изотермического резервуара с жидким аммиаком:

а – внешний вид резервуара; б – термограмма боковой поверхности (внизу – отретушированная термограмма, температурный сигнал 0,3 °С); оседание перлитового песка верхней части



Рис. 11.65. ИК термограмма и фотография теплообменника со значительными отложениями на внутренней стенке (показаны стрелками)



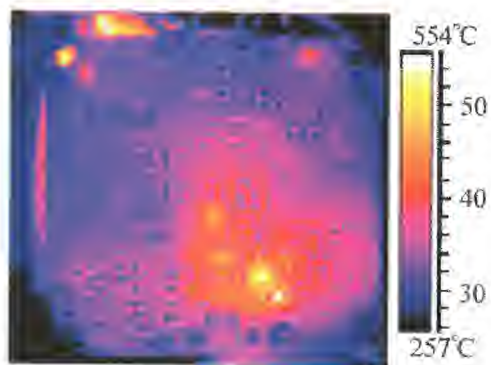


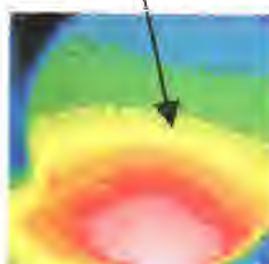
Рис. 11.66. Тепловое поле печатной платы с перегретыми элементами (с разрешения фирмы FLIR Systems)



а)

Сталь 15 мм

Коррозия 30%



б)

Рис. 11.75. 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)

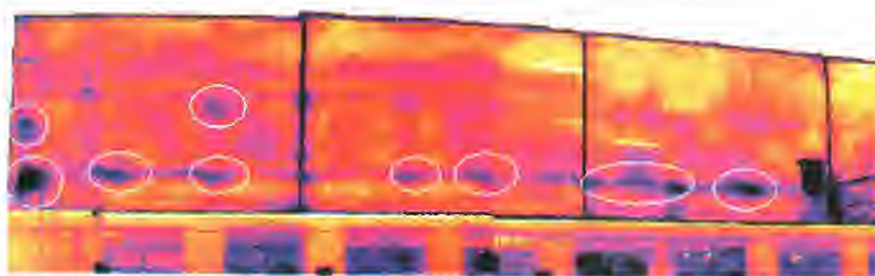
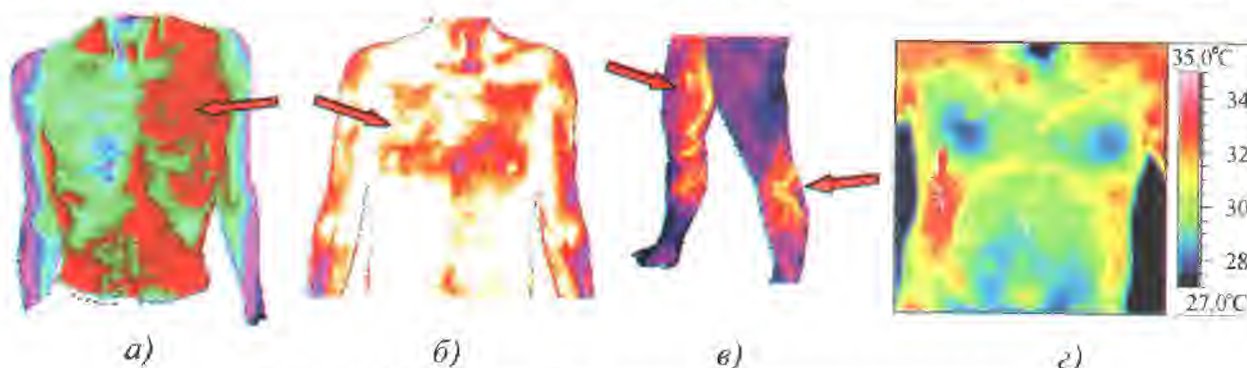


Рис. 11.76. Термограмма стены холодильного корпуса (дефектные участки отмечены овалами)



а)

б)

в)

г)

Рис. 11.80. Термографическое проявление патологий: а – рак левого легкого; б – лимфогранулематоз лимфоузлов средостения; в – варикозное расширение вен на ранней стадии; г – рак печени

силами исследовательских организаций строительного профиля (ВНИИ строительной физики, НИИ Мосстроя и др.) выполнялись исследования по теплопередаче в строительных конструкциях и их тепловизионной диагностике. Опыт этих исследований был обобщен в монографии В.А. Дроздова и В.И. Сухарева, а также в ряде недавних публикаций [11, 167, 172, 173]. Тем не менее, в силу невысокой отпускной стоимости энергии и общей низкой культуры строительства, экономическая мотивация внедрения ИК термографии в отечественную строительную практику 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 теплофизике явилось введение в 1998 г. новой редакции строительных норм и правил – СНиП II-3-79\* "Строительная теплотехника" (с 2003 г. СНиП 23-02-03 "Тепловая защита зданий"), согласно которым сопротивление теплопередаче строительных сооружений должно быть увеличено приблизительно в три раза. Невозможность обеспечить нормируемые показатели теплозащиты с использованием традиционных строительных материалов обусловила разработку новых материалов и конструкций, в связи с чем остро встал вопрос экспрессной инструментальной диагностики показателей теплозащиты. В последние годы администрации ряда российских городов, взаимодействуя с органами архитектурно-строительного надзора (Госархстройнадзора), активно интересуются тепловидением как инструментом решения задач, стоящих перед жилищно-коммунальным хозяйством: реновация жилья, повышение качества строительства, оптимизация расходов на отопление и т.п. С 1998 г. в г. Северске Томской области постановлением главы администрации введена обя-

зательная 100 %-ная ИК термографическая диагностика сдаваемых в эксплуатацию жилых зданий. Пакет нормативных документов по энергосбережению в строительстве, способствующих внедрению тепловидения, принят в г. Москве и Московской области. С 2009 г. в России действуют изменения в Градостроительном кодексе, согласно которым лицензии на виды строительной деятельности заменены свидетельствами о допуске, которые должны быть получены так называемыми *саморегулируемыми организациями (СРО)*.

Согласно методике, утвержденной Госстандартом РФ (Ростехрегулирования) в 2000 г. [176], 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 разрушений строительных сооружений путем обнаружения "тепловых предвестников" катастроф. Периодически случающиеся как в России, так и за рубежом непредсказуемые разрушения зданий, в том числе и с человеческими жертвами, делают эту область применения социально значимой. Механизм возникновения и развития тепловых предвестников катастроф, которыми служат зоны аномального повышения или понижения температуры, слабо изучен в научном плане. Выводы о температурной амплитуде возможных предвестников разрушения зданий также расходятся. Так, по мнению специалистов ЦНИИ строительства Минобороны РФ, даже в случае полного разрушения железобетонных конструкций выделяемой внутренней энергии недостаточно для уверенной регистрации сопутствующего

повышения температуры с помощью тепловизоров. В то же время лабораторные исследования, выполненные М. Люонгом (Франция), показали, что при циклическом нагружении бетона температурные градиенты могут достигать нескольких градусов [178]. Пример феноменологического подхода к экспериментальному анализу катастрофы, произошедшей в 1997 г. в г. Томске, описан в п. 11.2.8 [174]. В целом, возможность прогнозировать разрушение зданий с работающей системой отопления представляется сомнительной ввиду трудностей идентификации предвестников катастроф на фоне многочисленных тепловых шумов.

### 11.2.2. Определение теплотерь

Нормативными характеристиками жилых зданий являются: расчетная температура наружного (своя для каждой географической местности) и внутреннего

воздуха (20...21 °С), его относительная влажность (50...60 %), перепад между температурой воздуха в помещении и на внутренней поверхности наружной стены (4...6 °С), температура на внутренней поверхности стены, которая должна превышать температуру точки росы. Главной эксплуатационной характеристикой зданий являются удельные энергозатраты на 1 м<sup>2</sup> отапливаемой площади за один отопительный период в годовом цикле, выраженные в кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год).

На рис. 11.1 представлена схема формирования теплового баланса здания в отопительный период годового цикла [175]. 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

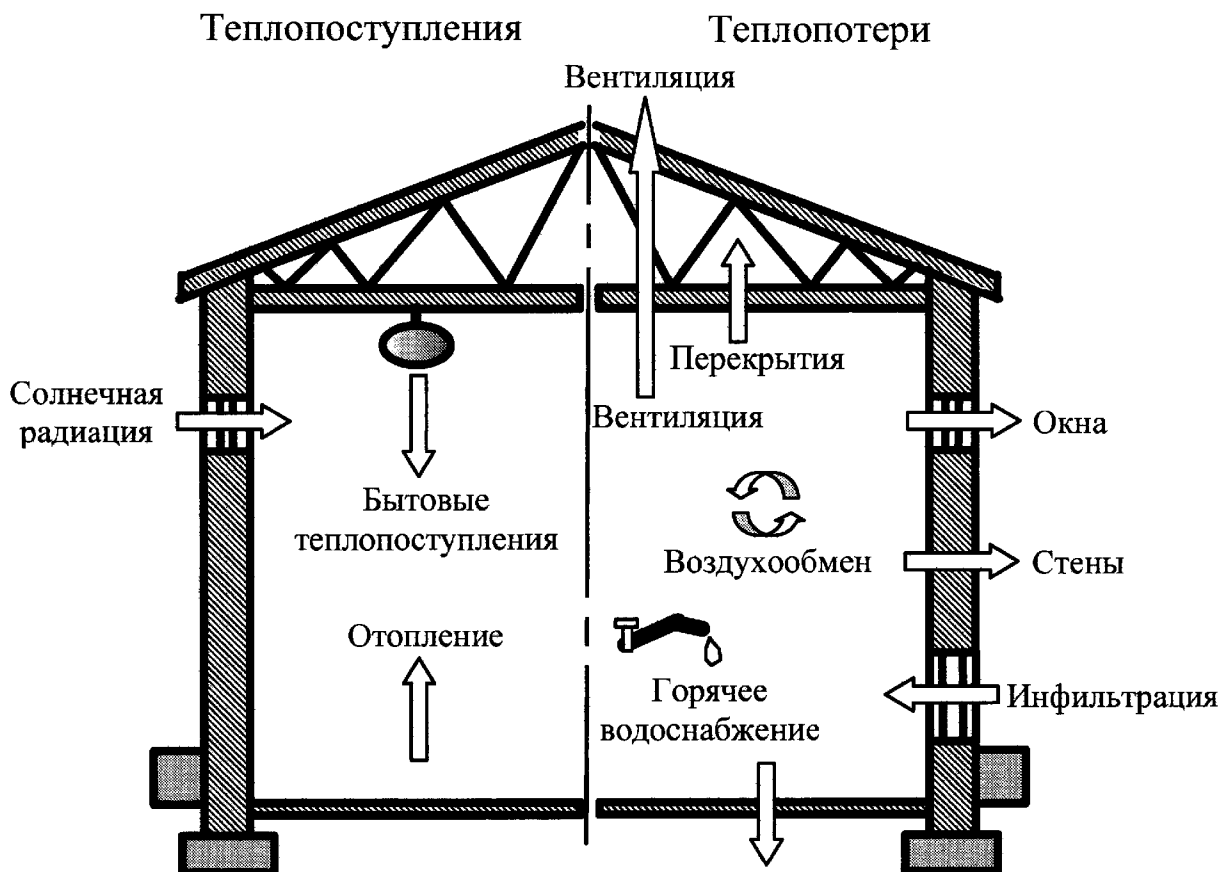


Рис. 11.1. Тепловой баланс здания  
(адаптировано из [175])

нагревание в объеме помещения инфильтрующегося холодного воздуха; 3) энергозатратами на горячее водоснабжение. Наибольшая доля теплотеря (до 50 %) приходится на инфильтрацию холодного воздуха, основная часть которого поступает через притворы и неплотности окон и балконных дверей.

ИК термография, как один из методов оценки теплотехнического состояния зданий, 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 теплотеря. ИК термография позволяет определить пути устранения ошибок проектирования, в результате которых температура в помещениях опускается ниже нормативного уровня. Таким образом, тепловизионная диагностика может служить одним из важных инструментов *энергоаудита* жилых и производственных зданий; при этом результаты осмотра являются составной частью *энергетических паспортов* зданий. В настоящее время утверждены формы энергетических паспортов для: 1) промышленных потребителей топливно-энергетических ресурсов (ГОСТ Р 51379–99); 2) систем энергоснабжения и их элементов (отраслевые руководящие документы

РАО "ЕЭС России", согласованные с Госэнергонадзором); 3) гражданских зданий (территориальные строительные нормы, утвержденные региональными органами власти); 4) других объектов, утвержденных Госэнергонадзором и иными уполномоченными органами. Энергетические паспорта содержат как проектные, так и фактические показатели теплового функционирования объектов, и тепловидение является мощным инструментом их текущей проверки.

Следует отметить, что тепловизионное обследование может дать лишь приближенную оценку теплотеря. По сравнению со стандартным теплотехническим обследованием преимуществом тепловидения является анализ теплотеря по всем ограждающим поверхностям, и, следовательно, возможность оценки вклада отдельных участков в общие теплотери. Тем не менее, количественные оценки, полученные методом тепловидения, могут быть существенно уточнены, если измерять тепловые потоки через ограждающие конструкции в отдельных точках с помощью датчиков теплового потока подобно тому, как это делают при оценке сопротивления теплопередаче (см. п. 11.2.4). Показания датчиков можно использовать для тарировки значений плотности теплового потока в отдельных точках ИК термограмм.

Теплотери 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. Следует отметить, что с помощью тепловизора, как правило, обследуют ограждающие поверхности, а теплотери через крышу и фундамент оценивают согласно разработанным в строительной теплофизике рекомендациям (см. табл. 11.2). По некоторым данным, погрешность подобной априорной методики оценки теплотеря может составлять 15...30 % от истинной величины, которую определяют *a posteriori* по счетам оплаты за тепловую энергию в течение одного календарного года.

### 11.2. Теплотери через отдельные элементы зданий [9]

Элемент здания	Доля теплотерь, %
Стены	32,0
Окна	29,0
Кровля	24,0
Воздухообмен	9,0
Фундамент	6,0

Как правило, расчетное значение стоимости рассеиваемой зданием энергии через ограждающие конструкции, крышу и фундамент, удовлетворительно коррелирует с фактической оплатой энергии при эксплуатации здания.

Сущность методики сводится к следующему.

Во-первых, на основе проектной документации, или используя прямые измерения, определяют площадь ограждающей конструкции здания  $S$  (возможно косвенное определение размеров здания по термограмме с использованием маркера известных размеров, в качестве которого может служить любой предмет с хорошим излучательным контрастом, например, металлическая линейка).

Затем определяют среднюю температуру  $T_{\text{внеш}}^{\text{ст}}$  ограждающих конструкций путем усреднения температуры на отдельных термограммах с учетом весовых вкладов отдельных зон, которые зависят от расстояния до объекта съемки, а также наличия в поле зрения посторонних объектов, например, неба. Мощность теплотерь  $Q$  с любого участка поверхности на момент съемки определяют по соотношению

$$Q = \alpha_{\text{внеш}} S (T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}), \quad (11.1)$$

где  $\alpha_{\text{внеш}}$  – коэффициент наружной теплоотдачи;  $T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}$  – температура наружного воздуха.

Значение наружного коэффициента теплоотдачи определяют с помощью измерителей теплового потока (приборы по

ГОСТ 7076–78); при этом учитывается как конвективная, так и радиационная компонента теплообмена. Крутизна характеристики, то есть зависимость выходного электрического сигнала от теплового потока, может различаться у различных приборов; при испытаниях ограждающих конструкций следует использовать датчики, которые обеспечивают измерение плотности мощности теплового потока на уровне нескольких Вт/м<sup>2</sup>, что требует определенного навыка.

При определении полных теплотерь здания за некоторый период времени, например, за год, следует исходить из *приведенной* мощности теплотерь  $Q_{\text{привед}}$ , которую рассчитывают, исходя из мощности теплотерь и температурного напора

$$\Delta T = T_{\text{внутр}}^{\text{возд}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}$$

на момент съемки с учетом *нормативного температурного напора*

$$\Delta T_{\text{норм}} = T_{\text{норм}}^{\text{внутр}} - T_{\text{норм}}^{\text{внеш}},$$

где  $T_{\text{внутр}}^{\text{возд}}$  – температура воздуха в помещении в период съемки;  $T_{\text{норм}}^{\text{внутр}}$  – *нормативная температура внутри помещений* (см. требования СНиП 23-02-03);  $T_{\text{норм}}^{\text{внеш}}$  – *средняя зимняя температура для данной местности* (например, средняя температура за отопительный период для жилых зданий и общеобразовательных учреждений для г. Томска составляет –8,4 °С).

Формула для расчета  $Q_{\text{привед}}$

$$Q_{\text{привед}} = Q \frac{\Delta T_{\text{норм}}}{\Delta T}. \quad (11.2)$$

Формула (11.2) справедлива для нормативного температурного напора, т.е. такого, который имел бы место при поддержании теплового режима в здании согласно рекомендациям СНиП 23-02-03. Та же самая формула применима для расчета мощности теплотерь при любом фактическом температурном напоре.

Окончательно, полные теплопотери из здания определяют по формуле

$$W = Q t, \quad (11.3)$$

где  $t$  – длительность периода (при годовых нормативных оценках  $Q = Q_{\text{норм}}$  и  $t$  – градусо-сутки отопительного сезона; см. СНиП 23-02-03, например, для г. Томска  $t = 6938$  градусо-суток).

Величину относительных теплопотерь, в частности, в тех случаях, когда не удается определить коэффициент наружной теплоотдачи, определяют как отношение избыточных температур наружной стенки в исследуемой и эталонной зонах

$$Q/Q_{\text{этал}} = (T_{\text{внеш}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}) / (T_{\text{внеш.этал}}^{\text{ст}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}}), \quad (11.4)$$

где индекс "этал" обозначает эталонную зону.

Методика вышеприведенного расчета учитывает теплопотери только за счет ухудшения теплоизолирующих свойств ограждающих конструкций. На практике существенные теплопотери могут быть обусловлены воздухопроницаемостью. Соответствующие оценки основаны на знании разности давления и температур (см. п. 3.7.10). Однако практическая ценность такой методики, основанной на использовании в качестве средства измерения только тепловизора, невысока.

Экономический ущерб от сверхнормативных теплопотерь определяют исходя из рассчитанных значений  $Q$  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 системы теплоснабжения и вентиляции.

При анализе теплопотерь зданий особое внимание следует уделять термо-

графированию окон, поскольку именно через них уходит большая часть тепловой энергии. Тепловизионное определение истинной температуры окон требует специфических приемов, поскольку на показания тепловизора существенное влияние оказывает угол съемки и отраженное излучение окружающей среды и Солнца.

### 11.2.3. Выявление скрытых дефектов

Скрытые дефекты строительства снижают комфорт внутри зданий и могут приводить к их преждевременному разрушению. Как и в НК, под термином "дефект" в строительстве понимают любое отклонение нормируемых параметров объекта от соответствующих требований. Основными видами 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 гермита и трещины в растворе и мастике, дефекты оконных блоков и проемов: некачественное уплотнение стен замазкой, сквозные щели в соединениях нижних элементов коробок, прерывистость мастики в устье стыка защелки оконного блока);
- мостики тепла и холода; ухудшение сопротивления теплопередаче (отсутствие теплоизоляции, аномальная увлажненность, некачественная кирпичная кладка, некорректные архитектурные и строительные решения и т.п.);
- дефектные панели ограждающих конструкций (нарушения толщины и установки утеплителя, адсорбция влаги в утеплителе, завышение объемного веса керамзитобетона, оседание утеплителя, скол края панели);
- отслоение штукатурки, облицовки и других покрытий.

Тепловизоры позволяют быстро и точно выявить дефектные участки и определить их границы. Количественную оценку обнаруженных дефектов производят в лабораторных условиях с соответствующими программными средствами.

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 теплотерь и сопротивления теплопередаче осуществляют согласно ГОСТ 26254–84 "Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций" и СНиП 23-02-03.

При этом тепловизор используют в качестве средства измерения поверхностной температуры, а тепловой поток (коэффициент теплообмена) измеряют с помощью датчика теплового потока.

Обнаруживать скрытые дефекты строительства тепловизионным методом можно как внутри, так и снаружи помещений. В целом, наружный осмотр более пригоден для оценки общих теплотерь зданий, включая интегральный 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 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 темпе-

ратуры стен начинают через несколько дней после начала нагрева.

При наружном обследовании кирпичных зданий основное внимание уделяют вертикальным швам, зонам возможного увлажнения кладки, окнам, зонам выхода подбалконных плит, потенциальным мостикам холода, возникающим вследствие наличия металлических вкладышей, использования нестандартных архитектурных решений и т.п. В ряде случаев удается проконтролировать качество кладки. При внутреннем осмотре хорошо выявляются зоны отсутствия теплоизоляции между стенами и плитами перекрытия, дефекты заделки подоконников и т.п. Наиболее эффективен тепловизионный осмотр панельных зданий. При этом экономическая эффективность диагностики поддается простому расчету, например, при выявлении дефектных межпанельных швов, стоимость ремонта которых (400 – 600 рублей за погонный метр в 2008 г. в г. Томске) зависит от протяженности дефектных участков. Практика применения тепловидения показывает, что швы, зачастую выглядящие дефектными при наружном осмотре, могут сохранять утеплитель и требовать лишь косметического ремонта, тогда как швы, выглядящие безупречными, могут быть "пустыми" внутри и являться причиной жалоб жильцов на тепловой дискомфорт внутри помещений. При хорошем температурном напоре тепловидение позволяет визуализировать внутреннюю структуру отдельных панелей наподобие рентгеновского контроля и оценить, таким образом, состояние утеплителя. Кроме того, тепловизионный контроль служит эффективным средством оценки качества наружного или внутреннего утепления стен.

В последние годы возникла потребность в тепловизионной диагностике ограждающих конструкций ответственных производственных зданий, например, главных корпусов тепловых станций. Ка-

чество строительства большинства российских энергообъектов, возведенных в 60 – 70-е годы прошлого века, было весьма невысоким, поэтому по мере их эксплуатации интенсивно ржавеют металлические соединения стеновых панелей, что в ряде случаев может привести к выпадению отдельных фрагментов стен наружу или внутрь помещений. Интенсивность коррозии связана с увлажнением панелей, что хорошо идентифицируется посредством тепловидения.

Результаты осмотра строительных сооружений представляют в виде черно-белых и/или цветных изображений, которыми служат как отдельные ИК термограммы, так и панорамные (мозаичные) термограммы, сшитые из множества отдельных термограмм. В ряде случаев рекомендуется составлять карты дефектов, например, при указании дефектных межпанельных швов зданий, подлежащих ремонту.

#### 11.2.4. Оценка сопротивления теплопередаче

Теоретические аспекты оценки сопротивления теплопередаче были рассмотрены в п. 3.12. Стационарный тепловой поток через многослойную плоскую стенку, разделяющую две среды с температурой  $T_{in}^a$  и  $T_{out}^a$ , определен соотношениями (рис. 11.2):

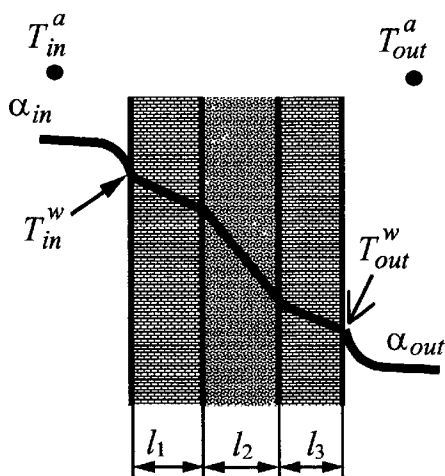


Рис. 11.2. Теплопередача через многослойную плоскую стенку

$$Q = \frac{T_{in}^a - T_{out}^a}{R}; \quad (11.5)$$

$$R = \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{out}};$$

$$Q = \alpha_{in} (T_{in}^a - T_{in}^w); \quad (11.6)$$

$$Q = \alpha_{out} (T_{out}^w - T_{out}^a), \quad (11.7)$$

где все обозначения соответствуют принятым в п. 3.12.

Теплофизические характеристики типовых строительных материалов были приведены в табл. 2.3. Зависимость коэффициента теплопроводности некоторых строительных материалов от их влажности показана на рис. 11.3.

Для характеристики отдельных компонент сопротивления теплопередаче вводят следующие понятия:

тепловое сопротивление пограничного слоя на внутренней и внешней поверхности

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}; \quad R_{out} = \frac{1}{\alpha_{out}}; \quad (11.8)$$

и термическое сопротивление многослойной стенки (число слоев  $N$ )

$$R_t = \sum_1^N \frac{l_i}{\lambda_i}, \quad (11.9)$$

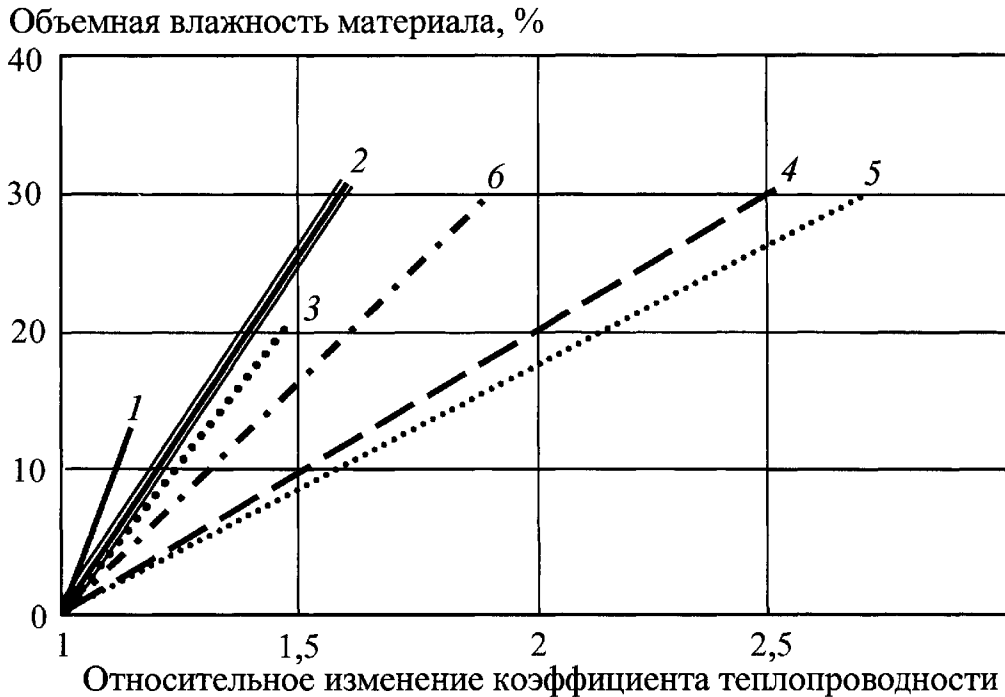
где  $l_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $\lambda_i$  – коэффициенты теплопроводности слоев.

Тогда

$$R = R_{in} + R_t + R_{out}. \quad (11.10)$$

В строительстве понятие сопротивления теплопередаче вводят для участков ограждающих конструкций с однородным температурным полем. При наличии значительных температурных неоднородностей или при характеристике обширных поверхностей вводят понятие приведенного сопротивления теплопередаче, которое определяют с учетом вклада отдельных равномерных зон. Применение тепловидения позволяет автоматизировать этот процесс.





**Рис. 11.3. Зависимость теплопроводности строительных материалов от влажности:**

- 1 – бетон плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup>; 2 – керамзитобетон плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>;  
 3 – кирпич красный плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>; 4 – шлаковата плотностью 200 кг/м<sup>3</sup>;  
 5 – стекловата плотностью 200 кг/м<sup>3</sup>; 6 – котельный шлак плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>

Согласно ранее принятому СНиП II-3-79\* "Строительная теплотехника" в России в два этапа (с 1 сентября 1995 г. и с 1 января 2000 г.) проведена реформа проектирования теплозащиты строительных сооружений. Например, в настоящее время согласно Территориальным строительным нормам по Томской области ТСН 23-316-2000 "Тепловая защита жилых и общественных зданий" сопротивление теплопередаче составляет для стен 3,83 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К, а для окон и балконных дверей 0,647 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К.

#### Стационарный режим

В стационарном режиме температуру наружной поверхности ограждающей конструкции определяют по следующей формуле (см. п. 3.12):

$$T_{out}^w = T_{out}^a + \frac{R_{out}}{R} (T_{in}^{air} - T_{out}^{air}). \quad (11.11)$$

Дефекты ограждающих конструкций различного типа изменяют термическое сопротивление стенки на величину  $\Delta R$ .

При этом на внешней поверхности конструкции возникает температурный сигнал амплитудой:

$$\Delta T = \frac{R_{out}}{R} \frac{\Delta R}{R - \Delta R} (T_{in}^{air} - T_{out}^{air}). \quad (11.12)$$

Формула (11.12) означает, что уменьшение  $R$  на величину  $\Delta R$  приводит к появлению положительного сигнала  $\Delta T$ , т.е. температура наружной стены возрастает. Измеряя  $\Delta T$  с помощью тепловизора, можно оценить изменение термического сопротивления ограждающей конструкции  $\Delta R$ .

Ограждающие конструкции зданий могут считаться стационарными лишь 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 (11.5 – 11.7, 11.11 и 11.12). В ГОСТ 26254-84 формула для определения  $R$  предложена в следующем виде, аналогичном формуле (11.5):

$$R = R_B + R_K + R_H = \frac{t_B - \tau_B}{q_{\Phi}} + \frac{\tau_B - \tau_H}{q_{\Phi}} + \frac{\tau_H - t_H}{q_{\Phi}}, \quad (11.13)$$

где  $R_B$ ,  $R_H$  – сопротивления теплопередаче соответственно внутренней и наружной поверхностей;  $R_K$  – термическое сопротивление однородной зоны ограждающей конструкции, эквивалентное в формуле (11.9);  $t_B$ ,  $t_H$  – средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутреннего и наружного воздуха;  $\tau_B$ ,  $\tau_H$  – средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции;  $q_{\Phi}$  – средняя за расчетный период измерения фактическая плотность теплового потока.

Значения коэффициентов теплоотдачи на внутренних и наружных поверхностях измеряют экспериментально с помощью измерителей плотности теплового потока. Использование значений, рекомендованных СНиП 23-02-2003 ( $\alpha_{in} = 8,7$  Вт/(м·К);  $\alpha_{out} = 23$  Вт/(м·К)), нецелесообразно, поскольку истинные значения, в особенности,  $\alpha_{out}$ , могут значительно отличаться от справочных. Существенные изменения  $\alpha_{out}$  по высоте здания, влияние архитектурных элементов, таких как козырьки, выступы, колонны и т.п., делают затруднительным определение  $R$  по всему полю зрения тепловизора, поэтому ограничиваются определением  $R$  в отдельных точках. В ряде случаев термограммы плоских участков ограждающих конструкций можно преобразовать в карты распределения  $R$ , при этом погрешность достигает 30%. Целесообразно применять ИК термографию перед контактными измерениями тепловых потоков с целью более правильного определения мест крепления датчиков, поскольку даже большое число датчиков, требуемое стандартом, не может гарантировать надежных результатов

вследствие возможного воздействия неучтенных нагревателей, трехмерной геометрией съемки, отслоений покрытий и т.п. Следует также заметить, что вклад сопротивления теплопередаче на поверхностях стен (соответственно  $R_{in} = 0,115$  Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К и  $R_{out} = 0,0435$  Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К для рекомендуемых СНиП 23-02-2003 значений) в общее проектируемое сопротивление теплопередаче мал, поэтому основной проблемой является определение термического сопротивления стен по формуле

$$R_t = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{Q}. \quad (11.14)$$

Помимо величины  $\alpha$ , другими факторами, влияющими на точность определения  $R$ , являются: 1) несоответствие температуры воздуха в момент измерения ее значениям за предшествующие 8...12 часов; 2) нелинейное распределение температуры внутри ограждающей конструкции; 3) неточное задание коэффициента излучения.

Среднеквадратическую ошибку измерения  $R_t$  по формуле (11.14) в стационарном режиме можно оценить, задавая среднеквадратические ошибки измерения теплового потока и температуры наружной и внутренней стен. Ограничимся наглядной графической иллюстрацией, используя генератор случайных чисел, что позволяет моделировать показания тепловизора и измерителя плотности теплового потока в различные моменты времени.

Рассмотрим конкретный пример, все численные параметры которого для стационарного случая приведены в табл. 11.3 (для двух толщин стенки).

Пусть температуру стен измеряют тепловизором с реалистической погрешностью  $\pm 1$  °С. Погрешность измерения теплового потока, например, прибором ИПП-2, равна  $\pm 5$  % от показаний. Рассмотрим 20 точек измерений, причем показания приборов изменяются случайным образом в рамках указанных погрешностей. График относительной погрешности определения  $R_t$  изображен на рис. 11.4.

### 11.3. Стационарная процедура определения термического сопротивления кирпичной стенки ( $\lambda = 0,76 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ )

$T_{in}^a = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{out}^a = -10 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\alpha_{in} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ $\alpha_{out} = 23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	
Толщина стенки 0,76 м	Толщина стенки 2,6 м
$R = 1,16 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ; $R_t = 1,00 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$	$R = 3,58 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ; $R = 3,42 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$
$Q = 25,90 \text{ Вт/м}^2$	$Q = 8,38 \text{ Вт/м}^2$
$T_w^i = +17,02 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_w^o = -8,87 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_w^i = +19,04 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_w^o = -9,64 \text{ }^\circ\text{C}$

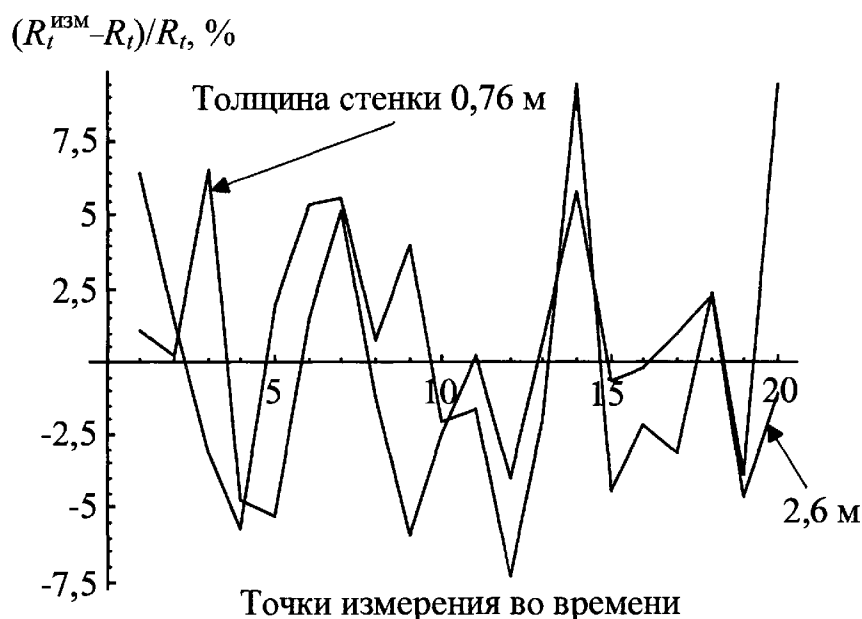


Рис. 11.4. Относительная погрешность измерения термического сопротивления кирпичной стенки по формуле (11.14)

Видно, что независимо от толщины стенки возможно измерение ее термического сопротивления с погрешностью  $\pm 6 \dots 7 \%$  от истинного значения.

#### Нестационарный режим

Необходимость выбора периода измерений, при котором справедливы формулы стационарного режима (11.13 и 11.14), превращает определение  $R$  в длительную процедуру (до 15 суток согласно ГОСТ 26254–84). В настоящее время используют многоканальные цифровые датчики температуры и теплового потока с автономным питанием, которые прикрепляют к ограждающей конструкции. Запи-

санные показатели анализируют на компьютере с целью выбора расчетных периодов, в течение которых отклонения среднесуточной температуры не должны превышать  $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Продолжительность этих периодов, согласно ГОСТ 25254–84 должна быть не менее 1 суток для ограждающих конструкций с тепловой инерцией до 1,5 и не менее 3 суток для конструкций с большей тепловой инерцией. Более слабую зависимость результатов от нестационарности граничных условий получают, когда контактные измерители температуры устанавливают в центре стены и используют соответствующие скорректированные соотношения для расчета  $R$ .

Институтом "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 организацией предложена методика создания необходимого температурного напора в летнее время путем подогрева отдельных помещений здания.

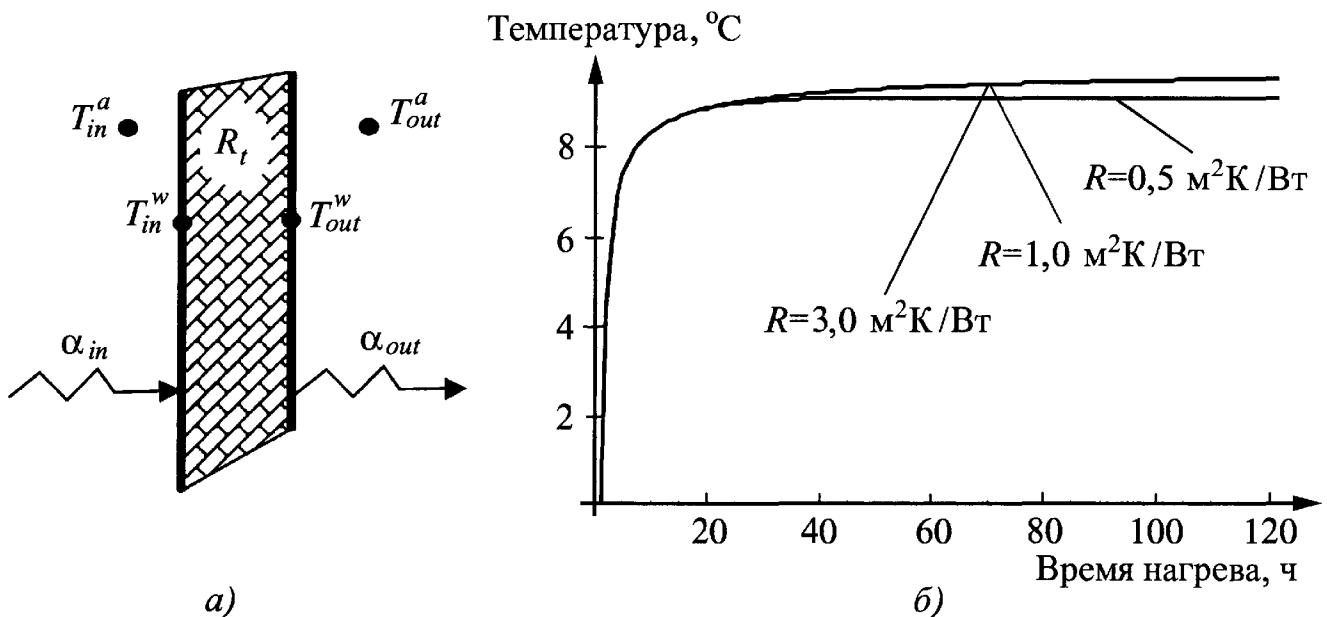
На результаты определения сопротивления теплопередаче существенное влияние оказывают солнечный нагрев и время суток. Значения  $R$ , полученные на прогретых солнцем стенах, может отличаться в несколько раз от истинных. Наилучшие результаты получают, производя измерения рано утром или поздно вечером.

Рассмотрим нагрев однородной стенки, изображенной на рис. 11.5, а. Пусть перед началом нагрева температура стенки равна нулю, поскольку это не снижает общности рассуждений. В момент времени  $\tau = 0$  температура наружного воздуха ступенчато увеличивается на  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Определим температуру наружной поверхности как функцию времени для того, чтобы

оценить, в течение какого времени наружная температура стенки будет возрастать до стационарного значения.

Мы имеем дело с задачей нагрева пластины средой (или тепловым потоком), причем передняя и задняя поверхность пластины характеризуются различными значениями коэффициента теплообмена. В силу последнего фактора аналитическое решение такой задачи приводит к весьма громоздким вычислениям. Расчетные данные на рис. 11.5, б получены с помощью программы ThermoCalc-2D для стенки из кирпича трех толщин: 0,31 м; 0,76 м и 2,6 м, что соответствует трем значениям сопротивления теплопередаче  $R = 0,5; 1; 3\text{ Вт}^{-1}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}$ , если принять рекомендуемые СНиП значения коэффициентов теплообмена (коэффициент теплопроводности кирпича принят  $\lambda = 0,9\text{ (Вт/(м}\cdot\text{К))}$ ).

Из рис. 11.5, б хорошо видно, что кирпичные стены толщиной 0,76 и 2,6 м ведут себя практически идентично в нестационарном процессе. Введем два характерных времени  $\tau_{99\%}$  и  $\tau_{90\%}$ , которые соответствуют 99 и 90 % полного сигнала. Для исследуемых случаев соответствующие значения приведены в табл. 11.4.



**Рис. 11.5. Теплопередача через однослойную стенку:**

а – схема нагрева однородной стенки;

б – изменение температуры наружной поверхности при скачкообразном нагреве средой с амплитудой  $10\text{ }^\circ\text{C}$  для различных сопротивлений теплопередаче

#### 11.4. Анализ ступенчатого нагрева кирпичной стенки

(температура наружного воздуха изменяется скачкообразно на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$$\alpha_{in} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \alpha_{out} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \lambda = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

коэффициент температуропроводности кирпича  $a = 6,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ )

Толщина кирпичной стенки, м	Стационарная температура наружной поверхности, рассчитанная по формуле (11.11)	Температура наружной поверхности стенки через 10 суток после начала нагрева, рассчитанная с помощью программы ThermoCalc-2D	Время прогрева стенки до 90 % максимального значения, ч (Fo)*	Время прогрева стенки до 99 % максимального значения, ч (Fo)
0,31	9,14	9,14	7 (0,16)	26,5 (0,6)
0,76	9,57	9,57	11 (0,042)	82 (0,31)
2,6	9,86	9,70	13,5 (0,0044)	137 (0,045)

\* В скобках приведено соответствующее значение безразмерного времени – числа Фурье.

Данные табл. 11.4 и рис. 11.5 приводят к следующим выводам.

- Программа численного расчета ThermoCalc-2D выдает значения температуры в конце нагрева, идентичные формуле стационарного режима. Отклонение в значении температуры для стенки толщиной 2,6 м можно объяснить тем, что 10 суток не хватило для установления стационарного значения.

- Кирпичные стенки толщиной 0,76 и 2,6 м, что приблизительно соответствует старому и новому нормативу сопротивления теплопередаче согласно СНиП 23-02–2003, ведут себя одинаковым образом в процессе нестационарного нагрева. Различие в значениях температуры наружной поверхности составляет  $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$  в стационарном режиме при температурном напоре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Соответственно, при "зимнем" напоре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  это значение увеличится в 4 раза и составит  $1,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Последнее значение сравнимо с погрешностью тепловизионных измерений, поэтому отсюда умозрительно понятны трудности оценки термического сопротивления толстостенных строительных конструкций по результатам

температурных измерений. Экономия тепловой энергии в вышеприведенном примере составит  $23 \cdot 1,16 = 26,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Если принять площадь боковой поверхности ограждающей конструкции типового 5-ти этажного 2-подъездного дома равной  $2000 \text{ м}^2$ , то экономия теплотерь за счет увеличения толщины кирпичной стенки от 0,76 до 2,6 м, т.е. при переходе на новые нормы, составит  $53\,400 \text{ Вт}$  на фасад дома. Расчет годовой экономии энергии следует проводить из условия обеспечения нормативного температурного напора и длительности отопительного сезона в данной местности (см. п. 11.2.2).

- Полная реакция кирпичной стенки на нестационарное возбуждение (на уровне 99 %) происходит в течение весьма длительного времени, составляющего от 26 до 137 часов в зависимости от толщины стенки. Уровень температуры, равный 90 % от максимального значения, достигается в течение времени от 7 до 13,5 часов.

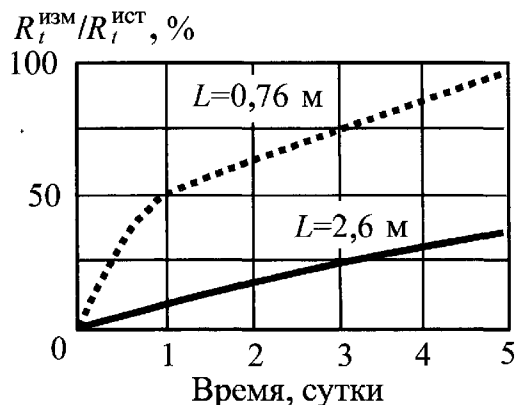
Применим формулу (11.14) к определению термического сопротивления кирпичной стенки  $R_t$  в случае скачкообраз-

ного изменения температуры наружного воздуха на 10 °С. Тепловой поток измеряют на наружной поверхности (на практике измерения проводят на внутренней стенке). Отношение измеренного термического сопротивления стенки к истинному показано на рис. 11.6. Видно, что для стенки толщиной 0,76 м через 5 суток после начала нагрева оценка термического сопротивления достигает 92 % от истинного, в то время как для стенки толщиной 2,6 м даже через 5 суток измеренное значение  $R_t$  составляет всего 34 % от истинного. Заметим, что основная погрешность возникает не из-за изменения температуры поверхностей, а из-за того, что длительное время не устанавливается стационарное значение теплового потока.

Наиболее простым приемом ускорения момента времени, когда можно применять формулу (11.14), является одновременное измерение теплового потока как на внутренней, так и на наружной, поверхности стены. Например, формула

$$R_t = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{(Q_{out} + Q_{in})/2} \quad (11.15)$$

позволяет определить величину  $R_t$  для стенки толщиной 2,6 м через 12 дней после начала нагрева с погрешностью не более 6 %. Трудность практического осуществления такого подхода состоит в том, что измерения теплового потока на наружных стенах, как правило, ненадежны.



**Рис. 11.6. Определение термического сопротивления стенки из кирпича по формуле (11.14)**

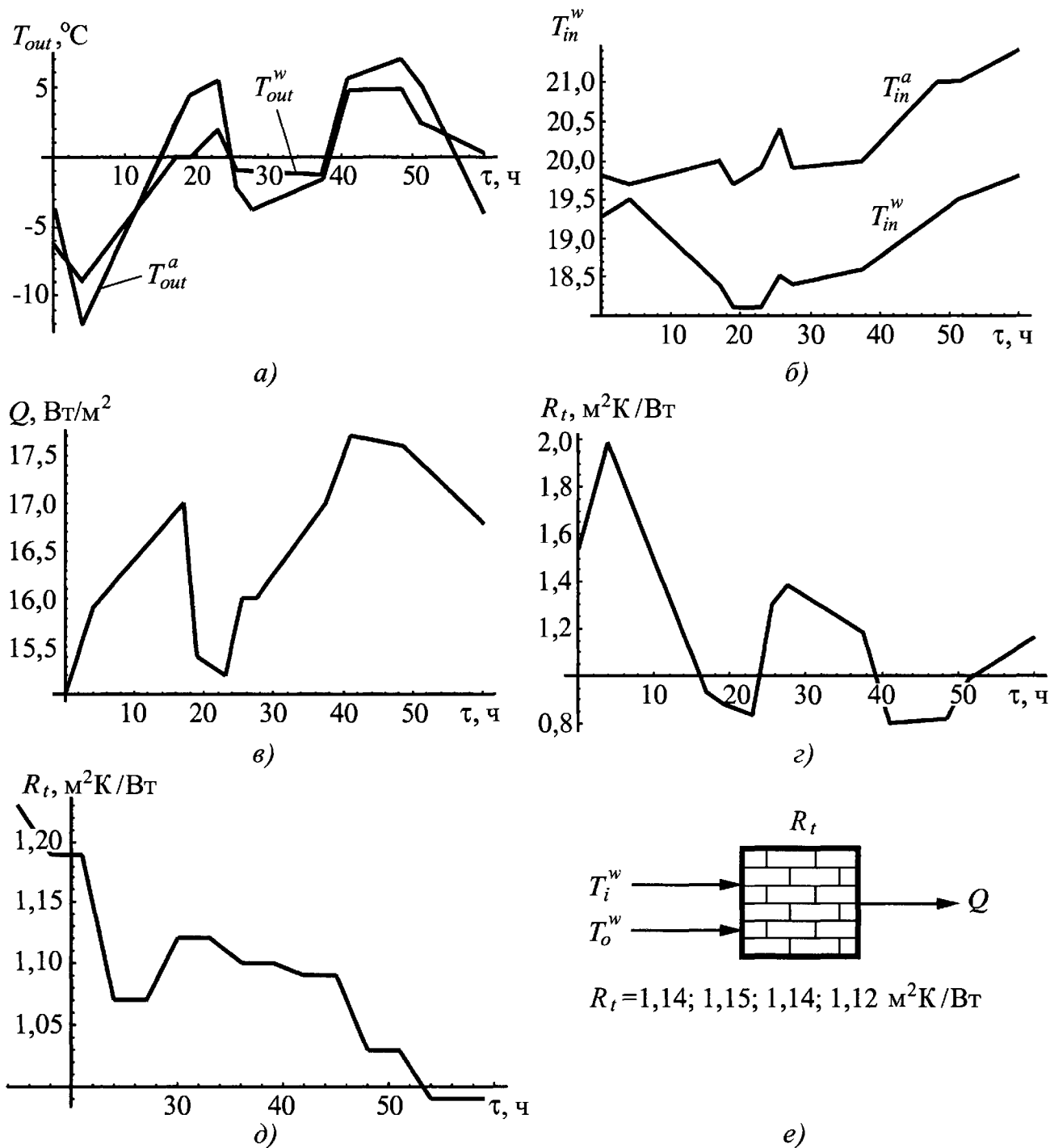
Международный стандарт ISO 9869–1994 "Тепловая изоляция. Строительные элементы. Измерение сопротивления теплопередаче и термического сопротивления в функционирующих зданиях" рекомендует измерять  $R$  в естественных условиях, используя два метода: *скользящего среднего* (averaging) и *черного ящика* (black box). Первый метод предполагает использовать "стационарную" формулу (11.14), вычисляя скользящее среднее значение, а именно, интегрируя  $T(\tau)$  и  $Q(\tau)$  по времени, что эквивалентно рекомендации ГОСТ 25254–84. Надежность усредненных оценок возрастает с увеличением периода наблюдения. Метод черного ящика основан на использовании динамической модели процесса (передаточной функции черного ящика) и обеспечивает лучшие результаты при резких изменениях температуры среды. Данная модель является хорошей иллюстрацией того, как практически значимые результаты могут быть получены без знания физических процессов, определяющих температуры и тепловые потоки в нестационарном режиме.

Алгоритмы повышения точности определения сопротивления теплопередаче строительных конструкций в нестационарном режиме находятся в стадии разработки. В.П. Вавилов с соавторами использовали алгоритм нелинейной подгонки, позволяющий вычислять сопротивление теплопередаче в итеративной процедуре многократного решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности [179]. Следует заметить, что решения обратных задач методом минимизации функционала невязки весьма чувствительны к слабым вариациям входных параметров, что зачастую приводит к расхождению решения. Практическая ценность таких алгоритмов невелика.

Влияние нестационарности процесса теплообмена ограждающей конструкции на результаты определения  $R_t$  проиллюстрировано экспериментальными данными

на рис. 11.7, полученными при тепловизионном осмотре коттеджа. В ходе обследования измеряли температуры внутреннего и наружного воздуха, температуры внутренней и наружной поверхности стены, а также плотность мощности теплового

потока через стену внутри помещения (см. рис. 11.7, а – в). "Мгновенная" оценка  $R_t$  приводит к разбросу значений от 0,8 до 2 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К (рис. 11.7, з). Применение метода скользящего среднего снижает разброс  $R_t$  до 1,0...1,2 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К (рис. 11.7, д).



**Рис. 11.7. Определение термического сопротивления фрагмента кирпичной стены:**  
 а – температура наружного воздуха и наружной стены; б – температура внутреннего воздуха и внутренней стены; в – плотность теплового потока на внутренней стене; з – текущее значение сопротивления теплопередаче согласно формуле (11.4); д – сопротивление теплопередаче (метод скользящего среднего, ускорение по б ч); е – метод черного ящика (приведены значения  $R_t$  при различных параметрах "черного ящика")

Метод черного ящика является одним из методов идентификации параметров объекта (черного ящика), для которого известен набор входных ( $T_{in}^w, T_{out}^w$ ) и выходных ( $Q$ ) данных; при этом объектом идентификации является величина  $R$ . Чаще всего используют линейную авторегрессионную модель с внешними переменными ARX (autoregressive model with exogenous variables), которая имеется в пакете System Identification Toolbox, MatLab. Данная модель представляет собой линейное разностное уравнение, параметры которой позволяют определить неизвестный параметр черного ящика, например,  $R_i$ :

$$Q(\tau) + a_1 Q(\tau - \Delta\tau) + a_2 Q(\tau - 2\Delta\tau) + \dots + a_n Q(\tau - n_a \Delta\tau) = b_{11} T_{in}^w(\tau - \Delta\tau) + b_{12} T_{in}^w(\tau - 2\Delta\tau) + \dots + b_{1,n1} T_{in}^w(\tau - n_1 \Delta\tau) + b_{21} T_{out}^w(\tau - \Delta\tau) + b_{22} T_{out}^w(\tau - 2\Delta\tau) + \dots + b_{1,n2} T_{out}^w(\tau - n_2 \Delta\tau); \quad 11.16$$

$$R_t = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{Q} = \frac{1 + \sum_{i=1}^{na} a_i}{\sum_{j=1}^{nb1} b_{1j}}$$

Значения  $R_t$ , рассчитанные данным методом по данным рис. 11.7, а – в, при различных наборах параметров модели ARX, приведены на рис. 11.7, е. Разброс значений составил от 1,12 до 1,15 м<sup>2</sup>·К/Вт. Заметим, что ожидаемое значение  $R_t$  в данном случае для кирпичной стены коттеджа толщиной 0,7 м составляло 0,92 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К.

**11.2.5. Контроль за влажностью кровли крыш**

Невидимые глазом скопления воды в кровле крыш производственных зданий являются серьезным дефектом, который вызывает преждевременное разрушение кровли и протечки 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 возникает опасность обрушения кровли.

Аномальная поверхностная влажность может быть обнаружена в стационарном режиме за счет испарения воды и соответствующего понижения температуры, однако вода, скрытая внутри многослойной кровли, 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. Поэтому в США широко используют тепловизионную съемку плоских крыш с воздуха (с борта мотодельтаплана, вертолета или самолета, в том числе, беспилотного). При этом обеспечивают весьма высокую производительность обследования при сравнительно простой идентификации и координатной привязке дефектных зон.

**11.2.6. Тепловизоры для строительной диагностики**

В строительной диагностике с успехом применяют как коротковолновые (рабочий диапазон длин волн 2,0...5,5 мкм), так и длинноволновые (рабочий диапазон длин волн 7...14 мкм) тепловизоры.

Рекомендуются тепловизоры со следующими техническими параметрами:

Диапазон измеряемых температур, °С .....	от -20 до +100
Чувствительность, °С .....	не хуже 0,2
Диапазон рабочих температур, °С .....	от -15 до +40
Угол зрения (применение сменяемых объективов), град .....	от 7 до 20
Число элементов в кадре (элементов в матрице) .....	не менее 128 × 128
Частота смены кадров .....	не хуже 1 Гц



Погрешность измерения по черному телу ..... не хуже  $\pm 1$  °С (при определении сопротивления теплопередаче может потребоваться более высокая точность измерения)

Наличие опции поправки результатов на значение коэффициента излучения и отраженную температуру

Наличие системы цифровой записи термограмм и вывода термограмм в видеостандарте  
Небольшие габариты и масса (портативность)  
Автономное питание

В настоящее время на мировом рынке имеется большое количество моделей тепловизоров, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям, а во многих случаях превосходящих их (см. п. 3.5 и табл. 3.3). Показывающие тепловизоры применяют для обнаружения скрытых дефектов строительства, а простые количественные отсчеты температуры можно получить, размещая в поле зрения соответствующие эталоны или предметы с известной температурой. Существуют также модели тепловизоров со встроенными пирометрами. Тем не менее, для определения теплопотерь и оценки сопротивления теплопередаче необходимо применять современные измерительные тепловизоры, обеспечивающие температурные отсчеты во всех пикселях; однако, даже в этом случае надежность количественных оценок, как правило, невысока.

Не все приведенные выше требования к параметрам "строительных" тепловизоров являются жестко заданными. Например, тепловизор с форматом изображения  $160 \times 120$  обеспечивает такое же пространственное разрешение по объекту контроля на расстоянии 25 м, как и тепловизор с форматом изображения  $320 \times 240$  на расстоянии 50 м (при вчетверо более низкой производительности осмотра).

#### Вспомогательные устройства

Тепловизор является основным, но не единственным средством диагностики теплового состояния зданий и сооружений. Вспомогательными устройствами являются:

- инфракрасный термометр (оптический пирометр);

- измеритель плотности теплового потока;
- анемометр;
- ртутный термометр (или термощуп – термометр);
- манометр;
- воздушный насос;
- термоанемометр;
- влагомер;
- психрометр.

Для уточнения значений коэффициентов теплоотдачи следует применять измерители плотности теплового потока. Рекомендуется использовать анемометры, а также ртутные термометры на диапазон  $-20...+100$  °С с делением шкалы не более 1 °С или термощупы – термометры. При оценке воздухопроницаемости сооружения используют воздушные насосы различного типа для изменения давления внутри помещения. Перепад давления измеряют манометром. Скорость движения воздуха определяют термоанемометром. Влагосодержание строительных конструкций измеряют диэлькометрическим влагомером. Анализ точки росы проводят с помощью аспирационного психрометра.

Существуют малогабаритные датчики, например, фирмы KESTREL (США), совмещающие измерение сразу нескольких параметров: температуру воздуха, влажность воздуха, температуру точки росы и скорость ветра. Наиболее капризными являются измерители теплового потока, работа с которыми требует определенных методических навыков, что связано как с физической работой этих приборов, так и с трудностями их метрологического обеспечения. Во времена СССР датчики теплового потока разрабатывали, в основном, в Институте технической теплофизики (г. Киев, Украина). Из современных отечественных производителей вышеуказанного оборудования следует упомянуть фирму "ТЕХНОАС" (г. Коломна), завод "Эталон" (г. Омск), СКБ "Стройприбор" (г. Челябинск), фирму "Практик-НЦ" (г. Москва) НПП "Карат" (г. Челябинск). Например, прибор ИТП-МГ4.03 ("Стройприбор") предназна-

чен для определения температуры окружающей среды и тепловых потоков через ограждающие конструкции зданий и теплоизоляцию промышленных установок согласно ГОСТ 25380–82 "Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции", ГОСТ 26254–84 и ГОСТ 26602.1–99 "Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче". Основные параметры прибора: диапазон измерения тепловых потоков 2...999 Вт/м<sup>2</sup>, диапазон измерения температуры –30...+100 °С, основная погрешность измерения теплового потока ±7 %, количество запоминаемых значений до 2000, длительность периода наблюдения от 1 до 400 ч, интервал наблюдения от 1 до 180 мин. Приборы такого рода зачастую являются многоканальными и позволяют осуществлять сбор цифровых данных от нескольких датчиков различного типа, как, например, в приборе "Терем-4.0" производства НПШ "Карат".

Из портативных устройств можно отметить измеритель плотности теплового потока ИПП-2 производства фирмы "Практик-НЦ" (диапазон измерения: 0...2000 Вт/м<sup>2</sup>, время измерения 3,5 минуты, основная погрешность 5 %).

### 11.2.7. Методические особенности термографирования строительных объектов

Размеры зоны тепловизионного контроля определяются углом поля зрения тепловизора и расстоянием до объекта съемки и могут изменяться от 3 до 30 м в зависимости от требуемой детальности анализа и используемого формата тепловизионного кадра. Расстояние до объекта контроля может составлять от 1 до 100 м в зависимости от объектива, типа и размеров контролируемого объекта, цели и условий съемки.

Основная погрешность измерения температуры по абсолютно черному телу для современных тепловизоров составляет не более ±1 % (±2 %) от измеренного зна-

чения шкалы или ±1 °С (±2 °С), однако как отмечалось выше, этого может быть недостаточно для надежной оценки сопротивления теплопередаче.

Измерения выполняют снаружи и/или внутри помещений согласно стандартным методикам работы с тепловизором и вспомогательными устройствами. Температурный напор в строительном сооружении, измеряемый как разность внутренней и внешней температур, должен быть не менее 10 °С в течение последних 24 часов (требование международного стандарта ISO 6781–83 "Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод"), что всегда выполняется в течение отопительного сезона. Во время съемки изменение температурного напора не должно превышать ±30 % от действительной начальной величины; температура воздуха внутри помещения не должна изменяться более чем на ±2 °С, а ограждающие конструкции не должны подвергаться воздействию солнечной радиации в течение предшествующих 12 часов [177]. При определении (оценке) сопротивления теплопередаче следует руководствоваться требованиями ГОСТ 26254–84 [180], который, как отмечалось выше, требует, чтобы продолжительность периодов с наиболее установившимся режимом с отклонением среднесуточной температуры за этот период в пределах ±1,5 °С 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 многих тепловизоров "плывут" при быстром перемещении прибора 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 путем сравнения термограмм с видимыми изображениями, которые получают с помощью фотоаппаратов и видеокамер. Рекомендуется вводить видимые и ИК изображения в компьютер с последующим получением твердой копии. В ряде последних моделей зарубежных и отечественных тепловизоров введена опция попеременной визуальной и тепловизионной съемки, а также наложения видео- и ИК изображений.

### Проблема коэффициента излучения

При обнаружении скрытых строительных дефектов знание коэффициента излучения (КИ) 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. Коэффициенты излучения некоторых строительных материалов приведены в табл. 1.3, 1.4.

При определении теплопотерь и сопротивления теплопередаче следует вводить поправку на КИ объекта, используя соответствующую опцию тепловизора. Связь погрешности задания КИ и погрешности определения истинной температуры была описана в п. 7.2.5.

### Метеоусловия при тепловизионной съемке

На результаты тепловизионной съемки оказывает влияние расположение ограждающих конструкций относительно частей света.

Тепловизионную съемку не проводят в дождь, туман, сильный снегопад, а также при наличии снега, измороси и влаги на контролируемых поверхностях. Погрешность измерений, вносимая вышеука-

занными факторами, возрастает с увеличением расстояния до объекта.

Прямое и рассеянное солнечное излучение, особенно в весеннее–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 блики от Солнца и холодного неба, которые на термограмме выглядят как зоны соответственно повышенной или пониженной температуры. В ряде случаев наличие бликов легко подтверждают путем перемещения тепловизора: изображение блика будет перемещаться, в то время как изображение аномально нагретой или холодной зоны останется на месте. Эффект холодного неба особенно заметен при безоблачном небе, при визировании которого тепловизор может показывать температуру до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Тепловизионную съемку рекомендуется проводить в предрассветные или ночные часы, когда тепловое влияние окружающей среды минимально.

В дневное время наилучшие результаты получают при пасмурном небе. В исключительных случаях (зимой и при сравнении температур однотипных зон) возможны измерения температурных перепадов и в условиях прямой солнечной засветки. При этом абсолютные значения температуры могут существенно отклоняться от истинных, и полезную информацию будет нести разность температур однотипных зон. Для съемки в дневное время наиболее пригодны тепловизоры длинноволнового диапазона. Тем не менее, во всех случаях следует учитывать возможный нагрев конструкций солнечной радиацией, мощность которой в средних широтах в ясный день достигает  $1\text{ кВт/м}^2$ .

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 теплообмена. Для приблизительного учета влияния скорости ветра измеренные значения температурных перепадов рекомендуется умножать на поправочный коэффициент, приведенный в табл. 11.5.

При определении теплотерь и сопротивления теплопередаче следует принимать во внимание суточный ход температуры окружающего воздуха и использовать методы обработки данных, рекомендованные стандартом ISO 9869–1994.

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 следует проводить согласно ГОСТ 26629–85 [181]. Метод тепловизионного измерения сопротив-

ления теплопередаче отдельных элементов конструкций рекомендуется осуществлять в лабораторных условиях путем размещения исследуемого объекта (панели, блока) в стенке климатической камеры. 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.

#### Микрометеусловия при тепловизионной съемке

Под *микрометеусловиями* понимают условия, создающиеся вследствие специфического расположения объекта контроля и окружающих объектов в данной местности. Так, например, размещение строительного сооружения в низине создает эффект "холодного бассейна" и может приводить к появлению дополнительного конденсата на поверхности. Наличие деревьев и кустарников, соседних зданий и т.п. может влиять на солнечное облучение и порывы ветра. Высокотемпературные печи, калориферы внутри помещений могут вызывать как дополнительный нагрев объекта контроля, так и отраженную засветку.

#### **11.5. Коэффициент поправки температурных перепадов на скорость ветра [182]**

Скорость ветра, м/с	Коэффициент поправки
1	1,00
2	1,36
3	1,64
4	1,86
5	2,06
6	2,23
7	2,40
8	2,54

#### 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 несуществен при расстояниях менее 30 м, на которых обычно проводят съемку. При больших расстояниях следует применять соответствующие поправочные формулы, учитывающие поглощение излучения в атмосфере. Современные те-

пловизоры допускают введение коррекции на расстояние до объекта съемки и влажность среды.

### 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. По возможности рекомендуется выключить радиаторы и калориферы за 12 часов, а лампы накаливания – незадолго до съемки. С учетом возможного отраженного излучения, минимально допустимое приближение оператора-термографиста к обследуемой поверхности составляет 1 м, к электрическим лампам накаливания – 2 м (требование ГОСТ 26629–85). При термографировании оконных стекол может возникать эффект отражения близстоящих источников теплового излучения, включая людей, в стекле; при этом оператор видит слабое изображение указанных источников на термограмме. Еще более сильное влияние оказывает отраженное солнечное излучение. В целом, термографирование полупрозрачных объектов, таких как диэлектрические пленки, оконные стекла и т.п. требуют использова-

ния 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 КИ по зоне контроля можно учесть путем визуального осмотра, а также введением соответствующих поправок в установки тепловизора. Не рекомендуется проводить измерение температуры поверхностей с КИ ниже 0,7 (ГОСТ 26629–85). Влияние величины КИ велико при визировании металлических, в особенности, блестящих, поверхностей. Большинство строительных материалов, а также металлы, покрытые слоем ржавчины, грязи и пыли, обладают достаточно высоким значением КИ для выполнения измерений с требуемой точностью ( $\pm 1$  °С). Простым способом оценки КИ является размещение на исследуемой поверхности пленки из материала с высоким КИ, например, электротехнической изолен-ты. Если значение КИ неизвестно с требуемой точностью, то его влияние на измеренные значения температуры можно оценить путем изменения значения КИ, вводимого с пульта управления тепловизором, при одновременном визировании одного и того же участка объекта контроля. Диапазон отсчетов температуры, полученных с помощью тепловизора, будет соответствовать диапазону изменения КИ. Следует помнить, что данная оценка зависит от абсолютной температуры, поэтому ее следует производить при рабочей температуре объекта.

Истинное значение КИ можно определить, измеряя истинную температуру поверхности объекта с помощью контактного термометра: при этом вводимую в тепловизор поправку следует изменять до

тех пор, пока показания тепловизора не будут совпадать с показаниями контактного термометра.

#### Качественная и количественная оценка результатов

Классификацию обнаруженных тепловых аномалий должен производить обученный оператор-термографист, имеющий уровень не ниже II-го по системе Ростехнадзора. Наилучшие результаты достигают при использовании цветных и черно-белых термограмм, анализ которых оператор проводит 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 естественный 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 "Цвета калия железа" (Iron) 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. Применяют следующие правила качественного анализа термограмм [176].

- ИК съемку следует дополнять визуальным осмотром или фотографированием. Видимые и ИК изображения, как правило, достаточно различны по тексту-

ре. Эффективным приемом диагностики является компьютерное совмещение видимого и теплового изображения одного и того же участка конструкции, или оконтуривание дефектных зон на видимом изображении после их обнаружения на термограммах.

- Оценку тепловых аномалий следует производить как по величине температурного перепада в зоне аномалии, так и путем сравнения с эталонной зоной. Эталонная зона должна выбираться аналогичной контролируемой и находиться в тех же условиях теплообмена (располагаться вблизи исследуемой зоны).

- При прочих равных условиях осмотр внутри помещения более эффективен наружного осмотра, поскольку при этом тепловая аномалия в зоне одного и того же дефекта имеет большую амплитуду на внутренней поверхности ограждающей конструкции. Кроме того, ряд дефектов, выявляемых изнутри, например, дефекты швов между потолочными плитами и стенами, могут не проявляться снаружи.

- Детальность осмотра ухудшается с увеличением расстояния до объекта съемки. При прочих равных условиях более эффективны тепловизоры с большим числом элементов в кадре, например, тепловизоры, использующие матричные приемники излучения, которые имеют формат кадра близкий или превосходящий формат стандартного видеоизображения.

- Теплые объекты, визируемые под большим углом, кажутся холоднее. Кроме того, на больших расстояниях объекты контроля кажутся более холодными за счет поглощения излучения в атмосфере.

- При панорамной тепловизионной съемке многоэтажных зданий верхние этажи часто выглядят теплее нижних, что связано с естественной конвекцией и особенностями разводки системы отопления. На окнах верхних этажей чаще заметен эффект отражения холодного неба.

- Тепловые аномалии отображаются на термограммах в виде областей повышенной или пониженной температуры, которые соответствуют 1) архитектурным деталям; 2) неоднородностям коэффициента излучения поверхности; 3) неоднородностям теплообмена с окружающей средой; 4) дефектам различного типа.

- При положительной разнице температур между внутренними помещениями и наружным воздухом мостики холода выглядят более холодными при осмотре изнутри и более теплыми при осмотре снаружи.

- При положительной разнице температур между внутренними помещениями и наружным воздухом места протечки воздуха выглядят более холодными при осмотре изнутри и более теплыми при осмотре снаружи, если давление в данном помещении выше наружного давления; при инверсии давления места протечки выглядят более холодными как на внутренних, так и на наружных поверхностях.

- Давление воздуха внутри зданий зависит от направления и скорости ветра, конструкции вентиляционной системы и температурного напора и может различаться в различных зонах. В многоэтажных зданиях давление внутреннего воздуха на нижних этажах зачастую выше, а на верхних этажах – ниже, чем давление наружного воздуха. Эффект изменения давления приводит к тому, что некачественные межпанельные швы в одном и том же здании могут выглядеть на термограмме теплее или холоднее, чем соседние участки в зависимости от местоположения шва по высоте здания. При этом решающим фактором отнесения шва к дефектным или бездефектным является сам факт наличия температурного градиента по сравнению с соседними зонами независимо от его знака.

- Неокрашенные металлические элементы зданий и сооружений выглядят, как правило, более холодными, чем они есть на самом деле, за исключением ситуаций, когда имеет место интенсивная внешняя подсветка.

- При анализе влагосодержания строительных конструкций, в особенности, чердачных помещений, следует установить, проникает ли влага снаружи или изнутри, для чего необходимо знать особенности возведения и эксплуатации здания. В зависимости от наружных условий, участки промокания кирпичной кладки и панелей могут выглядеть как теплее (вследствие пониженного термического сопротивления), так и холоднее (вследствие поверхностного испарения) соседних участков. Перерывы в ходе строительства, сопровождающиеся, например, интенсивными дождями, приводят к появлению обширных влажных участков стен, которые сохраняются в течение длительного времени после введения сооружения в эксплуатацию.

- Горячие радиаторы, расположенные внутри помещений, создают отчетливые области повышенной температуры на наружных поверхностях, как правило, под окнами, что может ошибочно трактоваться оператором как наличие дефектов.

- Существенные аномалии в области окон, напоминающие на термограмме изображение факела, обусловлены открытыми форточками или рамами.

- Изображения тепловых аномалий с резкими границами зачастую соответствуют поверхностным эффектам или неравномерному солнечному нагреву, что легко идентифицируется при визуальном осмотре. В целом, тепловые аномалии в зоне протечек воздуха или воды имеют более резкие границы, чем тепловые аномалии над скрытыми дефектами теплозащиты.

- При съемке окон следует иметь в виду, что при определенных углах визирования тепловизор будет фиксировать отраженное излучение неба, температура которого может изменяться от температуры окружающего воздуха (при низкой плотной облачности) до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (при ясном небе).

- Изображения солнечных бликов сдвигаются при перемещении оператора относительно объекта контроля, тогда как собственно температурные эффекты не

изменяют своей текстуры при изменении ракурса съемки.

- При анализе тепловых аномалий и при определении сопротивления теплопередаче необходимо учитывать разброс температур в отдельных помещениях сооружения (меняющийся температурный напор).

- При диагностике межпанельных швов, дополнительно к эффекту изменения давления внутреннего воздуха, на вид термограммы существенное влияние оказывает тип дефекта: простое изменение теплового сопротивления при герметичном шве, или, что бывает чаще, нарушение герметичности шва, ведущее либо к утечкам теплого воздуха из помещения наружу (при повышенном давлении внутри), либо к натеканию холодного воздуха извне (при пониженном давлении внутри).

*Количественный* анализ тепловых аномалий производят 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 23-02-2003. Степень опасности аномалий оценивают по:

- дополнительным потерям тепла через дефект;
- несоответствию экспериментальных значений сопротивления теплопередаче требованиям СНиП 23-02-2003;
- возможным последствиям разрушения ограждающей конструкции вследствие дефекта (сдвиг точки росы на поверхность, коррозия материала стены, повышение влагопроницаемости и снижение за счет этого качества теплозащиты и т.п.);
- 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 °С при температуре наружного воздуха 0 °С свидетельствует о значительно более серьезном дефекте, чем такой же перепад, обнаруженный при температуре наружного воздуха –20 °С.

Действующие в настоящее время строительные нормы и правила содержат минимальные санитарно-гигиенические требования только по некоторым показателям воздушно-теплого режима. Нормируются: 1) температура воздуха в помещениях в отопительный период (в жилых комнатах квартир и общежитий +21 °С); 2) предельный перепад между температурой внутреннего воздуха и поверхности ограждений (между температурой внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены 4 °С, между температурой внутреннего воздуха и поверхности потолка 3 °С, между температурой внутреннего воздуха и поверхности пола 2 °С). В любом случае температура внутренних поверхностей не должна быть ниже температуры точки росы при расчетной зимней температуре наружного воздуха. В первую очередь это относится к зонам теплопроводных включений (диафрагм, сквозных швов из раствора, стыков панелей и гибких связей в многослойных панелях, жестких связей облегченной кладки и т.п.). Опция автоматического определения точки росы введена в ряд моделей "строительных" тепловизоров, например, серии ThermoCAM В фирмы FLIR Systems.

Если степень дефектности оценивают по измеряемым температурным перепадам  $\Delta T$  в зоне аномалии, то рекомендуется к серьезным дефектам относить такие, которые создают относительные перепады температуры на наружных поверхностях  $\Delta T / (T_{\text{внутр}}^{\text{возд}} - T_{\text{внеш}}^{\text{возд}})$  более 6 % при отсутствии протечек воздуха и более 12 % при наличии протечек воздуха. Соответственно при внутреннем осмотре эти критерии рекомендованы на уровне 15 и 25 %.



Если степень дефектности оценивают по сопротивлению теплопередаче, то дефектными признаются участки, в которых сопротивление теплопередаче понижено более чем на 15 %.

Следует заметить, что указанные критерии являются эмпирическими и требуют уточнения.

### 11.2.8. Иллюстрации

Ряд особенностей тепловизионной диагностики строительных сооружений проиллюстрирован термограммами на рис. 11.8 – 11.17 (см. цветную вкладку). Большинство результатов приведено для температуры наружного воздуха около  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (съемки фирмы "Инновация" в сибирско-уральском регионе).

Идентификацию и привязку дефектных участков целесообразно делать путем совмещения ИК и видимого изображения, как это показано на рис. 11.8, для чего можно применять как простые графические редакторы, так и встроенную в тепловизор опцию "слияния" (fusion).

Тепловизионная съемка индивидуальных жилых домов позволяет оценить качество теплозащиты и идентифицировать зоны основных утечек тепла для последующего ремонта (рис. 11.9).

На термограмме рис. 11.10, а виден дефект вертикального шва в жилом кирпичном доме с температурным градиентом на наружной поверхности до  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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. 11.10, б; при этом температурный градиент в зоне того же самого дефекта (рис. 11.10, а) составляет  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (следует обратить внимание на то, что кухонная мебель частично затеняет шов при внутренней съемке).

Возможность получения дополнительной информации в результате ИК съемки по сравнению с визуальным осмотром проиллюстрирована на рис. 11.11. Пониженное давление в вентиляционной шахте приводит к присосам холодного атмосферного воздуха по всей высоте здания с амплитудой температурной аномалии до  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 11.12 показаны две термограммы, наглядно показывающие различие между бездефектными и дефектными швами при ИК съемке внутри помещений.

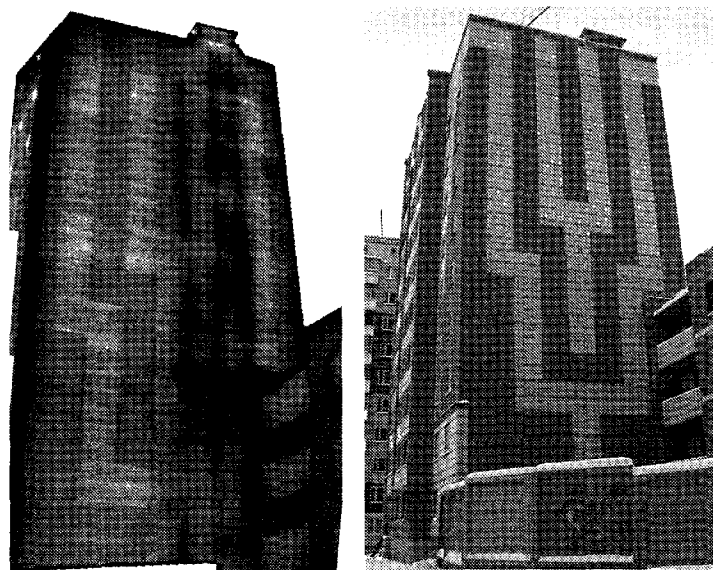
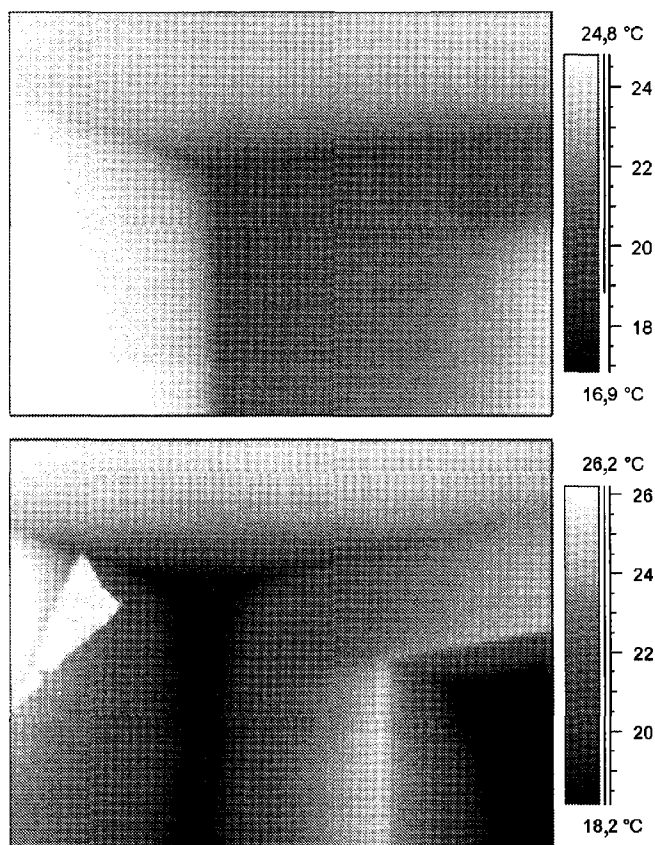


Рис. 11.11. Присосы атмосферного воздуха через неплотную кирпичную кладку в зоне вентиляционного канала



**Рис. 11.12. Бездефектный (вверху) и дефектный вертикальный шов** (съемки внутри помещения, температурный градиент в зоне дефекта 11 °С)

Пример реализации принципа активного ТК приведен на рис. 11.13, где вследствие натекания холодного атмосферного воздуха расслоение между декоративной штукатуркой и основной стеной видно в виде обширной холодной зоны темного цвета с амплитудой температурного сигнала около 2 °С. В других подобных случаях закрытое расслоение может характеризоваться локальным перегревом благодаря солнечному излучению. 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. 11.3).

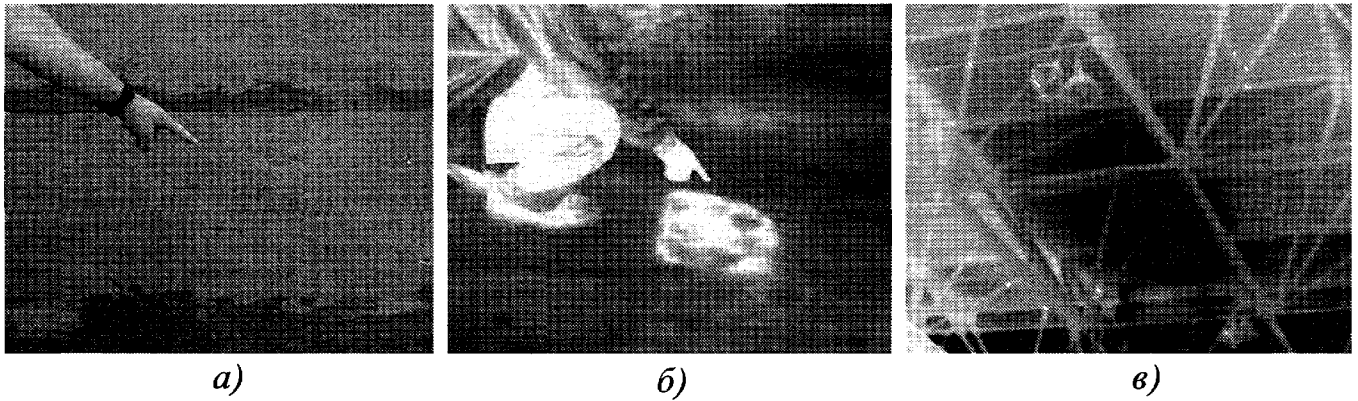
На рис. 11.14 представлена термограмма фасада административного здания со сплошным остеклением, на которой

отчетливо виден перегрев четвертого этажа (средняя температура +4,7 °С) по сравнению со вторым этажом (средняя температура –2,1 °С); температура окружающего воздуха на момент съемки была –4,0 °С. Оптимизация разводки системы отопления в таком здании может обеспечить экономию до 20 % тепловой энергии.

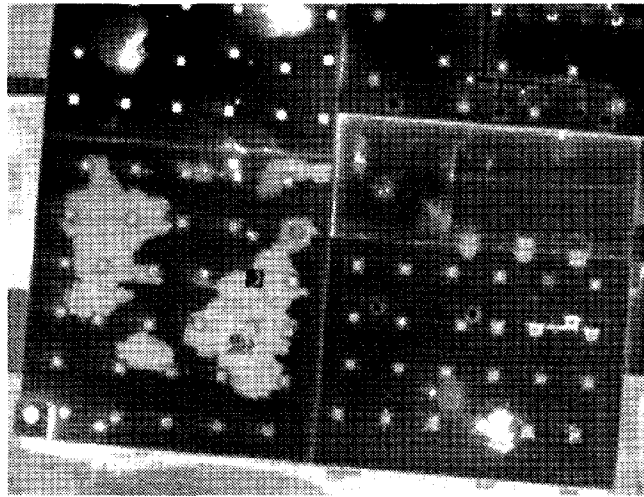
Термограмма рис. 11.15 иллюстрирует существенные сквозные дефекты двух вертикальных швов между стеновыми панелями главного корпуса котельной. Как отмечалось выше, панельные здания являются удачным объектом для тепловизионной съемки, которая может служить, в том числе, и инструментом судебной экспертизы. Пример термограммы торца жилого здания с многочисленными дефектами межпанельных швов показан на рис. 11.16, а, а соответствующая бинарная карта дефектов, полученная путем анализа термограммы, представлена на рис. 11.16, б.

Тепловой метод весьма эффективен при анализе работы систем отопления, например, при разводке и пуске отопления в новых жилых зданиях. Тепловые поля двух радиаторов, один из которых прикрыт, показаны на рис. 11.17. На практике, подобные обследования можно проводить с помощью ИК термометров.

Диагностика кровли крыш проиллюстрирована рис. 11.18, 11.19. При визуальном осмотре контраст зон повышенной влажности по сравнению с бездефектными участками невелик даже в случае поверхностной влаги, а обнаружение скрытых "водяных карманов", как правило, невозможно в принципе (рис. 11.18, а). При правильно выбранном времени тепловизионной съемки за счет высокой теплоемкости воды зоны ее скопления видны теплыми в вечернее время и холодными в первую половину дня (рис. 11.18, б). При внутренней съемке такие зоны видны холодными (см. термограмму на рис. 11.18, в, полученную с нулевой отметки турбинного



**Рис. 11.18. Тепловизионное обследование плоских крыш:**  
*а* – фотография участка крыши; *б* – ИК термограмма участка *а*;  
*в* – "водяной карман" в кровле крыши турбинного зала ТЭС при внутренней съемке



**Рис. 11.19. Воздушная съемка плоской кровли крыши  
 производственного корпуса с борта самолета:**  
 светлые области на термограмме соответствуют влажным участкам  
 (с разрешения Г. Стоктона, Stockton Infrared Services, США)

зала одной из российских ГРЭС; температурный градиент в этом случае составил  $8^{\circ}\text{C}$ ). Панорамная термограмма плоской крыши, полученная с борта самолета, представлена на рис. 11.19. Многочисленные влажные участки кровли надежно идентифицируются в виде теплых пятен.

Рано утром 17 июля 1997 г. обрушились перекрытия казармы Томского высшего военного командного училища связи (ТВВКУС), в результате чего погибли 12 курсантов. Первая тепловизионная съемка была выполнена 25 июля, т.е. спустя 8 дней после катастрофы при благоприятных погодных условиях (отсутствие ветра, дождя и прямой солнечной за- светки развалин в течение нескольких

дней) [176]. Неожиданным результатом обследования явились слабые локальные повышения температуры, обнаруженные в 5-ти из 24-х стыков сохранившихся ригелей перекрытия и вертикальных колонн. Амплитуда этих сигналов изменялась от  $0,8$  до  $1,5^{\circ}\text{C}$ , в то время как шумовые флуктуации температуры, в том числе и в зонах переходов от штукатурки к оголившейся кирпичной кладке, составили только  $0,3^{\circ}\text{C}$  (рис. 11.20, *а*. См. цветную вкладку). Поскольку изменения излучательных свойств материалов, равно как и возможный эффект АЧТ, характерный для ниш и углублений, пришлось отбросить, в качестве вероятной причины обнаруженных тепловых аномалий, другими объяс-

нениями были названы 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, т.е. снизились до шумового уровня (рис. 11.20, б); важно отметить, что повторная съемка имела место при практически идентичных погодных условиях. Тем не менее, возникновение температурных сигналов такой амплитуды вследствие тепломеханических эффектов при монотонном нагружении противоречит теории, а гипотеза циклических нагрузок не была подтверждена.

С.Г. Корниенко была проведена ИК съемка водовода плотины ГЭС, в результате чего были выявлены зоны аномальной тепловой инерции бетонного покрытия, предположительно связанные с зонами напряженно-деформированного состояния бетона [183]. Кроме того, очевидным результатом обследования явилась сравнительная оценка влагосодержания в бетоне.

Специфическим строительным объектом являются взлетно-посадочные полосы и другие дорожные покрытия аэродромов. В работе [184] 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 (ground penetrating radar).

Аналогичный принцип ИК термографической съемки используют при выявлении расслоений в дорожных покрытиях мостов (величина температурного градиента достигает 2...5 °С). Данная техника описана в стандарте США ASTM D4788 [185]. Тепловизор устанавливается

на автомобиль, движущийся со скоростью 16 км/ч. ИК термограммы записывают на видеопленку и параллельно ведут видеозапись для того, чтобы при последующем сравнении данных по двум каналам исключить поверхностные помехи (заплатки и т.п.). Службы контроля мостов на Западе рассматривают ИК термографию как весьма привлекательный метод, хотя его эффективность зависит от погодных условий и состояния покрытия. В качестве недостатка упоминается невозможность определить глубину залегания дефектов, возникающих 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 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 контактной сети, в особенности, если речь идет о подземной части опор. Обычно эту проблему решают, используя метод акустической эмиссии. Тем не менее, в работе [186] сообщается о тепловизионных исследованиях, выполненных в электрической компании Румынии RENEL. Установлено, что солнечный нагрев железобетонных опор позволяет выявить дефектные зоны, образующиеся как вследствие низкого качества строительства, так и в результате старения. Качественный бетон характеризуется равномерным температурным полем,

в то время как дефектные участки приводят к повышению температуры амплитудой до 3 °С. По данным авторов, минимальный размер обнаруживаемой дефектной зоны составил 150 × 150 мм, однако статистическая надежность такой оценки вызывает сомнение.

### 11.3. АКТИВНЫЙ ТК ПРОИЗВЕДЕНИЙ ИСКУССТВА

#### 11.3.1. Общие сведения

В передовых странах все больше внимания уделяют сохранению художественных ценностей старины, включая памятники архитектуры, скульптуры и живописи. В течение многих лет действует соответствующая программа ЮНЕСКО, а в ряде стран, таких как Италия, Франция, Германия, выполняются 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 метода весьма велик: от аэросъемки археологических раскопок для обнаружения скрытых в почве объектов и сооружений до анализа отдельных частей скульптур с целью подтвердить аутентичность материала или установить факт реставрации (подделки). В исследованиях применяют принципы как активного ТК, так и пассивную ИК диагностику, направленную на выявление стационарных различий в температуре и излучательных свойствах материалов [187 – 193].

В течение многих лет, в кооперации с Институтом технологии конструкций ИТС-CNR (Италия), автор участвовал в ИК термографической диагностике настенных фресок и других предметов искусства в Италии [187, 190, 191]. Были использованы процедуры обработки экспериментальных данных, заимствованные из активного ТК материалов и изделий. 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 теплопередачи велики, и последовательности термограмм следует 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.

#### 11.3.2. Настенные фрески

Типичная настенная фреска представляет собой многослойную композицию, включающую слой наружной краски, внедренной в основу (штукатурку), слой специальной штукатурки (называемой в Италии *arriccio*), связующий слой (*mortar*) и поддерживающую стену (рис. 11.21). Наиболее опасными дефектами являются отслоения штукатурки толщиной 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

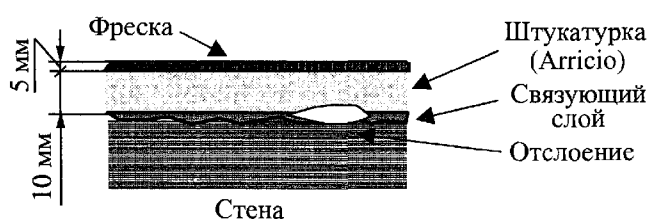
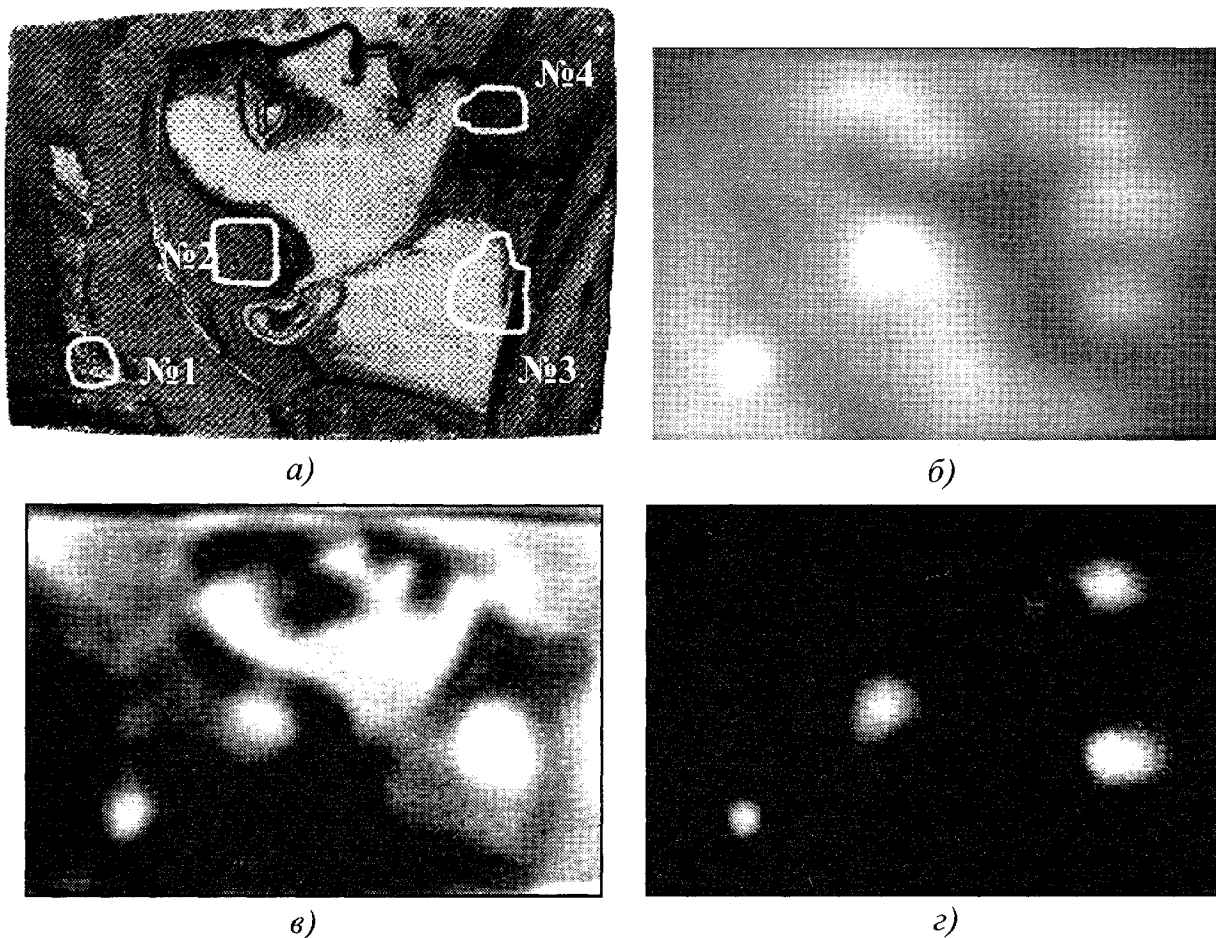


Рис. 11.21. Структура настенной фрески

стимуляции фресок используют главным образом слабый нагрев потоком воздуха или с помощью оптических источников в течение нескольких минут, в результате чего температура поверхности фресок повышается не более чем на 5...10 °С относительно окружающей среды [190, 191]. В ряде случаев для обнаружения существенных неоднородностей достаточно естественных изменений температуры в помещении, где находится фреска. Оптический нагрев может быть как распределенным, так и линейчатым (в последнем случае необходимо сканировать объект с помощью линейного нагревателя, при этом возможно выявление поверхностных трещин). Как правило, необходимо накопление и соответствующая обработка последовательностей термограмм, т.е. использование динамических эффектов теплоте-

редачи, с целью повысить отношение сигнал/шум. Регистрация отдельных термограмм неэффективна из-за значительного уровня шума, подавить который можно путем обработки температурных сигналов во временной (частотной) области.

Алгоритмы ТК обрабатывали на образцах, которые содержали дефекты, типичные для старинных настенных фресок [191]. Пример такого образца, названного "Голова Аполлона", изображен на рис. 11.22, а. Дефекты № 1 и № 4 представляли собой пластины губчатого материала, размещенные между слоями штукатурки в процессе ее отверждения; Дефектами № 2 и № 3 являлись воздушные полости. Параметры дефектов, приведенные в табл. 11.6, были оценены методом голографической интерферометрии и тепловой томографии.



**Рис. 11.22. ТК стандартного образца настенной фрески "Голова Аполлона" [187]:**

- а* – фотография образца и схема расположения дефектов;
- б* – термограмма при 270 с (оптимальный момент наблюдения,  $S = 0,8$ );
- в* – максиграмма (получено из исходной последовательности,  $S = 1,5$ );
- г* – максиграмма (трехмерная нормализация,  $S = 3,4$ )

## 11.6. Параметры дефектов в образце фрески (рис. 11.22, 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

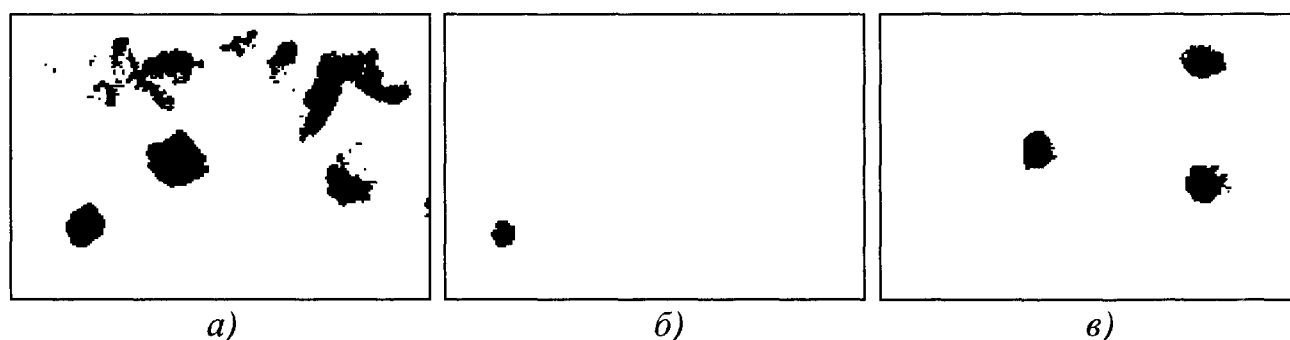
Образец нагревали в течение 30 с оптическим излучением с плотностью мощности около  $1 \text{ кВт/м}^2$ , полное время анализа процесса было равно 900 с, при этом записывали до 300 термограмм. Предшествующие эксперименты показали, что воздушные расслоения могут быть обнаружены за штукатуркой толщиной до 3 см в случае благоприятных условий контроля: однородная поверхность и равномерный нагрев. 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 количество 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 иллюстрируется термограммой на рис. 11.22, б, соответствующей оптимальному времени контроля  $\tau = 270 \text{ с}$ . Зона "глаза" фрески, равно как и зона между Дефектами № 3 и № 4, может быть расценена как содержащая дефект, хотя она просто поглощает больше энергии в силу темного цвета. В свою очередь, Дефект № 2 надежно выявляется, поскольку он расположен под темной зоной.

Совместное проявление скрытых дефектов и поверхностных помех хорошо видно на максиграмме рис. 11.22, в.

Наилучшим алгоритмом обработки результатов контроля фресок была признана *трехмерная нормализация*, описанная ранее. При анализе образца фрески в качестве маски была выбрана исходная термограмма при 10 с. Полученная после фильтрации максиграмма показана на рис. 11.22, г, где артефакты, обусловленные поверхностными шумами, существенно подавлены.

Другой пример развитой компьютерной обработки данных проиллюстрирован рис. 11.23. 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. 11.23, а), в то время как после фильтрации обнаруживаются даже "слабые" дефекты, отчетливо видные на двух последовательных тепловых томограммах рис. 11.23, б, в.

Преимущества трехмерной нормализации могут быть выражены количественно с использованием отношения *сигнал/шум*  $S$  (см. рис. 11.23). 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 два раза.



**Рис. 11.23. Тепловая томография стандартного образца фрески "Голова Аполлона" [187]:**

- а* – стандартная томограмма слоя с четырьмя дефектами;  
*б* – томограмма слоя с Дефектом № 1 (после трехмерной нормализации);  
*в* – томограмма слоя с Дефектами № 1, № 2, № 3 (после трехмерной нормализации)

Результаты ТК фрески Фоголино в г. Бергамо (Италия) представлены на рис. 11.24 (см. цветную вкладку). В результате контроля по фрагментам была выделена зона, выделенная на рис. 11.24, *а*. В конце нагрева термограмма данной зоны (рис. 11.24, *б*) обнаруживает существенную неоднородность фрески. В момент оптимального наблюдения термограмма становится более однородной и содержит слабый отпечаток внутреннего дефекта (рис. 11.24, *в*), который отчетливо виден на томограмме слоя, соответствующего толщине основного слоя штукатурки (рис. 11.24, *г*); при этом термограмма рис. 11.24, *б* использована в качестве маски трехмерной нормализации.

### 11.3.3. Иконы на дереве

Существует несколько техник выполнения икон, однако с точки зрения ТК важно то, что иконы, как и фрески, представляют собой многослойные композиции, весьма неоднородные в оптическом смысле. Так, например, стандартный образец иконы на дереве, показанный на рис. 11.25, был изготовлен согласно старинному итальянскому рецепту и включал 4 искусственных дефектов в виде фторопластовых вставок, расположенных между различными слоями [192]. Дефекты получили следующие названия: № 1 – "Пузырьки", № 2 – "Стержень", № 3 – "Точка" и № 4 – "Слеза". Некоторые ре-

зультаты развитой обработки данных были рассмотрены в п. 6.8.1 при описании способа полиномиальной аппроксимации.

Вышеописанный образец иконы был испытан другими авторами с использованием методов *ширографии* (shearography), *спекл-интерферометрии* (speckle pattern interferometry), *спекл-декорреляции* (speckle de-correlation) и ИК термографии [193]. В отношении ИК термографии был сделан вывод о том, что: 1) изображения дефектов обладают средним качеством; 2) стоимость аппаратуры относительно высока; 3) метод легко применим в условиях *in situ*. Несмотря на имеющуюся информацию о скрытых дефектах, оставались сомнения в отношении того, насколько реальные размеры дефектов соответствовали запланированным (например, опыт контроля углепластиковых композитов показал, что введение фторопластовой пленки может повлечь появление дополнительных воздушных промежутков между дефектом и основным материалом, в результате чего возмущающее действие дефекта усиливается). Например, тепловизионная оценка дефекта "Стержень" составила  $37 \times 7$  мм, тогда как по данным изготовителя его размеры были:  $28 \times 4$  мм.

Образец нагревали в течение 3...5 с трубчатыми кварцевыми лампами, что обеспечило около  $300 \text{ Вт/м}^2$  поглощенной мощности. Термограммы записывали с частотой от 10 до 50 Гц в течение 60 с посредством тепловизионной системы



ThermaCam SC3000. Наибольшее число термограмм в последовательности достигало 3000, что позволило эффективно применить преобразование Фурье.

Для обработки результатов применяли все основные алгоритмы, разработанные в импульсном ТК: тепловую томографию, фазовую термографию, полиномиальную аппроксимацию и др. Статистические результаты ТК приведены в табл. 11.7 (в качестве бездефектной области выбрана вся поверхность иконы, в качестве дефектной области рассмотрено два случая: три дефекта и один дефект).

Несмотря на то, что все дефекты создавали положительный температурный

сигнал  $\Delta T$ , некоторые процедуры обработки создавали изображения дефектов как "теплее", так и "холоднее" фона. Это приводило к изменению автоматически рассчитанных значений  $S$ , поскольку статистическая процедура предусматривала однотипное поведение всех дефектов. Поэтому, с точки зрения оптимизации процедуры обработки данных, следует использовать результаты расчета по одному самому глубокому дефекту ("Капля").

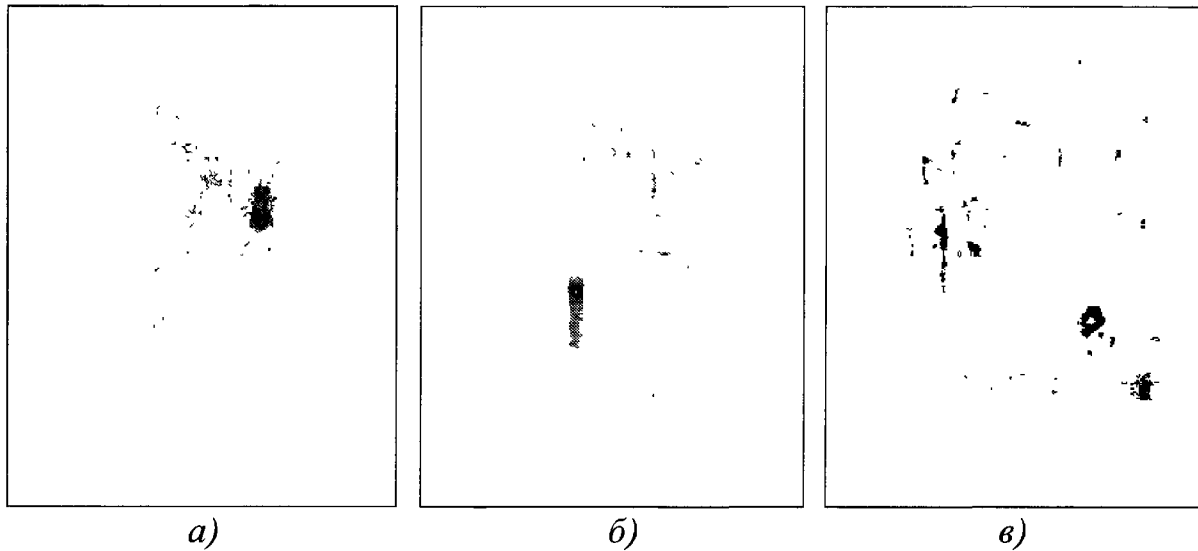
Дефект "Слеза" вообще не был обнаружен, по-видимому, в силу того, что глубина его залегания превышала предельную глубину обнаружения воздушных дефектов в данном образце.

### 11.7. Статистические результаты ТК иконы на дереве

(рис. 11.25, см. цветную вкладку)

Изображение	Отношение сигнал/шум $S$
<i>Анализ по трем дефектам: "Стержень", "Пузырьки" и "Капля"</i>	
Исходная термограмма (через 2,5 с после окончания нагрева)	1,29
Максиграмма (исходная последовательность)	3,91
Изображение полиномиального коэффициента $A_2$ (три члена аппроксимации) *	3,25
<i>Анализ по дефекту "Капля"</i>	
Изображение полиномиального коэффициента $A_3$ (три члена аппроксимации)	5,79
Изображение полиномиального коэффициента $A_1$ (четыре члена аппроксимации)	5,73
Фазограмма (аппроксимированная последовательность, частота 0,084 Гц)	5,72
Изображение полиномиального коэффициента $A_0$ (четыре члена аппроксимации)	5,66
Максиграмма (аппроксимированная последовательность)	5,37
Изображение полиномиального коэффициента $A_2$ (четыре члена аппроксимации)	5,32
Фазограмма (аппроксимированная последовательность, частота 0,042 Гц)	5,21
Фазограмма (исходная последовательность, частота 0,084 Гц)	5,08

\* Коэффициенты аппроксимации обозначены:  $A_0, A_1, A_2, \dots$



**Рис. 11.28. Томографическое представление дефектов в иконе на дереве:**  
*а* – слой 0,3...0,8 мм; *б* – слой 0,81...0,91 мм; *в* – слой 1,43...1,47 мм

Оптимальное исходное изображение (рис. 11.26, *а*, см. цветную вкладку) характеризовалось отношением сигнал/шум  $S = 1,29$ , причем наибольший вклад вносил дефект "Стержень", а "видность" двух других дефектов была низкой. Следовало ожидать, что все три дефекта будут обнаружены оптимальным образом в максиграмме, что доказывается изображением на рис. 11.26, *б* ( $S = 3,51$ ). Карта дефектов, полученная по максиграмме, показывает дефекты с вероятностью  $P_{c.d} = 80\%$  и  $P_{f.a} = 3\%$  (рис. 11.26, *в*).

При оптимизации по дефекту "Точка", максимальное значение отношения сигнал/шум отмечено в изображении полиномиального коэффициента  $A_3$  (рис. 11.27, *а*,  $S = 5,79$ , см. цветную вкладку). Результирующая карта дефекта характеризовалась  $P_{c.d} = 100\%$  и  $P_{f.a} = 3\%$  (рис. 11.27, *б*). Следует отметить, что в оптимальном по данному дефекту исходном изображении величина  $S$  была равна 1,2.

На рис. 11.28 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.

## 11.4. ДЫМОВЫЕ ТРУБЫ

### 11.4.1. 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 оценки качества выполненных ремонтных работ. Обследование ДТ для выдачи заключения о промышленной безопасности выполняют организации, имеющие соответствующую лицензию Ростехнадзора, а операторы-термографисты должны быть аттестованы по уровню не ниже II-го.

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 частого отсутствия сведений о ряде параметров, необходимых для моделирования теплопередачи в стволе ДТ, например, температуры газа и ее

изменения по высоте ДТ. Основания для проведения тепловизионной диагностики ДТ и газоходов изложены в нормативных документах, приведенных в Главе 12. Дополнительные сведения по устройству ДТ, теплотехническим расчетам и методическим аспектам тепловизионной диагностики можно найти в [46, 194 – 197]. Высокая информативность тепловидения при обнаружении скрытых дефектов ДТ была отмечена В.А. Дроздовым и В.И. Сухаревым еще в 1980-е годы (см. [167]), однако тогда тепловой метод не получил широкого распространения.

В настоящее время объем практических работ по инспекции ДТ непрерывно возрастает, чему способствует ряд причин. Во-первых, многие ДТ, построенные в 1950 – 1970-е годы, исчерпали свой рабочий ресурс и требуют тщательного обследования. Во-вторых, большинство ДТ в последние годы работают с недогрузом, то есть к ним подключено меньше котлов, чем это предусмотрено проектом. В-третьих, котельные многих предприятий 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. На рынке услуг по тепловизионной диагностике ДТ активны несколько российских фирм, например, "ОРГРЭС" (г. Москва), "ТТМ" (г. Санкт-Петербург), "Сибтехэнерго" (г. Новосибирск), "Инновация" (г. Томск).

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 монолит-

ных 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 пять лет проводить тепловизионный контроль с целью получить данные о состоянии их футеровок. Основное внимание при обследовании уделяется как визуальному осмотру состояния ДТ с земли с помощью бинокля, так и тепловизионной съемке, осуществляемой как минимум с четырех точек по всей высоте трубы и по периметру с последующей записью на карты флэш-памяти или видеомagneитофонную ленту. Перед выполнением работы следует ознакомиться с технической документацией, включая сведения о проведенных ремонтах, а также выбрать наиболее удобные точки наблюдения. Важно отметить, что тепловизионная съемка должна дополняться натурной, поскольку многие виды дефектов, влияющие на несущую способность ствола, не выявляются при тепловизионной диагностике.

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 сернокислотной коррозии;
- расширение кирпичной кладки (бочкообразность) между бандажными поясами;
- деформация верхней части трубы (крен) вследствие сульфатации кирпичной кладки.

Характерные дефекты ДТ со стволом из железобетона и причины их возникновения описаны в табл. 11.8. Одним из наиболее распространенных дефектов ДТ

с принудительной вентиляцией является перекрытие (засоренность) воздушного канала или неработающая (несмонтированная) вентиляционная установка.

**11.8. Характерные дефекты железобетонных дымовых труб**  
(по данным "ОРГРЭС", г. Москва)

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
<i>Железобетонный ствол</i>		
1. Дефектный шов	Шов бетонирования с наличием крупнопористого бетона и раковин	Некачественное исполнение шва, образование над швом крупнопористого бетона и раковин, в которых образуются трещины, и скапливается влага, проникающая в швы. Шов разрушается по всей окружности (дефект строительства) или частично
2. Разрушающийся шов	Шов бетонирования с признаками разрушения	Расслоение бетона, образование каверн и т.п.
3. Шелушение поверхностного слоя бетона	Разрушение поверхностного слоя бетона до крупного заполнителя	Пониженная морозостойкость бетона. Загрязнение исходных материалов глинистыми и илистыми примесями. Применение некачественных заполнителей. Низкая прочность вяжущей компоненты и повышенная пластичность смеси. Нарушение теплового режима обработки бетона (в большинстве случаев – дефект строительства)
4. Трещины	Трещина на поверхности ствола с односторонним или сквозным раскрытием	Продольный изгиб вертикальной арматуры. Выпучивание защитного слоя бетона. Воздействие силовых нагрузок и температурных перепадов. Расклинивающее действие продуктов коррозии арматуры. Недостаточная толщина защитного слоя. Расклинивающее действие воды в зимнее время
5. Глубокое и сквозное разрушение ствола	Разрушение бетона ствола. Отслаивание крупного заполнителя и арматуры от бетона, сквозные отверстия	Периодическое увлажнение и высыхание, цикл замораживание/оттаивание бетона, серноокислотная и сульфатная коррозии

Продолжение табл. 11.8

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
6. Крупнопористый бетон	Разрушение слоев бетона в виде гнезд небольших размеров или их скопления. Поверхностные раковины распространяются на глубину до 3...4 см, глубокие – на всю толщину конструкции	Недостаточная проработка и отсутствие послойной укладки бетона. Расслоение бетонной смеси от падения с большой высоты или сбрасывания в опалубку. Отсутствие послойного вибрирования или штыкования. Использование жесткой, сверхжесткой или слежавшейся бетонной смеси. Расслоение бетона во время транспортировки. Нарушение соотношения заполнителей. Перенасыщенность конструкции арматурой
7. Сколы в бетоне	Вздутие и отрыв конусообразного куска бетона с образованием углубления в виде кратера	Разрушение одного из заполнителей бетона, что влечет местные отрывы бетона с поверхности конструкции
8. Отслаивание и разрушение бетона	Поверхностное разрушение бетона, отслаивание лещадками, скалывание лещадками, скалывание бетона с обнажением арматуры	Брак при строительстве, воздействие собственной массы трубы и ветрового момента, понижение прочности бетона
9. Влажные участки бетона	Увлажнение и обледенение ствола	Конденсация паров воды, проникающих в стены трубы из дымовых газов. Бетон ствола разрушается по причине вымывания свободной извести из бетона, периодических циклов увлажнения/высыхания, замораживания/оттаивания с наружной стороны

*Теплоизоляция и паровлагоизоляция*

10. Разрушение теплоизоляции, включая диатомовый кирпич и минеральную вату	Разрушение теплоизоляции со стороны футеровки по толщине (образование массы белого цвета, местами с желтым налетом, порошкообразной массы)	Наличие большого количества влаги в виде паров и окислов серы в дымовых газах, которые мигрируют через футеровку в стены, где пары конденсируются и образуют кислоты
11. Разрушение паровлагоизоляции (битуминоля)	Хрупкая и содержащая трещины паровлагоизоляция	См. причины, указанные выше

Продолжение табл. 11.8

Наименование дефекта	Описание дефекта	Причины возникновения
<i>Футеровка</i>		
12. Деформация ("рост") футеровки	Выпуклости, выпирание и бочкообразное расширение кладки	Деформация футеровки вследствие сульфатной коррозии (сульфатация и последующая кристаллизация сульфатов). Насыщение футеровки кислотой и сульфатами, расширяющими кладку
13. Разрушение футеровки	Полное или частичное разрушение, обвал футеровки с образованием отверстий	Химическая коррозия (серно-кислотная и сульфатная коррозия футеровки). Увеличение футеровки в объеме вплоть до разрушения
14. Коррозия кирпича футеровки	Отслаивание кирпича лещадками	Сернокислотная и сульфатная коррозия футеровки
15. Трещины	Вертикальные, горизонтальные или наклонные трещины на поверхности футеровки с односторонним или сквозным раскрытием	Растягивающие усилия, воздействие температурных перепадов, разрушение кладки футеровки при образовании конденсата
16. Разрушение раствора кладки	Ослабление прочности и сцепления раствора кладки с кирпичом, частичное или полное выкрашивание и осыпание раствора в швах кладки	Химическая коррозия
17. Перекрытие зазора	Отсутствие зазора между футеровкой и стволом. Отсутствие компенсационного зазора в узлах сопряжения отдельных звеньев	Химическая коррозия футеровки, приводящая к ее расширению по периметру и соединению в распор со стволом (при этом полностью закрывается воздушная прослойка). Перекрытие компенсационного зазора вследствие "роста" футеровки

Преимуществом тепловизионного метода обследования ДТ и газоходов по сравнению с визуальным осмотром является возможность:

- 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;

- трудностями осмотра верхней части трубы из-за ограниченного угла зрения и крутого угла осмотра (устраняют путем удаления тепловизора от ДТ и применением узкоугольной оптики);

- нагревом ДТ по образующей и наличием отраженного излучения вследствие солнечной радиации (устраняют, производя осмотр ДТ рано утром, поздно вечером или в пасмурный день).

#### 11.4.2. Тепловизоры для диагностики дымовых труб

Тепловизоры для диагностики ДТ в целом аналогичны тем, что применяют в строительстве. Помимо чисто технических параметров важны массогабаритные показатели, а также возможность выполнять съемку в труднодоступных местах, например, с крыши близстоящих сооружений. При съемке в летнее время даже в 6...7 часов утра заметно влияние отраженного солнечного излучения, поэтому рекомендуется выбирать тепловизоры длинноволнового диапазона. Дымовую трубу снимают с 4...6 ракурсов, фиксируя от 4...8 термограмм по высоте для их последующей панорамной "сшивки", поэтому целесообразна цифровая запись. При осмотре ДТ целесообразно применять объективы с различным углом зрения (4; 7; 12; 18°), причем для получения более детальных изображений верхней части трубы следует применять узкоугольные объективы (4; 7°). При наличии в тепловизоре системы записи звука можно записывать речевые комментарии о наличии видимых глазом или с помощью бинокля текстурных особенностей на поверхности ДТ.

При визуальной инспекции ДТ, которая сопутствует тепловизионной, оценивают состояние грозозащиты ДТ и металлоконструкций, а также с помощью молотка Кошкарова (или более современных электронных устройств) определяют марку бетона. Отдельным видом обследования ДТ является геодезическая съемка, проводимая с целью определения крена трубы. Динамика крена с момента по-

стройки ДТ является одним из важнейших параметров, на основе которого прогнозируют ее остаточный ресурс

#### 11.4.3. Объект исследований

##### Стационарная теплопередача через трехслойную цилиндрическую стенку

В основе тепловизионной диагностики состояния конструктивных слоев ДТ и газоходов лежат процессы теплопередачи через цилиндрические и плоские стенки (см. п. 11.1.4).

Тепловой поток  $Q$  через цилиндрическую многослойную стенку определяют следующим образом (на примере трехслойной стенки рис. 11.29):

$$Q = \frac{T^{gas} - T_{out}^a}{R};$$

$$R = \frac{r_4}{r_1} \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{r_4}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_4}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_4}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_{out}}; \quad (11.17)$$

$$Q = \alpha_{in} (T^{gas} - T_{in}^w); \quad (11.18)$$

$$Q = \alpha_{out} (T_{out}^w - T_{out}^a), \quad (11.19)$$

где  $T^{gas}$  – температура горячего газа в ДТ;  $R$  – полное сопротивление теплопередаче ствола ДТ; остальные обозначения аналогичны введенным в п. 11.1.4.

Заметим, что в формуле (11.17) тепловой поток определен на единицу площади *внешней* поверхности ДТ.

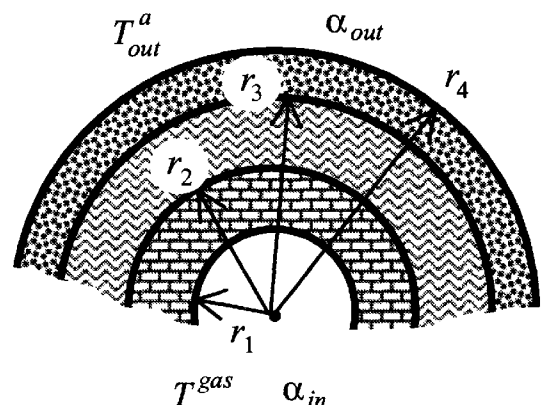


Рис. 11.29. Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Конструкции ДТ и газоходов  
и их характерные дефекты

Дымовые трубы в зависимости от степени агрессивности дымовых газов и их объема, климатической зоны и времени возведения имеют различную конструкцию.

В различных режимах работы дефекты ДТ дают на термограммах различные виды поверхностных температурных аномалий. Обобщенная характеристика температурных сигналов от дефектов различ-

ного типа дана в табл. 11.9 в зависимости от того, работает труба под разрежением или под избыточным давлением.

Газоходы, выполненные из кирпича, железобетонных панелей или блоков с футеровкой и теплоизоляцией, имеют те же дефекты, что и сами ДТ (табл. 11.9), но развивающиеся значительно интенсивнее; поэтому долговечность газоходов, например, при сжигании сернистого топлива, не превышает 5...10 лет.

**11.9. Температурные аномалии и соответствующие им дефекты в зависимости от давления дымовых газов в трубе \***

Тип дефекта	Характер температурного распределения		Примечания
	труба под разрежением	труба под избыточным давлением	
Дефектный шов бетонирования	Горизонтальная холодная линия	Горизонтальная теплая линия	
Трещина несущего ствола	Холодная линия	Теплая линия	Подтверждается при визуальном осмотре
Сквозная трещина несущего ствола	Холодная линия	Теплая линия	Подтверждается при визуальном осмотре
Понижение сопротивления газопрооницанию материала несущего ствола	Холодный участок	Теплый участок	
Разрушение несущего ствола	В зависимости от глубины разрушения – либо холодный, либо теплый участок		Устанавливается при визуальном осмотре
Коррозия футеровки до 60 %	Теплый участок	Теплый участок	
Обрушение футеровки	Теплый участок	Теплый участок	
Понижение сопротивления газопрооницанию футеровки	Теплый участок	Теплый участок	
Отсутствие теплоизоляции в прослойке между стволом и футеровкой	Теплый участок	Теплый участок	
Золовые отложения	Холодный участок	Холодный участок	Уточняется по проекту

\* Таблица предложена А.Н. Александровым.



#### 11.4.4. Проведение съемки и анализ результатов (иллюстрации)

Перед началом термографирования на плане предприятия намечают точки наблюдения (точки съемки). Отдельные поля зрения должны перекрывать друг друга, поскольку при наблюдении цилиндрических объектов боковые поверхности не поддаются количественному анализу из-за геометрических искажений и ослабления излучения вследствие действия закона Ламберта. Минимальное число точек наблюдения – 4, однако на практике их может быть до 6–7, в особенности, если это требуют условия местности.

Перед проведением съемки изучают имеющуюся техническую документацию по ДТ и газоходам, включая паспорта, акты ввода объектов в эксплуатацию, материалы предыдущих обследований, состав, объем и время проведения текущих и капитальных ремонтов.

Одновременно с тепловизионным обследованием проводят визуальный осмотр наружной поверхности ствола и газоходов в бинокль (монокль) или подзорную трубу. Рекомендуются выполнить фотосъемку ДТ и газоходов с помощью фотоаппарата или видеокамеры, причем по возможности с тех же точек съемки, которые намечены для термографирования.

По результатам визуального осмотра фиксируют дефекты ДТ и газоходов. Карта дефектов, выявленных по результатам термографической съемки, может быть самостоятельной или накладываться на карту визуально обнаруженных дефектов; при этом следует иметь в виду, что принятые в энергетике условные обозначения визуальных дефектов не могут использоваться при интерпретации результатов термографирования, которые сводятся к расшифровке обнаруженных теплых и холодных аномалий. Рекомендуются отдельно фотографировать серьезные дефекты, обнаруженные в результате визуального осмотра.

В ходе съемки измеряют:

- температуру наружного воздуха на каждой точке наблюдения;

- направление ветра;
- скорость ветра.

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 ДТ различной конструкции показаны на рис. 11.30 (см. цветную вкладку). Применение термографии для диагностики металлических ДТ, как правило, неэффективно, за исключением футерованных труб. В частности, на рис. 11.30, *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. 11.30, *б*). Обученный оператор в состоянии классифицировать состояние ДТ по критериям "хорошего", "среднего" и "низкого" качества, причем критерием оценки служит однородность температурного поля при сопоставимых условиях съемки и эксплуатации. Например, такая классификация может быть применена к железобетонным трубам, термограммы которых представлены на рис. 11.31 (см. цветную вкладку). Однородная термограмма соответствует бездефектной трубе (рис. 11.30, *а*), одиночная аномалия, отмеченная стрелкой на рис. 11.31, *б*, была идентифицирована как отсутствие минералватных матов, в то время как тепловые аномалии вида рис. 11.31, *в* могут быть вызваны множественными дефектами теплозащиты. С помощью термографической диагностики оценивают качество ремонта, которое может казаться удовлетворительным при визуальном осмотре. Такой случай изображен на рис. 11.32 (см. цветную вкладку), где ИК термограмма наложена на фотографию кирпичной трубы, в которой был выполнен ремонт вертикальной трещины. Термограмма наглядно иллюстрирует наличие присосов воздуха через отремонтированную трещину. Наиболее разнообразны дефекты железобетонных труб. Следует

отличать локальное ухудшение теплозащиты ствола, например, вследствие оседания или разрушения минералватных плит, от круговых теплых зон, обусловленных конструкцией трубы в районе слезниковых рядов (см. термограммы на рис. 11.31, в и рис. 11.33 цветной вкладки). 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.

Термограмма зоны примыкания газохода к стволу железобетонной ДТ (рис. 11.34 (см. цветную вкладку)) 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, проиллюстрирован термограммой на рис. 11.35 (см. цветную вкладку).

Для обработки термограмм используют входящие в комплект тепловизора компьютерные программы для просмотра, обработки данных и их распечатки в виде цветных и/или черно-белых изображений. На карту дефектов ДТ наносят светофорные площадки и балконы, отметки низа и верха проемов ввода магистральных газоходов и отметки консолей железобетонного ствола, если они просматриваются на термограмме. На карты дефектов газоходов наносят отметки верха и низа газохода, расстояния между температурными швами, размеры панелей и т.п. Масштабирование термограмм по вертикали производят по отметкам светофорных площадок, балконам и консолям железобетонного ствола, а также по бандажным кольцам (в случае кирпичных ДТ). На железобетонных ДТ масштабирование и привязку температурных аномалий производят по швам секций бетонирования, если они отчетливо видны на термограммах.

Идентификацию дефектов осуществляют путем теплотехнического моделирования характерных дефектов и сравнения экспериментальных и расчетных данных, причем в случае их совпадения данный

дефект считается наиболее вероятным. Следует иметь в виду, что в задачах тепловизионной диагностики ДТ, как и в строительной диагностике, одному и тому же значению  $\Delta T$  могут соответствовать различные комбинации конструктивных слоев и дефектов, что является отражением некорректности задачи диагностики. Поэтому заключение о типе дефекта во многих случаях носит субъективный характер и зависит от квалификации оператора-термографиста. Наиболее неопределенными параметрами теплотехнической модели ДТ являются: 1) температура газа и ее изменение с высотой; 2) коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности и их изменение с высотой. На практике ситуация осложняется тем, что температуру газа зачастую измеряют на выходе из котла, а не на входе в ДТ.

После идентификации дефектов их наносят на карту, которая может быть составлена либо только по тепловизионным данным, либо совместно с результатами визуального осмотра. Визуальный осмотр, включающий определение марки бетона, оценку состояния грозозащиты, а в ряде случаев данные геодезической съемки, является необходимым этапом обследования ДТ. Осмотр наружной поверхности ДТ производят с помощью бинокля для установления крупных дефектов: открытой арматуры и горизонтальных трещин, выпученных мест в защитном слое бетона, отслоений и сколов бетона, наличия крупнопористого бетона, мест течей и т.п. На железобетонных трубах внимательно осматривают швы бетонирования. Пример карты дефектов железобетонной ДТ, составленной в результате тепловизионного обследования, приведен на рис. 11.36 (см. цветную вкладку).

## 11.5. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Электроэнергетика является областью успешного применения тепловидения, поскольку обнаруживаемые температурные сигналы могут достигать десятков

градусов, что существенно облегчает их идентификацию на фоне помех. Ведущие энергетические компании (территориальные генерирующие компании – ТГК) России используют тепловидение в течение нескольких десятилетий для штатной проверки открытых и закрытых распределительных устройств (ОРУ и ЗРУ). Например, ФГУ "Мосгосэнергонадзор" в 2003 г. провело 170 тепловизионных обследований электроустановок, в результате чего было установлено, что 50 % установок требуют немедленного устранения обнаруженных неисправностей, 40 % – при ближайшем выводе их из эксплуатации, а 5 % – при ближайших регламентных работах.

Основные требования к тепловизионной диагностике электроэнергетических установок изложены в соответст-

вующих нормативах Минпромэнерго РФ (ныне Минэнерго РФ) [198, 199]. Второе издание РД 153-34.0-20.363–99 "Основные положения метода ИК диагностики электрооборудования и высоковольтных линий" обобщает многолетний опыт энергосистем ("Мосэнерго", "Ленэнерго", "Свердловэнерго", "Новгородэнерго", АЭС, завод "Мосизолятор", фирма "ОРГРЭС" и др.) и соответствует требованиям РД 34.45-51.300–97 "Объем и нормы испытаний электрооборудования". Методические особенности таких обследований описаны С.А. Бажановым [6]. Области применения ТК для испытаний электротехнических устройств кратко описаны в табл. 11.1 и более подробно – в табл. 11.10. Ниже приведено описание основных особенностей ТК отдельных типов электротехнических устройств, заимствованное из [6, 199].

#### 11.10. Применения ТК в электроэнергетике [6]

Электротехническое оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности и выполняемые виды работ
Генераторы	Межлистовые замыкания статоров. Ухудшение паек обмоток. Оценка теплового состояния щеточных аппаратов. Нарушения работы систем охлаждения статоров. Проверка элементов систем возбуждения
Трансформаторы	Очаги возникновения магнитных полей рассеивания. Образование застойных зон в баках трансформаторов за счет шламообразования, разбухания или смещения изоляции обмоток, неисправности маслосистемы. Дефекты вводов. Оценка эффективности работы систем охлаждения
Коммутационная аппаратура	Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер. Состояние внутрибаковой изоляции. Дефекты вводов, делительных конденсаторов. Трещины опорноστεржневых изоляторов
Маслонаполненные трансформаторы тока	Перегревы наружных и внутренних контактных соединений. Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток
Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений	Нарушения герметизации элементов. Обрыв шунтирующих сопротивлений. Неправильная комплектация элементов

Продолжение табл. 11.10

Электротехническое оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности и выполняемые виды работ
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

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 площади 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:

- безопасный характер тепловизионных обследований;
- снижение эксплуатационных расходов;
- улучшенное и более дешевое техобслуживание;
- рост прибыли.

#### 11.5.1. Методические особенности ТК электрооборудования

В РД 153-34.0-20.363-99 рекомендована следующая периодичность проведения тепловизионной диагностики.

- Электрооборудование распределительных устройств на напряжение 35 кВ и

ниже – 1 раз в 3 года, 110...220 кВ – 1 раз в 2 года, 300...750 кВ – ежегодно.

- Распределительные устройства (РУ) всех напряжений при усиленном загрязнении электрооборудования – ежегодно.

- Внеочередной контроль электрооборудования РУ всех напряжений проводится после стихийных воздействий (значительные ветровые нагрузки, короткие замыкания, землетрясения, сильный гололед и т.п.).

- Воздушные линии электропередачи (проверка всех видов контактных соединений (КС)): 1) вновь вводимые в эксплуатацию ВЛ – в первый год ввода их в эксплуатацию; 2) ВЛ, находящиеся в эксплуатации 25 лет и более, при отбраковке 5 % КС – ежегодно, при отбраковке менее 5 % КС – не реже 1 раза в 3 года; 3) ВЛ, работающие с предельными токовыми нагрузками или питающие ответственных потребителей, или работающие в условиях повышенной загрязненности атмосферы, больших ветровых и гололедных нагрузках – ежегодно; 4) остальные ВЛ – не реже 1 раза в 6 лет.

Как и в других областях применения ТК, критерием отбраковки электротехнических узлов под токовой нагрузкой служит температурный сигнал (перепад)  $\Delta T$ ,

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 зон контроля малы, а металлические поверхности контроля обладают хорошими отражающими свойствами.

В РД 153-34.0-20.363–99 вводятся следующие браковочные критерии: 1) *превышение температуры* – разность между измеренной температурой нагрева и температурой окружающего воздуха; 2) *избыточ-*

*ная температура* – превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях; 3) *коэффициент дефектности* – отношение измеренного превышения температуры КС к превышению температуры, измеренному на целом участке шины (провода), отстоящем от КС на расстоянии не менее 1 м.

В табл. 11.11 приведены значения допустимой температуры нагрева электрооборудования.

Состояние токоведущих частей оценивают по коэффициенту дефектности согласно данным табл. 11.12.

### 11.11. Допустимые температуры нагрева электрооборудования (согласно РД 153-34.0-20.363–99)

Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	температура нагрева, °С	превышение температуры, °С
1. Токоведущие (за исключением контактов и КС) и нетоковедущие металлические части: – неизолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами; – изолированные или соприкасающиеся с изоляционными материалами классов нагревостойкости по ГОСТ 8865–93:	120	80
У	90	50
А	100	60
Е	120	80
В	130	90
F	155	115
Н	180	140
2. Контакты из меди и медных сплавов: – без покрытий, в воздухе / в изоляционном масле; – с накладными серебряными пластинами, в воздухе / в изоляционном масле; – с покрытием серебром или никелем, в воздухе / в изоляционном масле; – с покрытием серебром толщиной не менее 24 мкм; – с покрытием оловом, в воздухе / в изоляционном масле	75/80 120/90 105/90 120 90/90	80/50 80/50 65/50 80 50/50
3. Контакты металлокерамические вольфрамо- и молибденосодержащие в изоляционном масле: на основе меди / на основе серебра	85/90	45/50

Продолжение табл. 11.11

Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	температура нагрева, °С	превышение температуры, °С
4. Аппаратные выводы из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с внешними проводниками электрических цепей: – без покрытия; – с покрытием оловом, серебром или никелем	90 105	50 65
5. Болтовые КС из меди, алюминия и их сплавов: – без покрытия, в воздухе / в изоляционном масле; – с покрытием оловом, в воздухе / в изоляционном масле; – с покрытием серебром или никелем, в воздухе / в изоляционном масле	90/100 105/100 115/100	50/60 65/60 75/60
6. Предохранители переменного тока на напряжение 3 кВ и выше (соединения из меди, алюминия и их сплавов в воздухе без покрытий / с покрытием оловом): – с разъемным КС, осуществляемым пружинами; – с разборным соединением (нажатие болтами или винтами), в том числе выводы предохранителя металлические части, используемые как пружины; – из меди; – из фосфористой бронзы и аналогичных сплавов	75/95 90/105 75 105	35/55 50/65 35 65
7. Изоляционное масло в верхнем слое коммутационных аппаратов	90	50
8. Встроенные трансформаторы тока: – обмотки; – магнитопроводы	– –	10 15
9. Болтовое соединение токоведущих выводов съемных вводов в масле / в воздухе	–	85/65
10. Соединения устройств РПН силовых трансформаторов из меди, ее сплавов и медесодержащих композиций без покрытия серебром при работе на воздухе / в масле: – с нажатием болтами или другими элементами, обеспечивающими жесткость соединения; – с нажатием пружинами и самоочищающиеся в процессе переключения; – с нажатием пружинами и не самоочищающиеся в процессе переключения	– – –	40/25 35/20 20/10

Продолжение табл. 11.11

Контролируемые узлы	Наибольшее допустимое значение	
	температура нагрева, °С	превышение температуры, °С
11. Токоведущие жилы силовых кабелей в режиме длительном / аварийном при наличии изоляции:		
– из поливинилхлоридного пластика и полиэтилена;	70/80	–
– из вулканизирующегося полиэтилена;	90/130	–
– из резины;	65/–	–
– из резины повышенной теплостойкости;	90/–	–
– с пропитанной бумажной изоляцией при вязкой / обедненной пропитке и номинальном напряжении, кВ:		
1 и 3	80/80	–
6	65/75	–
10	60/–	–
20	55/–	–
35	50/–	–
12. Коллекторы и контактные кольца, незащищенные и защищенные при изоляции классов нагревостойкости:		
А / Е / В	–	60/70/80
F / H	–	90/100
13. Подшипники скольжения / качения	80/100	–

Примечание. Данные, приведенные в таблице, применяют в том случае, если для конкретных видов оборудования не установлены другие нормы.

### 11.12. Оценка токоведущих частей по коэффициенту дефектности (согласно РД 153-34.0-20.363–99)

Коэффициент дефектности	Оценка состояния
Не более 1,2	Начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем
1,2 – 1,5	Развившийся дефект. Принять меры по устранению неисправности при ближайшем выводе электрооборудования из работы
Более 1,5	Аварийный дефект. Требуется немедленного устранения

Блики отраженного солнечного излучения особенно заметны при использовании диапазона длин волн 3...5 мкм, однако 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 (электро- и теплоустановки), в особенности, при ИК съемке токоведущих частей, расположенных в закрытых объемах.

Влияние ветра особенно заметно при обследовании контактов ОРУ, располо-

женных на значительной высоте и незащищенных другими сооружениями. Учесть влияние ветра можно, используя данные табл. 11.5 или следующую формулу [6]:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{0,448}, \quad (11.20)$$

где  $\Delta T$  – температурные сигналы, служащие в качестве критерия отбраковки. Формула (11.20) справедлива для скоростей ветра 1...7 м/с, при  $V > 8$  м/с измерение температуры становится ненадежными.

Дождь, туман и мокрый снег существенно снижают сигналы  $\Delta T$  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 тока 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  $\Delta T$  вытекает из закона Джоуля-Ленца:

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2. \quad (11.21)$$

При установлении связи между температурным сигналом и током нагрузки следует принимать во внимание тепловую инерцию контролируемых узлов. В частности, постоянная времени контактных узлов аппаратов составляет 20...30 минут, а вентильных разрядников – 6...8 часов. При определении тока нагрузки по амперметру следует учитывать кратковременные броски тока, связанные с коммутационными процессами или режимом работы потребителя. Например, температурные поля тиристорных панелей на железнодорожных тяговых подстанциях следует измерять в момент прохождения состава.

При обследовании сильноточных электроустановок (шин генераторов, реакторов) следует учитывать наличие мощных магнитных полей, которые способны исказить изображение на мониторах тепловизоров, выполненных на базе электронно-лучевых трубок. В современных моделях тепловизоров используют жидкокристаллические дисплеи, которые менее подвержены влиянию магнитных полей. В узлах с мощными электрическими токами могут возникать индукционные токи, нагревающие крепежные болты, пластины шинодержателей и другие элементы и создающие, таким образом, ложные отметки дефектов.

Коронный разряд также может создавать эффект перегрева объекта контроля, если использован тепловизор с коротковолновой границей чувствительности около 2 мкм (спектр короны близок к 1 мкм).

Поскольку компоненты токоведущих элементов электротехнических устройств могут состоять из разнородных металлов, иметь оксидную пленку, различную степень обработки поверхности, а также быть окрашенными, влияние коэффициента излучения на результаты измерения температуры весьма существенно. Простым способом получения надежных данных является сравнение с эталоном, выполненным из аналогичного материала (значение коэффициента излучения следует устанавливать согласно соответствующим справочным данным). Считается, что измерения объектов с коэффициентом излучения менее 0,2 (полированные металлы) практически невозможны из-за существенного и неконтролируемого вклада отраженного излучения. В ряде источников указано другое граничное значение коэффициента излучения: 0,6...0,7.

Угол визирования объектов контроля должен быть в пределах 0...40° для металлов и 0...60° для диэлектриков, однако при более точных измерениях желательно визировать по нормали, поскольку изменение коэффициента излучения с ростом угла визирования плохо контролируется



(при этом следует иметь в виду вклад отраженного излучения самого оператора). 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  $\operatorname{tg}\delta$ . Для того, чтобы оценить вклад  $\operatorname{tg}\delta$ , следует выполнить тепловизионные измерения без нагрузки, то есть при нахождении объекта только под рабочим напряжением.

### 11.5.2. Силовые трансформаторы, автотрансформаторы, масляные реакторы

Считается, что особенности тепловизионной диагностики трансформаторов изучены слабо, и тепловой метод рассматривается лишь 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 весьма 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 известной российской фирмы "ОРГРЭС" показал, что тепловидение способно выявить следующие неисправности [6]:

- 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;

- нагревы внутренних контактов обмоток с выводами трансформатора;

- витковые замыкания в обмотках.

Критериями дефектности служат нормативы работы электроустановок, содержащиеся в [198, 199]. 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.

Тепловизионному обследованию трансформаторов должно предшествовать ознакомление с конструкцией обмоток, системой охлаждения, длительностью и результатами эксплуатации, анализом повреждений трансформаторов подобного типа и т.п. Поверхности бака трансформаторов, термосифонных фильтров, систем охлаждения должны быть осмотрены и очищены от грязи, масла, ржавчины. Обследования проводят ночью или перед восходом солнца при отключенном освещении, в безветренную, недождливую погоду, при максимально возможной нагрузке в режиме холостого хода [6].

### 11.5.3. Маслонаполненные трансформаторы тока

Для данного типа трансформаторов ТК также является вспомогательным методом, и расшифровку результатов проводят с учетом результатов других испытаний (величины  $\operatorname{tg}\delta$  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  $120^\circ$  друг относительно друга, используя эталонный метод сравнения однотипных зон по каждой фазе. При обнаружении различий в температурах фаз

более, чем на 0,3 °С, производят более тщательный анализ при других погодных условиях и токовой нагрузке, а также проверяют симметричность токов в фазах. Несмотря на то, что основной целью испытаний 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 также описаны в [6, 199].

#### 11.5.4. 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 tgδ; 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.

#### 11.5.5. Выключатели масляные, воздушные, вакуумные, элегазовые

Внешние контакты и КС выключателей разнообразны по конструкции и в большинстве случаев могут быть проконтролированы тепловым методом. Общие сведения по тепловизионным испытаниям выключателей приведены в табл. 11.13.

### 11.13. Информация, получаемая при ТК выключателей (адаптировано из [6])

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
Баковые масляные выключатели: шина – токоведущий вывод; дугогасительная камера	То же

Продолжение табл. 11.13

Контролируемый узел	Объем получаемой информации
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

При диагностике масляных выключателей следует осматривать поверхности баков для каждой фазы с двух-трех сторон и при обнаружении локальных тепловых аномалий повторять измерения через 12...24 ч при изменившейся нагрузке. При нормальной работе контактов дугогасительных камер температурные аномалии практически отсутствуют и можно считать, что температура масла в баке и на поверхности бака одна и та же. При ухудшении состояния контактов температура масла возрастает за счет повышенного тепловыделения, и соответствующий участок поверхности становится теплее 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.

#### 11.5.6. Разъединители и отделители

В разъединителях и отделителях различных типов ИК контролю подлежат КС и изоляторы. Перегрев контактов вызван:

- 1) низкой надежностью плакированных медью контактных выводов;
- 2) окислением поверхности;
- 3) ослаблением контактного нажатия и т.п.

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 °С, в то время как перегрев загрязненного изолятора может достигать 2 °С.

#### 11.5.7. Маслонаполненные вводы

Высоковольтные маслонаполненные вводы размещаются на силовых трансформаторах и масляных выключателях. В первом случае нижняя часть ввода находится в масле с температурой +95 °С, 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 КС;

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 крышки).

### 11.5.8. Конденсаторы связи и делительные

Конденсаторы связи и делительные конденсаторы воздушных выключателей содержат три пакета по 90 секций рулонного типа, размещенных внутри фарфоровой крышки. Редко наблюдаемые отказы этих устройств обычно вызваны окислением масла и, как следствие, повышением  $\text{tg}\delta$ . При этом возникает общий перегрев крышки, 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  $\text{tg}\delta$ .

### 11.5.9. 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  $\text{tg}\delta$  на 15...20 % повышает температуру на поверхности конденсатора на 3...5  $^\circ\text{C}$ . Другой причиной перегрева может быть использование

конденсаторов различной емкости, что приводит к нежелательному перераспределению напряжения.

### 11.5.10. Вентильные разрядники

Вентильные разрядники, устанавливаемые на ОРУ, рассчитаны на напряжение от 15 до 500 кВ. Например, разрядники серии РВС рассчитаны 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.

Считается, что напряжение на каждом элементе разрядника линейно связано с его температурой, что позволяет оценить его косвенным образом. В целом, 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 "ОРГРЭС" предложены 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.

### 11.5.11. 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.

### 11.5.12. Контактные соединения распределительных устройств

Контакты ОРУ и ЗРУ являются массовыми объектами контроля в электроэнергетике. 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. Для диагностики контактов в литературе можно найти следующие критерии отбраковки (в пересчете на 50 %-ную нагрузку):

- перегрев до 5 °С означает бездефектный контакт;
- 5...35 °С – контакт подлежит обслуживанию при плановом ремонте;
- 35...85 °С – контакт подлежит обслуживанию при текущем ремонте;
- более 85 °С – необходим внеплановый ремонт контакта в срок не более 3-х месяцев.

В вышеупомянутом документе РД 153-34.0-20.363–99 разбраковка контактов, включая болтовые соединения, регламентирована по избыточной температуре (также в пересчете на 50 %-ную нагрузку). Если ее величина составляет 5...10 °С, то это означает начальную степень неисправности, которую следует держать под контролем и принимать меры по ее устранению во время проведения запланированного ремонта. Избыточная температура 10...30 °С соответствует развившемуся дефекту, который подлежит устранению при ближайшем выводе электрооборудования из работы. Наконец, избыточная температура более 30 °С идентифицирует аварийный дефект, который требует немедленного устранения.

Стопроцентный осмотр электрической подстанции средних размеров проводится в течение 2...3 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. Наиболее технологичным является фотографирование с помощью отдельных или встроенных цифровых фотоаппаратов и видеокамер, что позволяет записывать и обрабатывать видимое изображение совместно с ИК термограммой. ИК термометр МХ6ТD (Raytek, США) позволяет производить цифровое фотографирование зоны контроля с видимой лазерной отметкой, соответствующей точке измерения температуры.

Причинами дефектных сварных соединений являются подрезы, воздушные пузырьки, каверны, непровары, наплывы, трещины, шлаковые и газовые включения (раковины), незаделанные кратеры, пережог проволок 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 окно и вести съемку под углом к линии электропередачи (ЛЭП). Тепловую съемку ЛЭП возможно производить при скорости до 100 км/ч. В зарубежной практике вертолет часто зависает сбоку от опоры для получения оптимального изображения. Бортовую съемку рекомендуется выполнять в пред-рассветные или вечерние часы (в крайнем случае, при пасмурной погоде) из-за воз-

можных солнечных бликов от блестящих поверхностей и почвы. Считается, что 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 стального сердечника в соединителе провода и т.п. Опрессованный соединитель считается исправным, если его сопротивление превышает эквивалентный участок целого провода не более чем в 1,2 раза.

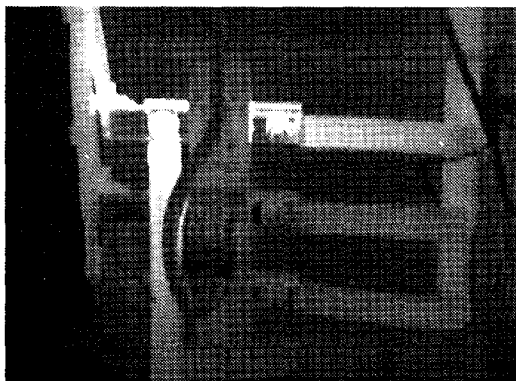
Для болтовых соединений характерны дефекты, обусловленные отсутствием шайб при соединении медной жилы с плоским выводом из меди или сплава алюминия, отсутствием тарельчатых пружин, недостаточной затяжкой болтов и т.п. Чем выше ток, тем чаще следует проводить переборку болтовых контактов с зачисткой поверхностей. Рекомендуется выполнять 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.

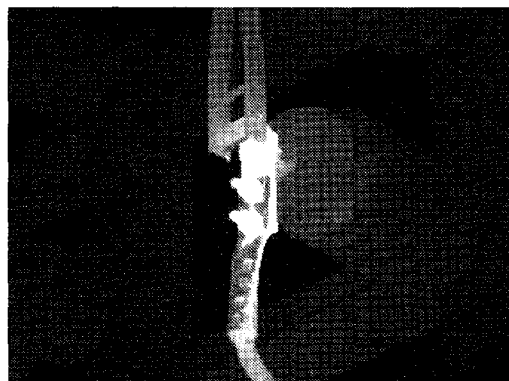
Две термограммы дефектных КС показаны на рис. 11.37.

### 11.5.13. Высокочастотные заградители

Высокочастотные заградители устанавливают на гирляндах изоляторов на подстанциях 110 кВ. Основными объектами ТК являются болтовые контакты, которые следует проверять 1–2 раза в год, используя приведенные выше критерии отбраковки.



Перегрев мощных шин  
на гидроэлектростанциях



Перегретый контакт на  
электрической подстанции

Рис. 11.37. Тепловизионная диагностика электрооборудования

#### 11.5.14. Подвесные фарфоровые и полимерные изоляторы

Гирлянды подвесных тарельчатых изоляторов характеризуются специфическим (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  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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 %.

#### 11.5.15. Силовые кабели

Тепловой контроль силовых кабелей проводят на стадии разработки, испытания 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.

#### 11.5.16. 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.

#### 11.5.17. Комплектные экранированные токопроводы

Токопроводы с секционированными экранами нагреваются, в основном, за счет вихревых токов, которые концентрируются на краях секций. Нарушение изоляции бабок металлоконструкций или экранов токопроводов приводит к образованию короткозамкнутых контуров, в которых циркули-

руют токи до 3000 А, что вызывает существенные локальные перегревы и может вызывать останов энергоблока.

В токопроводах с непрерывными экранами могут возникать дефекты в виде разрывов изоляции, что приводит к перегревам в зонах присоединения экранов токопровода к корпусам генераторов и силовых трансформаторов. Температура поверхности экранов, контролируемая в вышеуказанных зонах с помощью тепловизора, не должна превышать +110 °С, а температура участков, где возможно прикосновения человека, должна быть не более +60 °С.

### 11.5.18. Генераторы

#### Оценка состояния стали статора.

Тепловизионный контроль состояния стали статоров турбо- и гидрогенераторов позволяет выявлять зоны повреждения стали и оценивать глубину их залегания. Как правило, испытания проводят при вынутом роторе и наложенных на него намагничивающей и контрольной обмотках (гидрогенераторы контролируют также и без выемки ротора). Поверхность рас-

точки статора обычно окрашена и имеет высокий равномерный коэффициент излучения, при необходимости следует удалять ржавчину. Первую термограмму регистрируют до подачи напряжения в намагничивающую обмотку, затем регистрируют поле температуры через 20 и 45 минут в ходе нагрева статора и, наконец, через 15, 30 и 45 минут в процессе остывания. Методика оценки состояния стали статора по результатам ТК описана в [200]. Предусмотрен анализ следующих характеристик теплового поля: яркости пятна перегрева, формы и характера изменения яркости пятна после отключения обмотки нагрева (см. табл. 11.14). Идентификация дефектов зависит от места расположения обнаруженных перегревов. Например, поверхностные дефекты характеризуются максимальными температурными сигналами. Допустимость дефектов определяется предельной разностью максимальной и минимальной температуры зубцов в конце испытаний, которая не должна превышать 10 °С. Кроме того, в конце испытаний максимальные перепады температуры не должны превышать значений, приведенных в табл. 11.15.

### 11.14. Оценка состояния стали статора по результатам ТК (адаптировано из [200])

Яркость пятна	Место обнаружения локального нагрева	Временные характеристики	Описание локального нагрева
1. Слабая	Область головки зубца	Быстро возникает и быстро затухает	Поверхностное относительно слабое замыкание листов или их "заглаживание" при ударе
2. Сильная	То же	Быстро возникает, но имеет длительное послесвечение	1. Поверхностное, сильное повреждение листов. 2. Сильное повреждение листов на шейке зубца
3. Слабая	То же	Быстро возникает и быстро затухает	Относительно слабое повреждение листов в районе шейки зубца
4. Слабая	То же	Медленно возникает и медленно затухает	Относительно слабое повреждение листов в глубине паза



Продолжение табл. 11.14

Яркость пятна	Место обнаружения локального нагрева	Временные характеристики	Описание локального нагрева
5. Слабая и сильная	Соседние зубцы пакета (в пределах сегмента)	Медленно возникает и затухает	Повреждение в области дна паза
6. Слабая и сильная, переменная с усилением в отдельных точках	Соседние зубцы паза, часто два параллельных зубца	Быстро возникает, затухает с различной скоростью	Повреждение клином шейки зубцов
7. Чаше слабая	Пятно, захватывающее группу головок зубцов	Медленно возникает и медленно затухает	Глубинные зоны нагрева, в том числе неоднородности опрессовки и т.п.

### 11.15. Предельно допустимые перепады температуры в стали статоров (адаптировано из [199])

Марка стали	Э41 (1511)	Э42 (1512)	Э43 (1513)	Э44 (1514)	Э31 (3411)	Э32 (3412)	Э330 (3413)
					вдоль проката		поперек проката
Наибольшее превышение температуры, °С	22		17		18		25

Глубинные локальные источники тепла создают на поверхности слабые сигналы, всегда удовлетворяющие нормам перегрева, поэтому при их анализе используют специальную методику, приведенную в [199].

**Испытания на нагрев.** Испытания генераторов на нагрев проводят для выявления температурных аномалий на поверхности статора, оценки эффективности работы газоохладителей и теплообменников, степени охлаждения подшипников и т.п. согласно методике, изложенной в [201].

**Проверка паек лобовых частей обмотки статора.** Тепловизионным способом проверяют пайки, выполненные оловянистыми припоями [198]. Питание обмоток осуществляют постоянным током при снятых торцевых щитах турбогенера-

торов. В качестве источника постоянного тока применяют установки сушки генераторов методом потерь в обмотке при токе не более 50...70 % от номинального значения. В качестве эталона используют поверхность изолирующей коробочки паяного КС стержня, снабженного термопарой. Результатом ТК является термограмма коробочек паяных КС. Их ревизию проводят, начиная с тех коробочек, которые имели максимальную температуру.

**Щеточные аппараты.** Щетки проверяют с помощью как ИК термометров (предпочтительно, с лазерной наводкой), так и тепловизоров, что позволяет отрегулировать степень прижатия щеток, уравнять токи в параллельно работающих щетках, точнее выбрать уставки по температуре и т.п. Предельно допустимое пре-

вышение температуры для щеточного аппарата составляет 60 °С.

**Схема тиристорного возбуждения.** Проверяется тепловое состояние КС токоведущих проводников, тиристоров, резисторов, коммутационных аппаратов и др. устройств. Используются следующие критерии отбраковки: 1) абсолютная температура нагрева КС не должна превышать +75 °С, или перепад температуры должен быть менее 35 °С; 2) температуры тиристоров системы возбуждения не должны отличаться более чем на 30 %.

### 11.5.19. Электродвигатели

Направления использования тепловидения при испытаниях электродвигателей приведены в табл. 11.16.

Допустимые температуры перегрева обмоток статора определяются типом электроизоляционных материалов (соответствующая таблица приведена в [199]). Для коллекторов и контактных колец предельно допустимое превышение температуры составляет 60 °С. Абсолютная температура подшипников качения не должна превышать +100 °С, а подшипников скольжения +80 °С. В мощных электродвигателях оценивают работу системы охлаждения; при этом аномальные перегревы на поверхности корпуса могут быть вызваны витковыми замыканиями в катушках, дефектами стали статора, локальными нарушениями подачи воздуха и т.п.

### 11.16. Тепловой контроль электродвигателей (адаптировано из [199])

Контролируемый узел	Выявляемые дефекты
Корпус статора	Выявление витковых замыканий в катушках обмотки статора, недостаточные условия вентиляции
Коллектор и контактные кольца	Определение температур нагрева щеток, поводков и других элементов щеточного аппарата
Подшипники	Определение температуры нагрева
Коробки выводов	Проверка состояния КС выводов обмотки и кабелей
Система охлаждения	Обследование теплового состояния, проверка работоспособности

### 11.5.20. Воздушные линии электропередач

Надежность воздушных линий (ВЛ) во многом зависит от состояния КС проводов, контроль которых целесообразно проводить с помощью тепловизоров, устанавливаемых на вертолете или на автомашине.

Причинами аварий ВЛ зачастую являются:

- 1) дефекты сварки с обрывом проводов в шлейфах;
- 2) дефекты опрессования соединителей с вытягиванием провода;
- 3) обрывы проводов;
- 4) повреждения проводов распорками;
- 5) расщепление линейной арматуры с падением провода.

Отбраковка болтовых КС проводится по превышению температуры (ГОСТ 9024–90, если ИК-контроль ведется с вертолета; для опрессованных и сварных КС, а также для КС, выполненных скруткой, в качестве критерия дефектности применяют избыточную температуру или коэффициент дефектности.

Вертолетную тепловизионную съемку проводит бригада из двух операторов и технолога, знакомого с трассой прохождения ВЛ, при скорости полета 60...100 км/ч на 10...30 м выше ВЛ при боковом уклоне 30...60 м. Магистральные ВЛ следует контролировать ежегодно, а остальные – каждые 3...6 лет.

### 11.5.21. Электроустановки с напряжением 0,4...10 кВ

Электроустановки 0,4...10 кВ, как правило, выполнены в виде комплектных металлических ячеек, в которых размещены коммутационные аппараты, измерительные устройства, релейные и силовые сборки, кабели, токоведущие части. Тепловой контроль проводят по возможности при открытых дверцах или сквозь решетки с использованием критерия превышения температуры или избыточной температуры; в противном случае фиксируют лишь общую температуру корпусов ячеек и температуру выходящего воздуха.

При выявлении источника повышенного нагрева следует учитывать следующие факторы:

- 1) величину тока нагрузки;
- 2) характер нагрузки;
- 3) степень равномерности тока нагрузки по фазам;
- 4) местоположение дефектного узла;
- 5) способ измерения (непосредственно в точке перегрева или косвенно).

Выявленные с помощью тепловизора перегретые точки на ошиновке могут быть также обусловлены действием помех: солнечной засветкой, отражениями излучения близко расположенных горячих объектов, индукционным нагревом, а также локальными изменениями коэффициента излучения.

Электроустановки с напряжением 0,4...10 кВ контролируют тепловым методом один раз в 1...2 года в зависимости от нагрузки.

## 11.6. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### 11.6.1. Паропроводы, паровые и водогрейные котлы

Основные показатели качества тепловой изоляции (ТИ) теплотехнических установок, максимально допустимые теплотери через ТИ и температуры наруж-

ных поверхностей регламентируются соответствующими нормами [202].

Качество ТИ связано не только с предельными нормами теплотери, но и с расходом и стоимостью примененных материалов. Фактические теплотери 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 температура и теплотери на поверхности установок. Прежде всего, это относится к ТИ оборудования и паропроводов высокого давления и температуры, а также к котельным обмуровкам, где большинство теплоизоляционных материалов работает при предельных температурах. С учетом того, что каждый процент превышения норм теплотери 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. Применение для контроля ТИ контактных термощупов и преобразователей теплового потока (тепломера Шмидта, тепломера ИТП-2 и более поздних моделей) 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 теплотери через ТИ и оценка КПД 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 ТИ основного и вспомогательного оборудования и трубопроводов с температурой теплоносителя выше  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Согласно действующим нормативам, при температуре воздуха в помещении  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура на поверхности ТИ не должна превышать  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температуре теплоносителя равной или менее  $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и  $+48\text{ }^{\circ}\text{C}$  – при температуре теплоносителя  $+500\dots+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для объектов, расположенных на открытом воздухе, температура на поверхности ТИ не должна превышать  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  при металлическом покровном слое и  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  – при других видах покровного слоя.

Вследствие сложности и разнообразия подлежащего испытаниям оборудования электростанций его рекомендуется разбить на отдельные группы.

В котельных цехах испытывают трубопроводы питательной воды, водоперепускные трубы в пределах котла, пароотводящие 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. Результат обследования обмуровки котла на одной из российских ТЭС показан на рис. 11.38 (см. цветную вкладку). На фронтальной поверхности котла (рис. 11.38, *а*) температура обмуровки составила в среднем  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. в любом случае не соответствовала нормативу ( $+45$  или  $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от применяемых нормативов),

в то время как в зоне недавно отремонтированного смотрового люка она достигала  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  несмотря на то, что внешне зона ремонта выглядела качественной. В редко посещаемой персоналом зоне так называемой "рассечки", где температура окружающего воздуха может достигать  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , был обнаружен обширный участок разрушенной обмуровки с температурой до  $+153\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 11.38, *б*).

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 ТИ.

При обследованиях ТИ используют те же тепловизоры, что и при строительной диагностике, однако диапазон измеряемых температур должен быть расширен до  $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 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 фотосъемку обнаруженных дефектов, желательно в тех же ракурсах, что и при тепловизионной съемке.

Для сравнения с нормативными значениями результаты испытаний пересчитывают по нижеследующим формулам.

Удельные потери тепла  $q$  в Вт/м на 1 погонный метр изолированного трубопровода

$$q = q_L L, \quad (11.22)$$

где  $q_L$  – измеренные потери тепла с 1 м<sup>2</sup> теплоизоляции, Вт/м<sup>2</sup>;  $L$  – длина окружности теплоизоляции, м.

Приведенные потери тепла при температуре окружающего воздуха 25 °С в Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_{25} = q_L \frac{t - 25}{t - t_a}, \quad (11.23)$$

где  $t$  – температура теплоносителя в изолированных объектах, °С;  $t_a$  – температура окружающего воздуха, °С.

Температура поверхности ТИ при температуре окружающего воздуха 25 °С:

$$t_s^{25} = \frac{q_{25}}{q_L} (t_s - t_a) + 25, \quad (11.24)$$

где  $t_s$  – измеренная температура поверхности теплоизоляции, °С.

Тепловой поток определяют по известным значениям температур поверхности теплоизоляции и окружающего воздуха:

$$Q = 1,66 (t_s - t_a) + c [(t_s + 273)^4 - (t_a + 273)^4], \quad (11.25)$$

где  $c$  – числовой коэффициент, учитывающий коэффициент излучения поверхности и постоянную Стефана-Больцмана; для оштукатуренных, окрашенных и запыленных поверхностей  $c = 4,88 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>); для алюминиевого покровного слоя  $c = 2,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

### 11.6.2. 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 на стадии завершения ремонта 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. При этом рекомендуется производить запись на 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 гратом, песком, землей и другими посторонними предметами; 3) эксплуатационной загрязненностью внутренней поверхности котла из-за отложений в виде кальциевых соединений и оксидов железа.

Тепловизионный контроль труб поверхностей нагрева котла не позволяет однозначно оценивать характер внутренних отложений (необходимы последующие лабораторные исследования), но позволяет получить общую картину состояния котла в зонах возможного визуального осмотра. Ввиду небольших экономических затрат и эффективности данного метода, его рекомендуется проводить всегда, когда котел выводят из работы. Тепловой метод позволяет получить достоверную информацию на текущий момент времени с накоплением и использованием ее при последующих ремонтных работах и в эксплуатационных режимах.

### 11.6.3. Пруды-охладители

ИК съемка прудов-охладителей, фиксирующая картину распределения температуры по поверхности 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 °С по сравнению с расчетной для ТЭС мощностью 4 млн. кВт вызывает перерасход топлива примерно на 25 000 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 распределение 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 выполнять 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 может возникать зеркальное отражение, в результате чего точность определения истинных температур может быть низкой.

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 в цифровом, так и в аналоговом виде. На панорамной термограмме пруда идентифицируют участки сброса и забора циркуляционной воды, а также места несанкционированных сбросов воды, если таковые имеются.

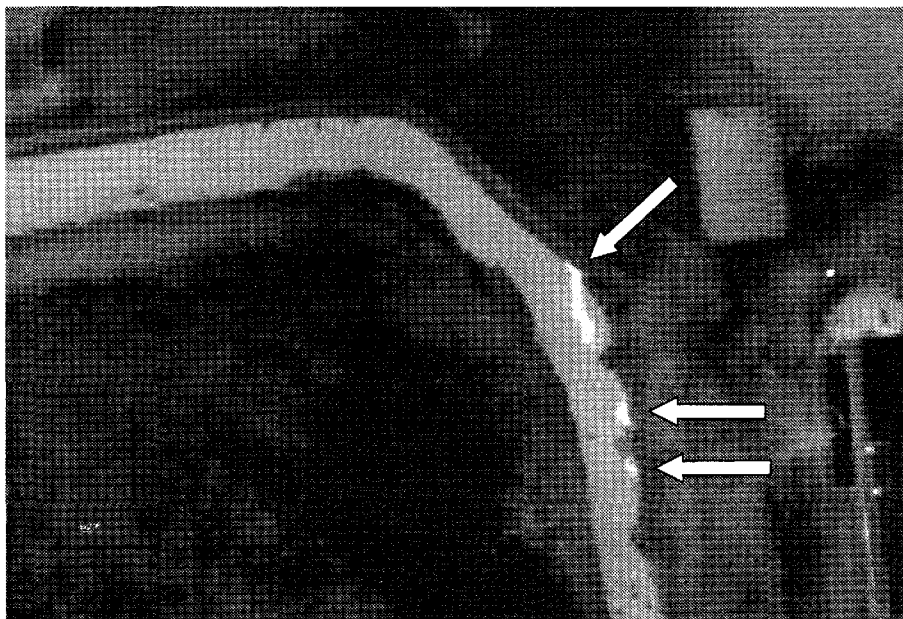
После анализа полученной информации можно сделать вывод об эффективности охлаждения воды и степени влияния различных факторов, мешающих охлаждению. Результаты тепловизионной съемки могут быть использованы для изменения теплового режима пруда-охладителя, что позволяет путем снижения температуры циркуляционной воды повысить глубину вакуума в конденсаторе турбины и соответственно увеличить мощность и КПД турбоустановки.

В качестве примера экологического мониторинга на рис. 11.39 показана термограмма мест несанкционированного сброса канализационных стоков в пруд. Сбрасываемые воды имеют более высокую темпе-

ратуру и их "хвосты" хорошо видны при воздушной съемке (на рис. 11.39 показаны стрелками).

#### 11.6.4. Тепловые сети

Контроль за состоянием 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 путем математического моделирования возможных нарушений теплового режима сетей (дефектов). Схематично обнаружение утечек воды из подземных труб показано на рис. 11.40. 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. Обследования проводят в ночное время с помощью портативного тепловизора, установленного на автомобиле.



**Рис. 11.39. Воздушный мониторинг мест несанкционированного сброса воды в пруд**  
(с разрешения Г. Стоктона, Stockton Infrared Services, США)

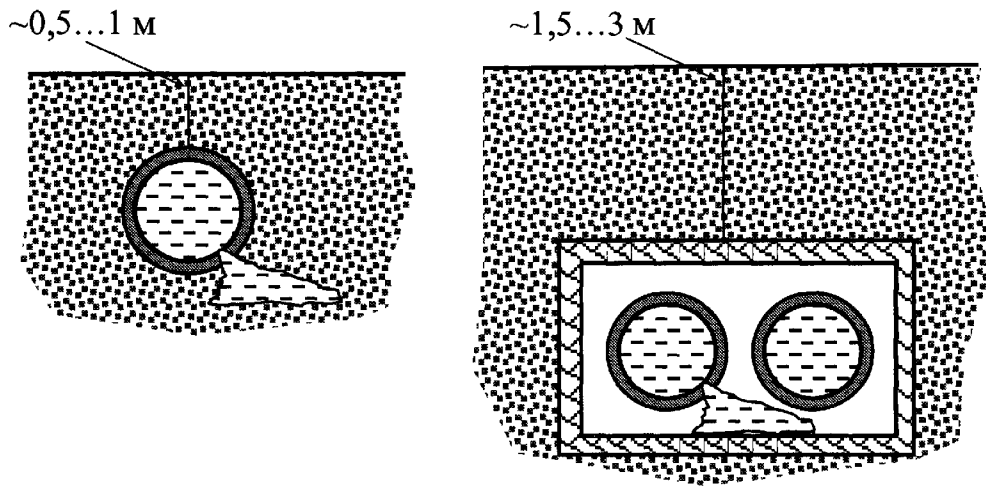


Рис. 11.40. Обнаружение утечек воды из подземных коммуникаций

Следует заметить, что проведение тепловизионной съемки во многих зарубежных странах облегчено небольшой глубиной залегания теплотрасс и отсутствием железобетонных лотков (левая схема на рис. 11.40). Для России более характерна ситуация, изображенная на рис. 11.40 справа, вследствие чего поверхностное температурное поле имеет более расплывчатый характер и утечки идентифицируются с высоким уровнем ложной тревоги. Тем не менее, еще в советский период карты тепловых сетей снимали в гг. Москве, Санкт-Петербурге и некоторых других городах, используя отечественные бортовые тепловизоры. Помимо утечек теплой воды, тепловизионная съемка позволяет уточнить схемы прохождения тепловых коммуникаций.

Подготовку к измерениям начинают с изучения участка тепловой сети: типа прокладки, конструкции ТИ, 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  $\Delta T_{\min}$ , определяемый по формуле

$$\Delta T_{\min} = \Delta T_{res} R \frac{\alpha R_0}{1 - R_0}, \quad (11.26)$$

где  $\Delta T_{res}$  – температурное разрешение (чувствительность) тепловизора, °С;  $R$  – проектное сопротивление теплопередаче,  $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности грунта,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R_0$  – 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  $\alpha$  на поверхности грунта определяют по формуле

$$\alpha = \beta \sqrt{V} \left( 6 + \frac{6,2}{V^2} \right), \quad (11.27)$$

где  $\beta$  – 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. При проведении измерений приборы устанавливают так, чтобы по-



верхность грунта находилась в прямой видимости под углом зрения не менее  $60^\circ$ . Вид и амплитуда распределения температуры над расположенной в грунте теплотрассой зависит от глубины ее залегания, сопротивления теплопередаче ТИ, теплопроводности почвы и разности температур почвы и теплоносителя. Как отмечено выше, в российских условиях теплотрассы расположены достаточно глубоко, и соответствующие поверхностные температурные сигналы размыты. Кроме того, текстура температурного поля в зоне утечки также зависит от естественного уклона труб, вследствие чего вода может выходить на поверхность вдали от места утечки, а температурное распределение может существенно отличаться от ожидаемого. Наилучшие результаты получают при съемке со значительной высоты (вплоть до борта вертолета, мотоделтаплана или непилотируемого самолета). При тепловизионной съемке теплотрасс необходимо учитывать влияние соседних инженерных сетей, отапливаемых подвалов зданий, тепловых камер и т.п. Одновременно измеряют температуру воды в тепловой сети и температуру окружающей среды. Результаты заносят в журнал записи измерений. Сопротивление теплопередаче базового участка тепловой сети определяют по данным натурных измерений или согласно

нормативно-технической документации по проекту участка сети. Пример термограммы городской теплотрассы, полученной с борта самолета, приведен на рис. 11.41, где хорошо прослеживается трасса подземной трубы и видна область существенной утечки теплой воды, отмеченная стрелкой (левая схема на рис. 11.40).

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.

В п. 11.19 приведены простые формулы для приближенной оценки глубины залегания трубопровода в почве в зависимости от измеренного температурного сигнала над трубопроводом, температур трубы, почвы и окружающей среды, а также коэффициента теплообмена на поверхности почвы.

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.



**Рис. 11.41.** Термограмма участка подземной теплотрассы, полученная аэросъемкой (с разрешения Г. Стоктона, Stockton Infrared Services, США)

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 земляных работ. Эффективность тепловизионной съемки можно повысить, используя дополнительно УЗ аппаратуру обнаружения утечек (течеискатели типа Ultraprobe).

### 11.6.5. Вакуумное оборудование турбоустановок

Качество вакуум-плотных соединений в турбинных установках ТЭС влияет на расход топлива. Штатный контроль степени вакуума по перепаду давления не позволяет идентифицировать дефектные места, а использование течеискателей неэффективно в силу чисто технических проблем, например, трудностей доступа к зонам контроля. Физическая основа применения ИК термографии связана с тем, 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.

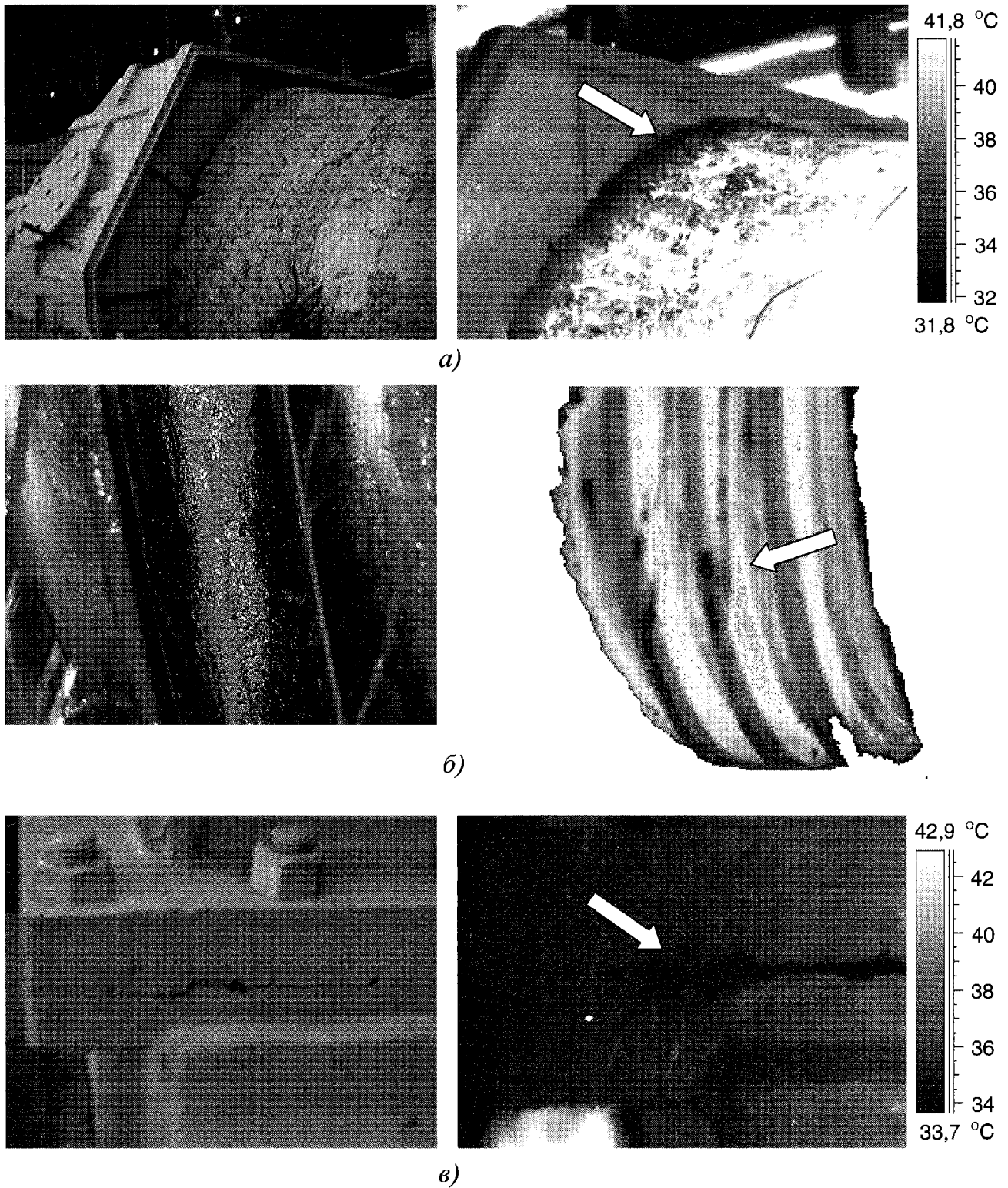
На атомной станции Peach Bottom внедрена программа использования ИК термографии для обнаружения мест натекания воздуха в вышеупомянутые компоненты. Подчеркивается, что роль данного метода – скорее качественная, нежели количественная [203].

Поскольку, степень вакуума и устройство 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 вакуум-плотных 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 дополнительных исследований. Целесообразно накопление атласа "бездефектных" термограмм, с которыми следует сравнивать результаты текущих осмотров.

Три иллюстрации дефектов вакуумного тракта, обнаруженных на одной из российских ТЭС, приведены на рис. 11.42 (дефекты отмечены стрелками).

## 11.7. АТОМНЫЕ СТАНЦИИ

Программы технического обслуживания типичной атомной станции предусматривают до 50 тысяч тестовых процедур, среди которых растет роль пассивной ИК термографии. В США тепловой метод внедрен на всех атомных станциях (см. также п. 11.10.5). В Великобритании на станции Neusham первые применения ИК термографии были связаны с диагностикой работы электродвигателей мощностью 1,6 кВт;



**Рис. 11.42. Обнаружение мест нарушения вакуума в турбоустановках тепловой станции:**  
*а* – зона между корпусом турбины и теплоизоляцией (средняя температура теплоизоляции +41 °С; понижение температуры в зоне дефекта до 8 °С); *б* – зона сварки ребра компенсатора (средняя температура на ребре +96 °С; понижение температуры в зоне дефектов до 6 °С);  
*в* – присос воздуха через трещину в корпусе турбины

затем тепловизионный контроль стали применять для диагностики коммутационной аппаратуры, клапанов и теплоизоляции. Примером удачного применения теплового

метода 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 энергетике, тепловидение до сих пор применяется слабо.

## 11.8. АВИАКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

В авиакосмической технике широко используют так называемые *новые материалы* (композиционные, сотовые, структуры металл-неметалл), 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 корпуса и панели космических ракет и самолетов, лопасти вертолетных винтов, компоненты двигателей и т.п. Срок службы соответствующих изделий, в том числе в агрессивной среде, может быть весьма велик, по крайней мере, если в них отсутствуют дефекты. Дефекты в новых материалах и изделиях из них 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 ThermoScore и EchoTherm (см. табл. 8.1). В данных системах исполь-

зован принцип *синтетической обработки термографических сигналов* (Synthetic Thermographic Signal Processing – STSP), составляющий ноу-хау фирмы. Сущность технологии STSP состоит в импульсном нагреве объекта, записи последовательности ИК термограмм с помощью тепловизора большого формата и высокой чувствительности, логарифмическом представлении данных, полиномиальной аппроксимации, анализе производных и составлении карт характерных времен теплопередачи (см. п. 6.5.3). Последнее достижение фирмы – разработка софтвера MOSAIQ, который позволяет синтезировать крупномасштабные изображения больших поверхностей контроля (фюзеляжа самолета) из набора отдельных термограмм.

### 11.8.1. Концепция применения ТК в авиации при выполнении ремонта

Американской фирмой Nordam Repair Division разработана концепция выбора оптимального метода НК при дефектоскопии, а также проверки и документирования результатов ремонта самолетных панелей [204]. 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 транспортабельной 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 TWI, используется для проверки авиационных конструкций, включающих следующие изделия:

- 1) углеродные, стеклопластиковые и кевларовые панели;
- 2) композиционные и металлические сотовые панели;
- 3) металлические и композиционные акустические панели;
- 4) экраны из нержавеющей стали, соединенные с алюминиевыми или композиционными акустическими обшивками.

На рис. 11.43 показан стандартный образец, имитирующий возможные дефекты воздухозаборников самолетов типа Boeing. Панель размером  $1 \times 0,6$  м состоит из алюминиевых сот толщиной 25 мм,

присоединенных к массивному алюминиевому листу посредством эпоксидного клея. С другой стороны, соты посредством того же клея соединены с перфорированной пластиной из стеклопластика, которая в свою очередь присоединена к тонкой сетке из нержавеющей стали (акустическому экрану). Искусственные дефекты размещены в двух слоях: между сотами и стеклопластиком, а также между стеклопластиком и сетчатым экраном. Для создания искусственных дефектов различного размера и конфигурации использована акриловая пленка и принудительное удаление части клеевой пленки, поскольку вставки из фторопласта и материала Grafoil, используемые в УЗ НК, характеризуются слабым термическим сопротивлением.

В качестве существенного преимущества ТК по сравнению с УЗ, как всегда, отмечается его более высокая производительность. В работе [204] описан пример ТК руля направления самолета Боинг-737 площадью примерно  $6,5 \text{ м}^2$ , который длился 3 часа и обнаружил ослабление связующего материала композита в месте удара молнии; УЗ контроль такой панели длился бы 7 часов.



**Рис. 11.43. Стандартный образец фирмы Nordam Repair Division, имитирующий дефекты воздухозаборника самолетов типа Boeing (адаптировано из [204])**

### 11.8.2. Обнаружение воды в сотовых панелях самолетов

Площадь поверхностей авиакосмических изделий, подлежащих НК, может составлять тысячи квадратных метров, поэтому производительность испытаний приобретает первостепенное значение. Среди специалистов утвердилась точка зрения, что ТК, будучи менее чувствительным, но намного 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 используются дюралюминиевые 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, ЯК-42 и СуперДжет-100, 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) отслоения сот от обшивки вследствие непрочности и деформации стенок ячеек (данный вид дефекта возникает и в силу технологических причин, и в ходе эксплуатации самолетов);

2) наличие воды в одной или нескольких ячейках (возникает в ходе эксплуатации самолета в результате конденсации и 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 весьма 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 дорогим и экзотическим методом НК в российских условиях). Кроме того, 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 (отметим, что недавно на мировом рынке появились дорогостоящие цифровые устройства регистрации рентгеновского излучения многократного применения). Кроме того, специфические требования к технике безопасности делают радиационный контроль малопримемым на гражданских авиалиниях, где в условиях ангара выполняют одновременно несколько разнородных операций диагностики и ремонта на самолетах различных моделей (еще более проблемным является радиационный контроль на взлетно-посадочной полосе). Наконец, радиационный контроль не обеспечивает локализацию и количественную оценку влагосодержания.

Ультразвуковой НК является весьма 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 составляет около 2 мм). Основным недостатком УЗ метода, по крайней мере, на примере российских авиакомпаний, помимо его контактного характера, является низкая производительность испытаний, которые проводят в отдельных точках, таким образом, рискуя пропустить несколько сот, заполненных водой. Кроме того, проблематичен УЗ контроль в труднодоступных местах, напри-

мер, на киле. Следует отметить, что ряд зарубежных компаний разработал УЗ способ контроля самолетов с использованием бесконтактного лазерного возбуждения и считывания УЗ сигнала, однако чрезвычайно высокая стоимость соответствующих систем (до 1 млн. долларов США) делает их применение в России нереалистичным.

Тепловой метод обнаружения воды в авиационных сотовых панелях принят в качестве штатного европейским концерном Airbus Industry и американской фирмой Boeing Commercial Aircraft (соответствующие нормативные документы предусматривают активную стимуляцию объектов контроля непосредственно на самолете или в ангаре).

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 -60 °С). Замерзшая вода сохраняет температуру ниже 0 °С в течение длительного времени, при этом тепловое изображение дефектов имеет специфический вид, облегчающий идентификацию воды. Пример термограмм, полученных при обследовании самолетов ТУ-204 и ИЛ-96, приведены на рис. 11.44 и рис. 11.45 (см. цветную вкладку, совместные исследования фирм "ПЕРГАМ Инжиниринг" и "Инновация"). Представляется интересным сравнить результаты ИК термографического и данные УЗ контроля, которые были получены несколькими месяцами ранее. Для многих зон совпадение данных было весьма хорошим (рис. 11.44, б), 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. 11.44, в). Дан-

ные рис. 11.45 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 в качестве штатного европейским концерном Airbus Industry [205]. Нагрев производят с помощью "теплового одеяла", которое накладывают на часть фюзеляжа и нагревают электрическим током. В России активный способ находится в стадии разработки [206]. На рис. 11.46, а (см. цветную вкладку) показана система активного ТК воды в сотах, разработанная фирмами "ПЕРГАМ-Инжиниринг" и "Инновация". 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 ThermaCAM 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 отраженное излучение ламп от контролируемой поверхности. Участки сот, заполненных водой с массой более 3...6 г, проявляются на поверхности в виде характерных холодных зон (рис. 11.46, б – е). Наилучшие результаты были получены на сотах с обшивкой из композиционных материалов, например, стеклопластика или углепластика, а также на титановых сотах (рис. 11.46, г – 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. 11.46, б, в). В соответствии с теорией ТК, оптимальным объектом контроля являются соты, изготовленные из алюминиевых сот со стекло-

пластиковой обшивкой (рис. 11.46, з); в этом случае удастся отследить текстуру отдельных ячеек и, следовательно, выявить не только воду в ячейках сот, но и отслоения сот от обшивки.

Следует отметить, что скрытая вода, в силу ее высокой теплоемкости, является удачным объектом для ИК термографического контроля. Процедура испытаний остается практически одной и той же независимо от материала обшивки: соты нагревают в течение нескольких секунд, после чего в течение следующих секунд регистрируют температурное поле. В случае алюминиевых сот может быть необходима развитая обработка сигнала, включая накопление последовательностей ИК термограмм, тогда как в случае неметаллических обшивок достаточно записать одну термограмму в оптимальный момент контроля.

Недостатком ТК воды в сотах является необходимость контакта воды с контролируемой обшивкой (аналогичное условие также необходимо для проведения УЗ контроля). Однако, в отличие от УЗ, тепловой метод малочувствителен к массе воды в ячейках, позволяя оценить общую массу воды в дефектной зоне только по площади дефекта в предположении, что вода полностью заполняет соты.

Как отмечено выше, одним из основных недостатков оптического способа нагрева является отраженное излучение ламп (для его подавления в нагревателях типа рис. 11.46, а используют шторки, перекрывающие излучение нагрева в момент регистрации). Для нагрева сот, изготовленных из композиционных материалов, используют менее мощные источники, например, фены. 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.

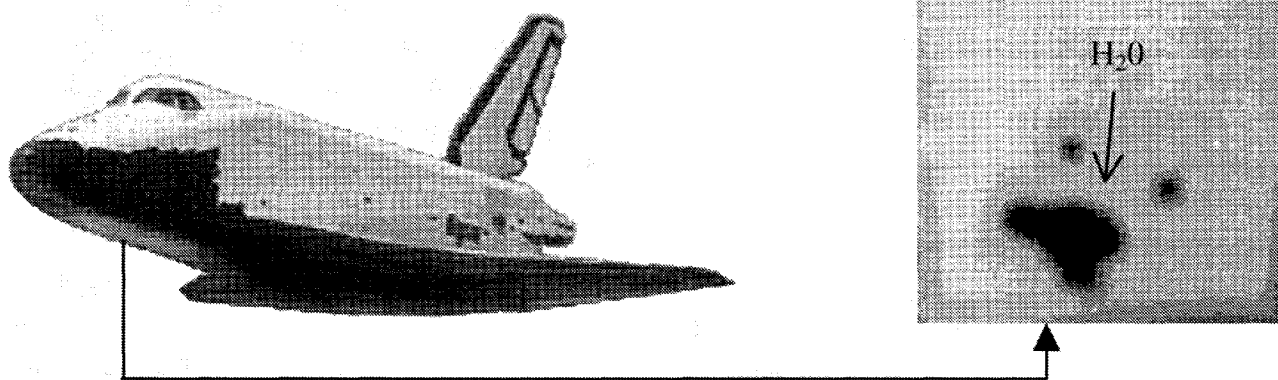
Система, аналогичная описанной выше, используется фирмой Boeing Commercial Aircraft (США) в виде роботизированного комплекса, что позволяет автоматизировать процедуру нагрева и обработки данных.

### 11.8.3. Обнаружение воды в теплозащите космических челноков

Нижняя часть корпуса космических кораблей-челноков защищена специальными теплозащитными плитками черного цвета ("черная" теплоизоляция), которые предотвращают 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 теплозащитного материала, однако возникающие в процессе эксплуатации кораблей трещины покрытия приводят к тому, что отдельные теплозащитные плитки могут набирать воду массой, превышающей массу сухих плиток.

Механизм обнаружения воды в теплозащите космических челноков связан как с переходными режимами при посадке, так и с естественным испарением воды через нарушения защитного покрытия. Еще в прошлом веке 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 в рамках программы создания космического корабля "Буран" (рис. 11.47). Более того, российские 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, отечественные исследования в данной области были свернуты.





**Рис. 11.47. Вода, проникшая в теплозащитную плитку космического челнока, видна на термограмме вследствие естественного испарения**  
(снято прибором ТВ-03 – одним из первых отечественных серийных тепловизоров)

#### 11.8.4. 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 устройства для ТК лопаток. Например, фирма Thermosensorik (Германия) создала роботизированную установку импульсного ТК турбинных лопаток (см. табл. 2.1), 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 высокой температуре, 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 системы охлаждения, как засорение каналов, "уход" размеров, 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, малоприменим 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 показал, что засорение внутренних каналов эффективно обнаруживается по аномалиям поверхностного теплового поля путем пропуска горячего (холодного) воздуха или жидкости через каналы лопатки [207].

В России аналогичная процедура продувки лопаток горячим воздухом разработана во ФГУП ВИАМ [208]. 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

лопатонок, блок нагревателей, блок расходомеров, интерфейс и компьютер.

Испытано более 10 типов охлаждаемых турбинных лопаток (Д18, АЛ31Ф, оболочковые паяные лопатки, лопатки двигателей Pratt & Whitney). Установлено, что тепловой метод позволяет с погрешностью не более 10 % определять изменение диаметра внутренних отверстий системы охлаждения оболочковых паяных лопаток, а также выявлять остатки керамики (перекрытие одного канала приводит к поверхностному температурному сигналу до 1,6 °С на уровне 50 °С).

Специализированная система ТК внутренних каналов турбинных лопаток разработана ФГУП "Салют" (г. Москва) на базе отечественного тепловизора ИРТИС (последние разработки ориентированы на тепловизионные модули, например, типа ThermoVision A20 фирмы FLIR Systems).

В зависимости от конструкции и материала лопаток идентификация заблокированных каналов может потребовать развитой обработки данных. Пример приведен на рис. 11.48 (см. цветную вкладку). Различия температурных распределений на поверхности бездефектной и дефектной лопаток визуально не обнаруживаются, в то время как применение преобразования Фурье позволяет установить факт засорения одного из каналов.

**Контроль качества теплозащитных покрытий.** Плазменные покрытия широко используются в промышленности для защиты основных структур от агрессивных воздействий сред. Общей чертой таких теплозащитных покрытий является их "чешуйчатый" или "зернистый" характер, обусловленный быстрым отверждением частиц малого размера, расплюсывающихся при ударе с высокой скоростью о холодную поверхность подложки. Механизм связи покрытия с подложкой и отдельных частиц друг с другом до сих пор является предметом дискуссии. Вследствие несовершенств используемых технологий нанесения покрытий, как в интерфейсной зоне, так и в самом покрытии возможно образование структурных

дефектов, таких как расслоения между отдельными слоями, пористость, трещины и нерасплавившиеся частицы. Неразрушающий контроль таких дефектов имеет существенное значение, например, в энергетике, где теплозащитные покрытия используются для защиты основного металла компонент газовых турбин и дизельных двигателей. Покрытия состоят из слоев керамики и металлов и обозначаются, например, в виде  $MCrAlY$ , где М обозначает металл. Покрытия лопаток в авиационных газовых турбинах защищают от окисления и/или коррозии с помощью алюминидов платины, гамма-Ti-алюминидов и других материалов.

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 [209 – 220].

Основные особенности применения ТК в данной области сводятся к следующему.

- Теплозащитные покрытия на подложках представляют объекты, в которых тепловые процессы протекают в течение короткого времени (от микросекунд до миллисекунд), в зависимости от толщины и ТФХ. Очень тонкие (микрометровые) покрытия контролируются периодическими тепловыми волнами высокой частоты (до десятков кГц) или лазерными импульсами, в то время как для НК более толстых (до 1 мм) покрытий применяется оптический нагрев с использованием импульсных ламп.

- Все виды структурных дефектов в покрытиях воздействуют на амплитуду и временное поведение температуры, причем, как и в других применениях ТК, наиболее надежные результаты получают, обрабатывая информацию во временной, частотной или фазовой областях.

• Тепловой метод наиболее чувствителен к наличию расслоений между покрытием и подложкой, а также к изменениям толщины покрытия; изменения ТФХ покрытий в меньшей степени влияют на информативные параметры. Феномены, связанные с толщиной покрытия, лучше проявляются во временной или фазовой области, тогда как тепловое сопротивление расслоений существенно сказывается на амплитуде температурных перепадов.

• Поскольку покрытия нельзя красить, излучательно-поглощательные эффекты, а также частичная прозрачность покрытий для излучения нагрева могут играть существенную роль, прежде всего, при оценке параметров дефектов.

Дефекты типа отслоений и изменений толщины покрытий хорошо поддаются моделированию. На рис. 11.49 приведено распределение амплитуд  $C_m$  (ось ординат) и времен появления  $\tau_m$  (ось абсцисс) максимальных текущих контрастов при ТК

типичных плазменных покрытий, используемых в энергетическом машиностроении. Видно, что после импульсного нагрева оптимальные условия выявления изменений толщины покрытий имеют место в течение 0,03 с, тогда как отслоения покрытий от подложки можно наблюдать до 0,7 с, причем, в случае отслоений максимальный контраст может достигать десятков процентов. Заметим, что величина  $C_m$  всегда положительна для отслоений, а в случае изменений толщины ее знак зависит от выбора эталонной толщины: утонения покрытия приводят к отрицательным  $C_m$  в силу более высокой теплопроводности подложки.

Данные на рис. 11.49 аппроксимированы следующими инверсионными формулами:

$$d = 1,57024 C_m^{0,833941} \tau_m^{0,673748} l_c^{-0,361122}, \tag{11.28}$$

$$l_c^{incr} / l_c = 359,603 C_m^{0,042124} \tau_m^{1,0322} l_c^{-2,03345},$$

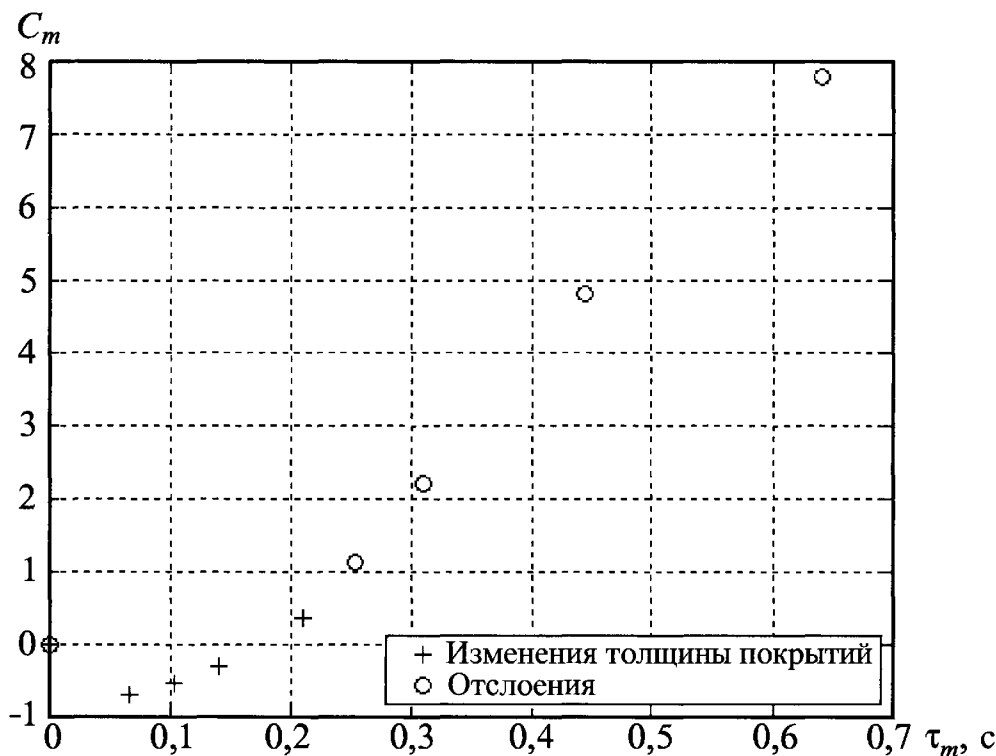


Рис. 11.49. Распределение максимальных контрастов и моментов их наступления для дефектов различного типа (покрытие на подложке из стали AISI 304 при импульсном нагреве)

где  $d$  – толщина отслоения, мкм;  $C_m$  – максимальный текущий контраст;  $\tau_m$  – время наступления максимального контраста, мс;  $l_c$  – проектная толщина покрытия, мкм;  $l_c^{incr}$  – увеличенная толщина покрытия.

Заметим, что вторая формула в (11.28) предполагает, что бездефектная точка всегда соответствует более низкой температуре покрытия, а величина  $l_c^{incr}/l_c$  больше единицы; таким образом, как отслоения, так и увеличения толщины покрытия, приводят к положительным температурным перепадам.

Формулы (11.28) обеспечивают погрешность оценок от 5 до 30 %.

На рис. 11.50, 11.51 (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 расслоения различного диаметра (рис. 11.50). Образец нагревали лампами

с энергией около 1,5 кДж/м<sup>2</sup> в импульсе длительностью 10 мс. Записывали до 300 термограмм с интервалом 20 мс (эксперименты выполнены на фирме CESI, Италия). Дефекты проявлялись оптимальным образом через 0,9 с после нагрева (рис. 11.51, 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. 11.51, б видны все четыре дефекта, а также зоны с различной толщиной покрытия. Карта дефектов также показывает все дефекты с 5 %-ным уровнем ложной тревоги.

Другой пример ТК стандартного образца покрытия приведен на рис. 11.52 (см. цветную вкладку), где как на исходной термограмме, так и на карте дефектов, отчетливо видны две дефектные отметки, которые, согласно формулам (11.28), были интерпретированы как отслоения. Стоит обратить внимание на точечную текстуру изображений, обусловленную упомянутой выше технологией нанесения покрытий.

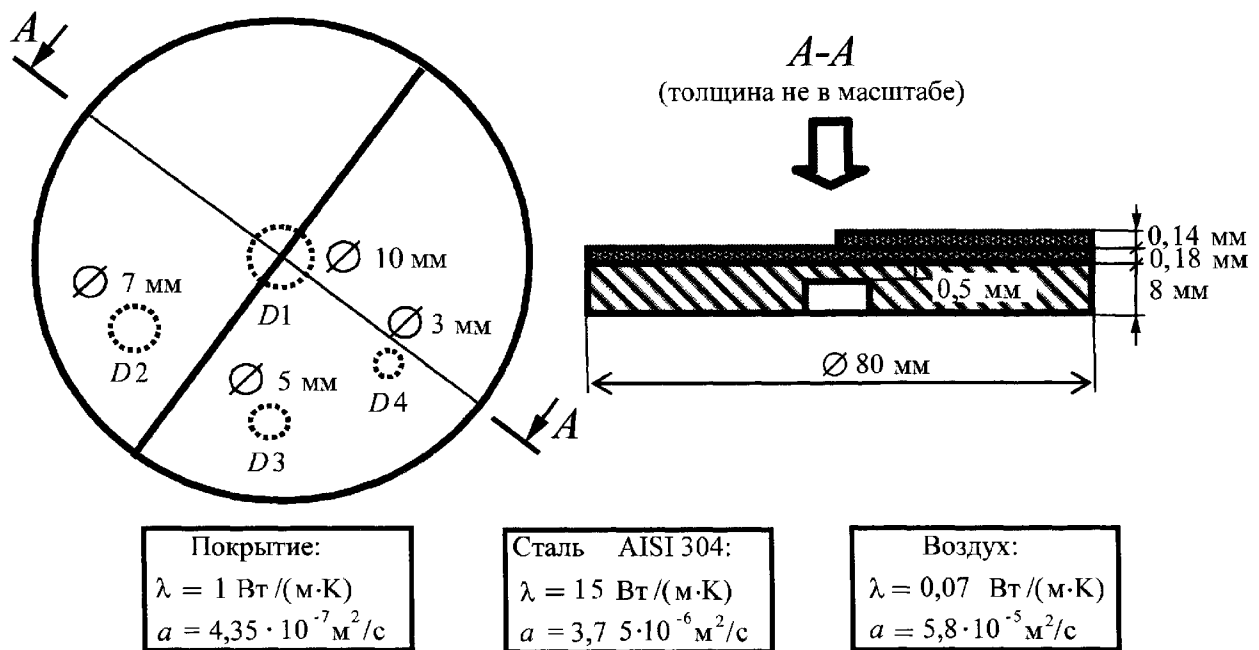


Рис. 11.50. Схема стандартного образца теплозащитного покрытия турбинных лопаток фирмы CESI (Италия)

Пример ТК реальной турбинной лопатки приведен на рис. 11.53 (см. цветную вкладку). Следуя выводам, полученным при испытаниях эталонного образца, последовательность ИК термограмм в этом случае была обработана лишь с использованием одномерного преобразования Фурье и корреляционной техники. Были идентифицированы три небольших дефекта, отмеченные стрелками на рис. 11.53, *г* (квадратная область черного цвета слева сверху соответствует алюминиевой фольге, наклеенной на поверхность лопатки для изучения отраженного излучения нагрева).

**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 СССР исследования в области ТК лопаток авиационных турбин были выполнены М.С. Касаткиным и В.П. Вавиловым [54, 55]. Теоретические основы метода описаны в п. 4.8.9. При "боковом" нагреве лопатки распространяющаяся вдоль лопатки изотерма испытывает искажения в месте нахождения трещины. В случае поверхностных трещин эффект достаточно нагляден и хорошо регистрируется тепловизором, если турбинная лопатка помещена одним концом в турбулизирующую кипящую воду. Выявляемость подповерхностных трещин зависит от глубины их залегания и требует использования развитых алгоритмов обработки изображений, например, анализа производных.

### 11.8.5. 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 делается на замену существующих методов испытаний в отдельных точках более оперативными методами, который предусматривают получение изображений. Несколько лет назад Федеральная авиационная администрация США (Federal Aviation Administration – FAA) провела тендер фирм-изготовителей аппаратуры НК, среди которых были организации, разрабатывающие тепловой метод [221]. В результате сравнительных испытаний нескольких пилотных систем НК был сделан вывод о том, что потенциальные возможности теплового метода до сих пор полностью не реализованы и требуют дальнейших исследований.

Стандартная схема ТК самолета показана на рис. 11.54, *а*. Размер зоны контроля обычно составляет от 0,2 до 0,5 м в зависимости от типа и мощности нагревателя. Коммерческая аппаратура, производимая в мире всего лишь несколькими фирмами, представляет собой комплекс, который включает тепловизоры с высокой частотой кадров, нагреватель на основе импульсных или галогенных ламп, а также компьютерную систему сбора и обработки данных. Ряд систем поставляется вместе с роботом, который осуществляет осмотр зон контроля по определенной программе. Основные элементы ноу-хау сосредоточены в программном обеспечении систем; в частности, ряд фирм применяют к динамической температуре преобразование Фурье (Thermosensorik), однако наибольший объем продаж приходится на аппаратуру фирмы Thermal Wave Imaging, в которых реализована синтетическая обработка сигнала (см. п. 6.10.3). 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.

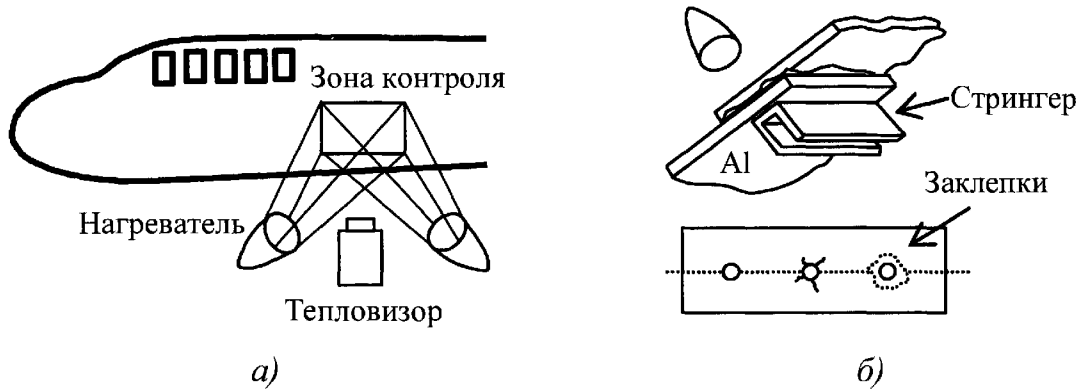


Рис. 11.54. Тепловой контроль коррозии в панелях самолетов

(адаптировано из [223]):

а – схема контроля; б – ТК заклепок

Характерный элемент самолетной панели показан на рис. 11.54, б. Два алюминиевых листа соединены внахлест со стрингером посредством эпоксидного клея и заклепок (в отечественных самолетах вместо клея используют заполнители, препятствующие проникновению влаги). В процессе 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). На рис. 11.55 (см. цветную вставку) проиллюстрированы возможности ТК алюминиевых пластин толщиной 1 и 2 мм, содержащих четыре имитатора коррозии. Для нагрева использован источник из четырех импульсных ламп общей мощностью до 20 кДж. Длительность импульса равнялась 1 мс, эффективная поглощенная мощность была оценена на уровне  $11,3 \text{ кДж/м}^2$ , что, вследствие отражения части энергии светло-серой поверхностью образцов, на 37 % ниже эффективной плотности энергии, которую

обеспечивал импульсный нагреватель. Величины температурных сигналов и контрастов для отдельных дефектов, приведенные на рис. 11.55, рассчитаны по отношению к бездефектной зоне диаметром 15 мм, выбранной в центре образца. Температура в дефектных зонах также определена как средняя в круге диаметром 20 мм. Дисперсия шума в бездефектной зоне определена на уровне  $\sigma_n = 0,17 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $C_n = 0,035$ ) для образца толщиной 1 мм и  $\sigma_n = 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $C_n = 0,06$ ) для образца толщиной 2 мм. Основной проблемой описанной процедуры ТК является низкий уровень температурных сигналов  $\Delta T_m$ .

Данные рис. 11.55 позволяют проверить применимость формулы инверсии (3.9) для оценки коррозии по экспериментальным значениям текущего контраста  $C_m$ . Лучшие результаты получены для наибольшего дефекта в пластине толщиной 2 мм (см. рис. 11.55): для зарегистрированного контраста  $C_m = 1,2$  по формуле (3.9) имеем  $\Delta L/L \sim 55 \%$ , что близко к истинному значению 50%. Для других дефектов отмечен существенный разброс данных по контрасту, что можно объяснить неоптимальной регистрацией сигнала  $\Delta T_m$  (использованная частота записи термограмм 6 Гц низка для определения истинных максимальных значений  $\Delta T_m$ ). С помощью описанной процедуры ТК в

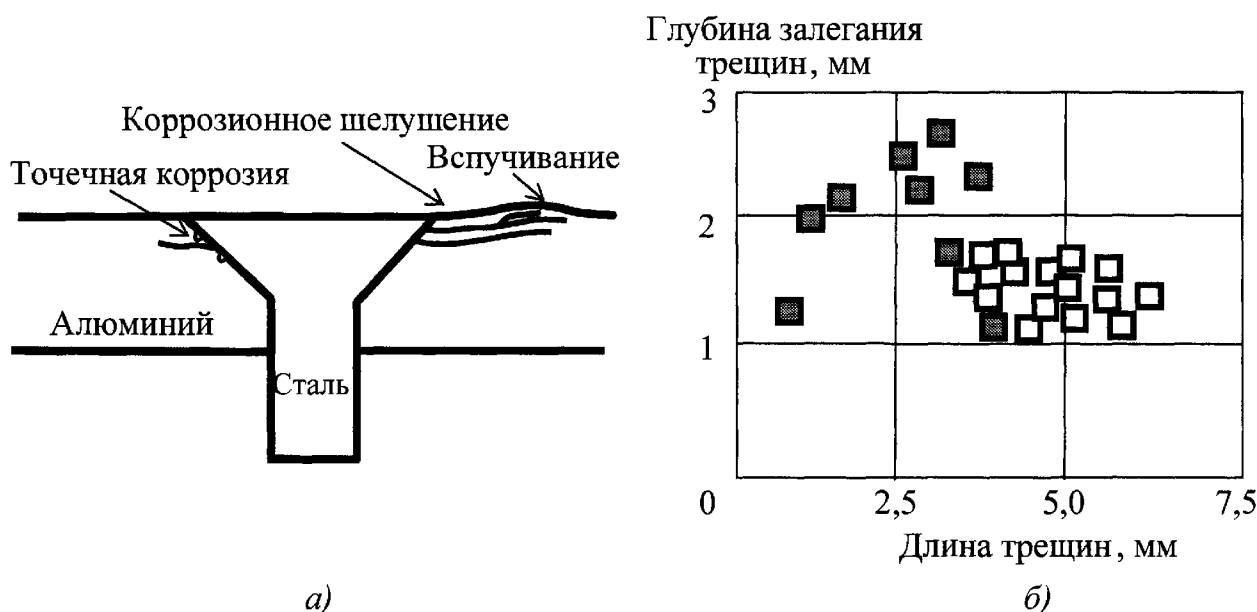
алюминиевых листах толщиной 1...2 мм возможно обнаружить унос материала величиной 25...30 % в зонах диаметром до 20 мм. Показатели ТК коррозии в алюминии можно улучшить, увеличивая энергию нагрева и повышая частоту записи термограмм. Оценка порога обнаружения коррозии на уровне 5...10 % уноса материала на эксплуатируемых самолетах (см., например, работу [222]), является, по-видимому, чересчур оптимистичной, однако в лабораторных условиях компьютерная обработка термографических данных, полученных с частотой 60 Гц, позволила специалистам НАСА достичь предела обнаружения коррозии на уровне 2,5 % в алюминиевой панели толщиной 1 мм [223, 224].

Описанная выше процедура ТК позволяет также выявлять участки непрочности в клеевых соединениях алюминиевых панелей.

**Коррозионное шелушение в зонах соединения алюминиевой обшивки и силовых элементов.** В некоторых самолетах (в США: E-3, B-52, C/KC-135) используются стальные силовые элементы, которые соединены с алюминиевой обшивкой крыльев согласно схеме рис. 11.56. Элементы

защищены специальным покрытием для того, чтобы избежать электрохимического взаимодействия стали и алюминия. Аналогично ситуации, показанной на рис. 11.55, в ходе эксплуатации защитное покрытие изнашивается, и в зонах прямого контакта двух металлов начинается точечная коррозия (pitting) и коррозионное шелушение (exfoliation) (рис. 11.56, а). Основным методом диагностики такой коррозии является визуальный; при этом обнаруживаются зоны вспучивания обшивки, которые возникают 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 были выполнены фирмой ARINC, США [225]. При этом была использована коммерческая система EchoTherm на базе коротковолновой ИК камеры Amber Radiance HS (формат 256 × 256, частота кадров 120 Гц). Для нагрева были применены две линейные импульсные лампы



**Рис. 11.56. ТК коррозии шелушением в крыльях самолетов**  
(адаптировано из [225]):

а – схема появления коррозии; б – параметры обнаруженных и пропущенных дефектов

с энергией 6,4 кДж каждая. Зона контроля составляла  $25 \times 25$  см, что обеспечивало одновременный осмотр от 18 до 24 заклепок. 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 термограмм. Обработку данных проводили двумя способами: 1) путем непосредственного просмотра термограмм в оптимальный момент регистрации после вычитания фонового изображения, и 2) путем анализа первой производной по времени. Использованы образцы с многочисленными как качественными соединениями, так и с искусственными зонами коррозии, причем степень коррозии подтверждалась 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 ложной тревоге – 1,5 %. Анализ первой производной позволил улучшить эти показатели до 81,6 % и 1 % соответственно. Ограничения ТК 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. 11.56, б).

#### 11.8.6. Композиционные материалы

В авиакосмической промышленности широко применяют композиционные материалы, такие как стекло- и углепластик,

а также углерод-углеродные (УУ) 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. Также получили распространение полностью металлические соты, в которых обшивка соединена с ячейками с помощью клея или сварки с припоем. В самолетах, как указывалось выше, широко применяются силовые элементы (стрингеры), соединенные с металлической обшивкой с помощью клея и заклепок.

Ввиду такого многообразия материалов и изделий из них, 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. 11.17.

В космической промышленности США до сих пор широко распространен метод простукивания крупногабаритных панелей молотком (coin tap техника), который, вследствие низкого пространственного разрешения, не обеспечивает надежного НК. Оператор часто пропускает критические дефекты и одновременно фиксирует ложные дефектные отметки.



## 11.17. Сравнение методов НК крупногабаритных композиционных изделий\* [226]

Метод	Стоимость оборудования	Портативность	Производительность	Пространственное разрешение	Особые требования
ТК	Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Неотражающие поверхности
Ширография	Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Отражающие поверхности**
Простукивание	Очень низкая	Очень высокая	Низкая	Плохое	Ненадежный метод
УЗ	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.

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 ширографии [226].

**Углепластиковые композиты.** Углепластиковые (углерод-эпоксидные) композиты, отличающиеся высокой прочностью при температурах до +100 °С, достаточно широко применяются в авиакосмической технике, в частности, при изготовлении частей крыльев и фюзеляжа самолетов. Например, из углепластика изготовлены многие панели истребителя Mirage, производимого фирмой Marcel Avion Dassault (Франция). Углепластиковые композиты включают матрицу из углеродных волокон и наполнитель из синтетической смолы. Условно можно выделить микро- и макродефекты этого мате-

риала. Микродефекты 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 углепластика. 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. 11.57, а (см. цветную вкладку) показано создание искусственных дефектов типа ударного повреждения путем падения металлического шарика заданной массы с заданной высоты. Дефекты такого типа имеют специфическую форму "бабочки". Как правило, на поверхности в точке удара имеется незначительная, слабо видимая глазом отметка, а основное тело дефекта находится в толще композита. С ростом глубины увеличива-

ется 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 УЗ стимуляции с электрической мощностью до нескольких сотен ватт.

В 1998 г. по инициативе автора были выполнены международные сравнительные испытания стандартного образца из углепластика, изготовленного Управлением по авионавтике 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. 11.57, а. При оптическом возбуждении на нагреваемой поверхности отчетливо наблюдался дефект А, расположенный непосредственно под точкой удара и состоящий из двух частей (рис. 11.57, б). Степень проявления более глубоких частей дефектов такого типа, например, части дефекта В на рис. 11.57, 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. 11.57, в, полученная группой Д. Балажа методом раннего обнаружения, обеспечивает 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. 11.58 слева, см. цветную вкладку). Проверка была выполнена методом УЗ С-сканирования, в результате чего была построена правая

глубинограмма рис. 11.58. Совпадение результатов теплового и УЗ контроля было удовлетворительным, хотя УЗ изображение имело лучшее пространственное разрешение. Тем не менее, следует заметить, что время получения УЗ 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. 11.59, а (см. цветную вкладку). 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. 11.59, б, в. Преимущество метода хорошо видно на рис. 11.59, 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. 11.59, в, обнаруживая все шесть дефектов (заметим, что дефект на глубине 4 мм частично затенен дефектом на глубине 1,3 мм).

**Углерод-углеродные композиты.** Углерод-углеродные (УУ) композиты представляют собой следующий шаг в создании температуростойких композитов по сравнению с углепластиковыми. Их основу составляет углеродная ткань, пропитанная фенолистой смолой и покрытая карбидом углерода. В частности, из УУ композитов проектиро-

вались наиболее нагреваемые части европейского космического корабля-челнока Hermes. С учетом более высокой теплопроводности углеродных нитей, при НК этих материалов применяют способ импульсного ТК, разработанный для углепластиков. Исследования, выполненные группой Д. Балажа из ONERA, показали, что тепловой метод успешно обнаруживает расслоения в УУ композитах и позволяет оценивать их глубину залегания и толщину [227]. 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.

УУ панели американских космических челноков также контролируются с помощью ТК; работы НАСА в этой области описаны в п. 11.8.8.

**Полимерные композиты.** Стремление сократить собственную взлетную массу ракет-носителей привело к замене металлов композиционными материалами уже в 50 – 60-е годы прошлого века. 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 [228]. 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.

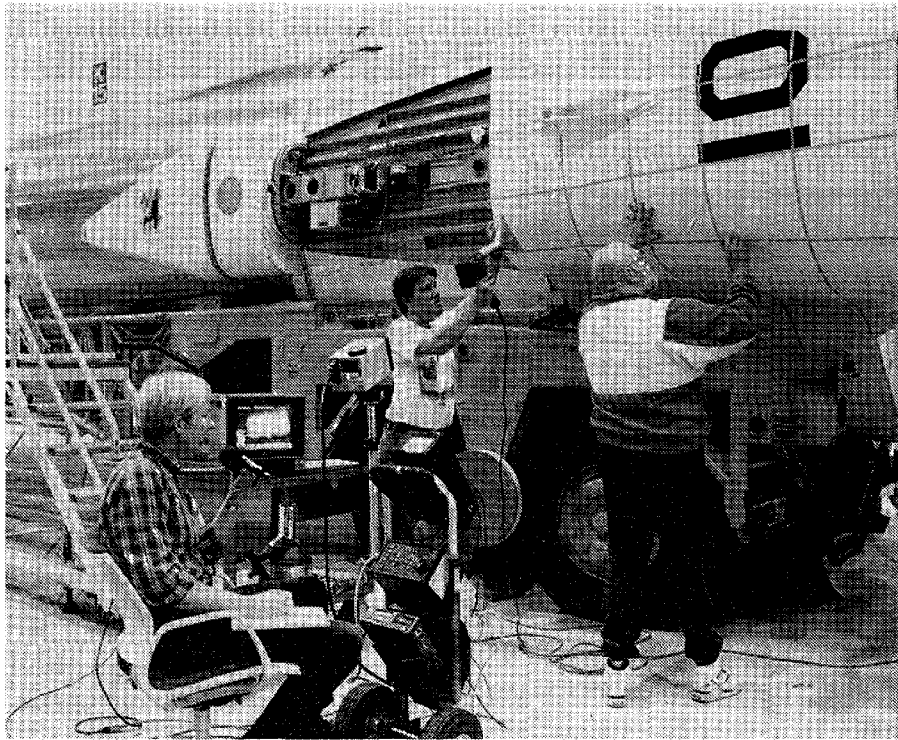
Недостатки звукового метода:

- 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, поэтому панели можно нагревать потоком теплого воздуха (использовали промышленный фен мощностью 1750 Вт). Соответствующая технология ТК была предложена в 1990 г. (рис. 11.60). Избыточная температура панелей не превышала 10 °С. При отработке процедуры ТК искусственные дефекты создавали, вводя и удаляя металлическое лезвие между обшивкой и сотами, а также нанося ударные повреждения.

При покрытии панелей дополнительной теплоизоляцией возникали дефекты в виде непрочлеив. ТК позволил выявлять:

- 1) непрочлеив между лицевым теплоизоляционным покрытием и обшивкой сот;
- 2) отслоения лицевой обшивки от стенок ячеек;
- 3) смятие ячеек сот;
- 4) изменение плотности алюминиевых сот;
- 5) инъектированный эпоксидный клей;
- 6) внутренние металлические детали;
- 7) стеклопластиковые блоки под обшивкой, которые служат для крепления металлических деталей.



**Рис. 11.60. Активный ТК ракеты "Атлас" при использовании фена с одновременным простукиванием панелей молотком**  
(с разрешения Д. Берли)

Тепловой 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 возникают 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 [228] 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 излуче-

ние 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 [228]:

- 1) бесконтактность;
- 2) оперативность (испытания в реальном времени);
- 3) высокое пространственное разрешение;
- 4) регистрацию результатов в виде изображений и совместимость с видеоаппаратурой;
- 5) меньшую зависимость результатов испытаний от опыта оператора;
- 6) относительную портативность аппаратуры;
- 7) количественный характер представления данных;
- 8) возможность классификации дефектов по типам.

Очевидными недостатками ТК являются меньшая портативность и бóльшая стоимость аппаратуры контроля по сравнению с молотком, используемым для звукового простукивания корпусов ракет.

Согласно [228], 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 была разработана методика испытания и стандартные образцы предприятия, внесены изменения в производственную документацию и обучен персонал.

Стандартные образцы включали следующие типы дефектов: 1) структурные (изменения 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 мыса 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  $50 \text{ м}^2/\text{ч}$ . Следует заметить, что в описываемой процедуре маркировку

дефектов производили вручную 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 [9]. Чаще всего использовали три типа силовых оболочек: 1) двухслойные оболочки, состоявшие из цилиндрической обшивки и сетчатой структуры; 2) трехслойные оболочки, в которых сетчатые структуры располагались между двумя оболочками, а промежутки были заполнены, например, пенополиуретаном; 3) многослойные оболочки, в которых сетчатые структуры находились внутри пакета полимерного композиционного материала (ПКМ), а сверху располагались защитные и силовые слои.

В процессе изготовления силовых оболочек возникали следующие дефекты: 1) повышенное содержание связующего в материале ребра; 2) неоднородное распределение наполнителя в сетчатой структуре; 3) искривление 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 было установлено, что увеличение воздушных включений и расслоений с 0,6 до 6 % снижало межслойную прочность на 45 %, а предел прочности при сжатии – на 37 %.

В табл. 11.18 приведены результаты экспертной оценки методов НК силовых оболочек по 7-ми балльной шкале, приведенные в [9]. Видно, что предпочтительными являются методы: тепловой и оптической голографии (последний метод может рассматриваться как один из вариантов широкографического НК).

Отечественными исследователями был накоплен значительный теоретический и практический опыт по ТК изделий из ПКМ, выполненных методом намотки [9].

**11.18. Результаты экспертной оценки методов НК силовых оболочек,  
выполненных из полимерных композиционных материалов**  
(адаптировано из [9])

Требования к методу в порядке важности	Методы НК						
	УЗ теневой	УЗ импедансный	радиоволновый	радиационный	рентгеновской вычислительной томографии	тепловой	оптической голографии
Выявление отслоений ребер сетчатых структур от оболочки, имеющих воздушное раскрытие	7	7	3	7	7	6	7
Выявление отслоений без воздушного раскрытия (слипнутых)	5	5	4	6	6	6	7
Выявление ложных дефектов	5	6	4	2	2	2	7
Определение границ (размеров) дефектов	6	6	5	7	7	7	5
Определение глубины залегания дефектов	1	5	3	6	7	7	2
Контроль изделий с наполнителем	7	7	3	7	7	7	7
Безопасность	7	7	4	2	2	7	7
Производительность	5	5	2	5	6	6	7
Применение серийной аппаратуры	1	1	1	5	7	7	5
Автоматизация	3	3	2	6	7	7	5

Продолжение табл. 11.18

Требования к методу в порядке важности	Методы НК						
	УЗ теневой	УЗ импедансный	радиоволновый	радиационный	рентгеновской вычислительной томографии	тепловой	оптической голографии
Габариты контролируемого изделия	3	3	1	5	2	7	7
Вероятность обнаружения дефектов	4	4	3	3	7	5	7
<b>Итого:</b>	<b>34</b>	<b>59</b>	<b>35</b>	<b>61</b>	<b>67</b>	<b>74</b>	<b>80</b>

## 11.19. Дефекты изделий из стеклопластика, изготовленных способом намотки [9]

Изделия	Дефекты
Монолитные	Расслоения в ПКМ и эластичном слое. Отслоения эластичного слоя от ПКМ
С вмотанными элементами	Воздушные включения. Отслоения вмотанного элемента от ПКМ
С наружными элементами	Отслоения наружных элементов от ПКМ

Причины возникновения дефектов в таких изделиях – следующие:

- 1) нарушение режимов эксплуатации и хранения;
- 2) попадание на поверхность армирующего материала в процессе изготовления ПКМ воды, масла и других 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 располо-

жения. Пример характерных дефектов в стеклопластиковых изделиях, изготовленных способом намотки, дан в табл. 11.19.

Наиболее опасными дефектами являются воздушные расслоения между слоями. 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 [9].

Оптимизация процедуры ТК цилиндрических изделий из стеклопластика связана с теоретическим решением двух- или трехмерной задачи активного ТК. В отечественной литературе имеется значительное число публикаций, в которых проанализированы основные зависимости поверхностного температурного сигнала от параметров дефекта и внешних условий. Теп-

ловой контроль стеклопластиковых композитов явился полигоном испытаний алгоритмов решения обратных задач [9, 11, 229, 230]. В частности, Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадиным, Е.В. Абрамовой разработан способ определения параметров расслоений в стеклопластике, основанный на минимизации функционала невязки, образованного разностью экспериментальных и теоретических данных. Алгоритм был опробован в 1980-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. Иными словами, возможность решения задачи дефектометрии для полномасштабных изображе-

ний остается нереалистичной даже с использованием современных компьютеров.

**Борозпоксидные "заплатки".** Структурная целостность авиационных конструкций является основным предметом озабоченности авиакомпаний и производителей самолетов. Для обеспечения конкурентоспособности, авиакомпании стремятся списывать самолеты не по ресурсу, а по фактическому состоянию. При этом весьма распространена практика ремонта, в частности, путем размещения полимерных (борозпоксидных) "заплаток". Тепловой контроль является эффективным средством контроля качества связи "заплаток" с алюминиевой обшивкой. С позиций теории ТК это объясняется тем, что структуры типа "неметалл-металл" наиболее пригодны для одностороннего контроля со стороны неметалла. В работе [231] описан ТК борозпоксидной "заплатки", размещенной на алюминиевой обшивке толщиной 4 мм в районе перегородки топливного бака (рис. 11.61, а). Для демонстрации возможностей ТК связующего слоя между "заплаткой" и обшивкой было смоделировано искусственное расслоение, которое, как выяснилось в ходе испытаний, сопровождалось естественными дефектами. Было использовано 4 цикла нагрева в течение 4,25 с и охлаждения в течение 4,25 с, после чего в изображении первой производной по времени проявились все дефекты (рис. 11.61, б).

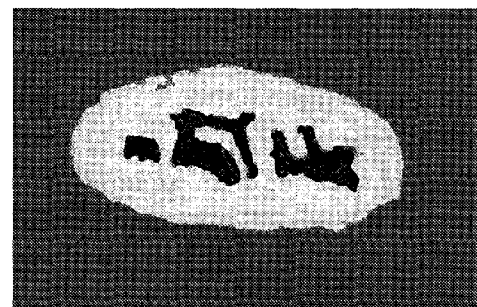
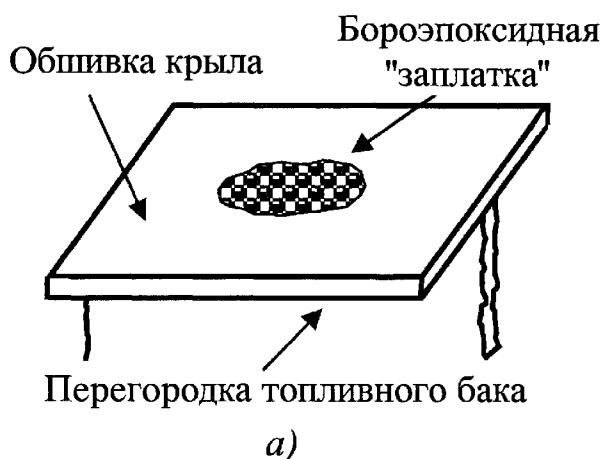


Рис. 11.61. ТК борозпоксидной "заплатки" на обшивке крыла самолета (адаптировано из [228]):

а – схема размещения "заплатки"; б – изображение первой производной по времени



### 11.8.7. Узлы космических челноков и ракет

Как отмечалось выше, узлы и конструкции авиакосмической техники могут представлять собой сложные сочетания разнородных материалов, соединенных клеем, сваркой и заклепками, поэтому классификация областей применения ТК, исходящая только из материалов изделия, 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 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 причиной катастрофы.

Ускорители твердотопливной ракеты космического челнока крепятся на концах сегментов *бустеров* (booster) специальными хомутами, элементы которых покрыты специальной смазкой, предотвращающей преждевременное истирание металла [232]. 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.

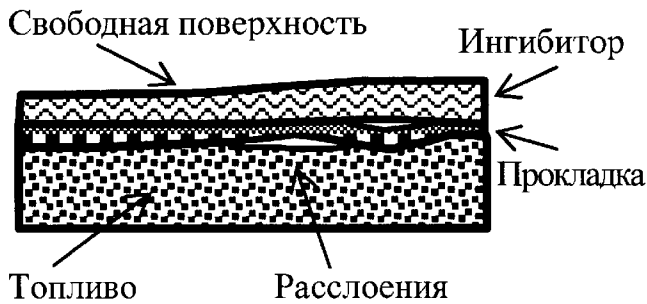
Параллельно была решена задача ТК царапин на поверхности стали, наличие которых также приводит к преждевременному истиранию хомутов [232]. Штатная процедура предусматривает удаление смазки и осмотр труднодоступных мест с помощью зеркала типа ЛОР. В ходе оценки толщины смазки было установле-

но, что царапины на поверхности стали легко обнаруживаются термографически, что существенно упростило процедуру испытаний.

Наконец, тепловой метод оказался полезным в местах крепления хомутов при оценке качества системы теплозащиты, которая состоит из влагонепроницаемой *неопреновой* (neoprene) резины, залитой сверху пробкообразной массой [232]. Целостность теплозащиты важна, поскольку оторвавшиеся при старте куски "пробки" могут повредить теплозащитные плитки челнока (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 [233]: 1) целостность всех связующих плоскостей является необходимым условием функционирования двигателей; 2) готовые структуры не могут быть разобраны для проведения испытаний. Испытания проводятся 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 (рис. 11.62).

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 [233] выдвинули концепцию так называемого "замещенного нагрева" (proxu heating), согласно которой нагрев поверхности



**Рис. 11.62. Зона перехода топлива-ингибитор, показывающая участки возможных расслоений**  
(адаптировано из [233])

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 двухстороннюю. По-видимому, в свете существующих реальных возможностей моделирования процесса теплопередачи в дефектных структурах, нет необходимости прибегать к столь приближенным моделям; однако, во всяком случае, на термограммах расслоения проявлялись слабо, и была предложена процедура обработка данных с помощью второй производной (фильтра Уинфри).

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 [234]. В настоящее время сверхпрочный стальной корпус резервуаров защищен пенообразным пластическим материалом, и неразрушающим испытаниям подлежит качество клеевого слоя между сталью и теплозащитой.

Гипотетический оптимальный способ НК должен обеспечивать:

- 1) бесконтактность (не повредить теплозащиту);
- 2) портативность (для работы на стартовой площадке);
- 3) односторонний доступ к теплозащите;

4) обнаружение минимального не-проклея размером 100 мм;

5) производительность испытаний от 1 до 60 м<sup>2</sup>/ч.

Фирма провела сравнительные испытания звукового, УЗ, теплового, широкографического, радиографического и механического (вакуумного) метода НК. Тепловой метод, как и УЗ, обнаруживал дефекты только при нагреве со стороны металла. Оптимальным оказался метод широкографии.

Как известно, в США проводились работы по созданию космического миникорабля X-33. Руководителем программы являлось Управление по аэронавтике США NASA, а систему тепловой защиты разрабатывала фирма BF Goodrich Aerospace (бывшая Rohr). В теплозащите челнока были использованы новейшие материалы, в частности, части, подверженные максимальной тепловой нагрузке (носовая часть, крылья) проектировали из УУ композита. Другие ответственные компоненты планера изготовлены из металлических сот (сплав Inconel) с толщиной обшивки 0,15 мм. Верхние части планера, подверженные меньшей тепловой нагрузке, проектировали из алюминиевых сот с углепластиковой обшивкой, покрытых высокотемпературной керамикой.

Тепловой метод первоначально предполагался для 100 % контроля металлических сот. Для контроля углепластиковых сот планировалось применить УЗ НК, однако затем этот метод был заменен тепловым в силу следующих причин [235]: 1) ТК обладает значительно более высокой производительностью испытаний (приблизительно 13 м<sup>2</sup>/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 обнаружи-

вать 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 планировалось использовать до 1600 панелей, для контроля которых был применен тепловой метод. 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.

Помимо задач НК, ИК термография широко использовалась вместо термодатчиков при многочисленных температурных испытаниях компонентов космического мини-корабля.

В последнее время, насколько известно, работы в США по челноку X-33, свернуты, однако нет сомнения в том, что в любой программе по созданию новой космической техники найдется место ТК. Доказательством являются результаты использования ТК при анализе причин катастрофы корабля Columbia и предложения NASA по использованию тепловизионного НК непосредственно на орбите, что позволило выделить данный метод НК в число приоритетных в американской космической программе.

#### 11.8.8. Тепловой контроль космических челноков на стартовой площадке и в открытом космосе

Основой для проведения этих работ послужило заключение комиссии по расследованию причин катастрофы челнока Columbia в 2003 г., согласно которому

оторвавшийся при старте кусок пробкообразной теплозащиты ускорителя ударил космический корабль под левое крыло, что было отмечено при стартовой видеосъемке. Отсутствие технологии ремонта и недооценка степени серьезности данного инцидента привело к катастрофе при возвращении челнока.

Тепловая защита космических челноков изготавливается из материалов, выдерживающих температуры до +1650 °С. Армированные УУ композиты (RCC – Reinforced Carbon-Carbon) применяются в обтекателях, кромках крыльев и других выступающих частях кораблей, где температура превышает +1275 °С. Результатом расследования причин вышеупомянутой трагедии явилась программа NASA по внедрению НК, включая цифровую радиографию, рентгеновскую томографию, ультразвуковую, вихретоковый и другие методы. Для испытаний УУ панелей ТК был выбран в качестве основного; при этом отмечались бесконтактный характер контроля при одностороннем доступе, достаточная чувствительность к критическим дефектам и возможность проведения диагностических работ в открытом космосе.

В ходе выполнения программы было разработано несколько концепций применения ТК. Для испытаний композиционных панелей челноков на стартовой площадке мыса Канаверал была рекомендована коммерческая система EchoTerm, включавшая нагреватель из двух импульсных ламп мощностью 4,8 кДж каждая и тепловизор Phoenix (спектральная чувствительность 3...5 мкм, температурное разрешение 25 мК, формат 320 × 256) [236]. Первые испытания системы проводились вслепую на реальных панелях кромки крыла, содержавших искусственные дефекты. Требование к диаметру  $D$  и глубине залегания критических дефектов  $l$  было сформулировано заказчиком в следующем виде:

$$D = 2,8l + 0,042, \quad (11.29)$$

где размеры даны в дюймах. Было установлено, что ТК обнаруживает все дефек-

ты, удовлетворяющие данному требованию; при этом в качестве основного метода обработки данных был выбран анализ главных компонент (РСА).

С помощью описанной системы ТК были обследованы панели кромки крыла челнока Discovery после выполнения им полета в августе 2005 г., в результате чего была обнаружена дефектная отметка, которая соответствовала нарушению структурной целостности УУ композита.

Параллельно проводились работы по внедрению ИК термографии в качестве пассивного или пассивно-активного метода НК в условиях открытого космоса [237]. Стратегия орбитального НК предусматривает, что, если выносная сенсорная система челнока (OBSS – Orbiter Boom Sensor System), включающая видеокамеру и два лазера, обнаруживает повреждение обшивки, экипаж челнока должен выполнить более детальное обследование в открытом космосе с помощью цифровой видеокамеры высокого разрешения и тепловизора. Задачей тепловизионного осмотра является оценка размеров и степени опасности повреждения УУ композита, в результате чего должно быть принято решение либо о продолжении полета, либо о необходимости ремонта. Например, небольшая и неглубокая трещина в композите заполняется специальной мастикой, тогда как значительное по глубине повреждение может потребовать наложения "заплатки". Возможно также принятие решения о стыковке челнока с международной орбитальной космической станцией для проведения тщательного ремонта.

Ввиду того, что импульсные лампы, используемые в системе EchoTherm для нагрева панелей в условиях стартовой площадки, достаточно громоздки, а наличие высокого напряжения противоречит требованиям безопасной эксплуатации челноков, для стимуляции дефектов в условиях орбитального полета было предложено использовать естественный градиент температуры между нагреваемой Солнцем и теневой поверхностью космического челнока.

Основные работы по данному проекту заключались в адаптации коммерческого тепловизора ThermoCAM S65 (FLIR Systems) к условиям космического полета. В данной модели были модифицированы несколько блоков, что позволило тепловизору успешно пройти испытания на стойкость к условиям вакуума, радиации, экстремальным температурам и т.п. Например, панель управления тепловизором была существенно изменена, чтобы ею мог пользоваться астронавт в скафандре. Стоимость данных работ, включая два орбитальных испытания, составила 6,4 миллиона долларов США, причем отмечалось, что это был один из немногих контрактов, когда NASA не вышла за рамки запланированного бюджета.

Модифицированный тепловизор был использован во время полета челнока Discovery в июле 2005 г. и к моменту завершения данной книги находился на международной космической станции, где использовался для диагностики состояния электромеханических систем.

В России аналогом описанных выше исследований была программа создания отечественного космического челнока "Клипер", в которой по имеющимся отрывочным данным использовался тепловой метод. В настоящее время данная программа свернута (заменена проектом космического корабля с рабочим названием "Русь").

## 11.9. НЕФТЕХИМИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Энергоемкое нефтехимическое производство характеризуется непрерывностью технологического процесса и высокой стоимостью установок. Мировые нефтехимические компании являются важными потребителями тепловизоров, которые покупают себя в среднем за 0,5 – 1 год.

Согласно зарубежному опыту, выделяют пять основных областей применения

тепловизионной диагностики на нефте-регонных и нефтехимических предприятиях (табл. 11.20):

1) проверка состояния электрооборудования (силовые установки и распределительные устройства);

- 2) контроль технологических линий;
- 3) контроль состояния футеровки и изоляции;
- 4) измерение температуры печных труб;
- 5) оценка энергопотерь.

### 11.20. 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, фторные, электролитические элементы	Повышенная температура	Недостаточная затяжка болта	Неэффективность производства, снижение мощности
	Трансформаторы, прерыватели цепей, разрядники	Повышенная температура	Различные	Выход из строя
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 парообразной, жидкой и твердой фаз	Наличие уровня жидкой или твердой фазы	Загрязнение продукта, сбой в процессе опорожнения, неточная информация о содержимом

Продолжение табл. 11.20

Применение	Оборудование	Признаки дефектности	Причины дефектности	Последствия
Процессная жидкость	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
	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

Продолжение табл. 11.20

Применение	Оборудование	Признаки дефектности	Причины дефектности	Последствия
Печи	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

Наиболее разработано применение ТК для диагностики электрораспределительных систем, что позволяет существенно улучшить надежность энергопитания ключевых промышленных установок. Механическое оборудование подразделяют на две категории: устройства под давлением и установки с вращающимися устройствами. Список оборудования, подлежащего ИК термографированию, включает резервуары и сосуды различного типа, трубопроводы, обменники, колонны, охладители и т.п. Тепловидение наименее пригодно в случае блестящих материалов (нержавеющая сталь) и специальных покрытий, снижающих радиационный обмен со средой. Относительно слабо разработаны методические принципы диагностики состояния компрессоров, электродвигателей, насосов и другого оборудования с подвижными элементами, где скрытые дефекты создают относительно слабые поверхностные сигналы. В печных трубах применение тепловизоров позволяет легче, чем с помощью термопар и ИК термометров, обеспечивать требуемые температурные режимы по всей высоте труб.

В последние годы многие российские нефтехимические заводы, нефте-, газодобывающие и транспортирующие компании внедряют программы тепловизионных обследований. В связи с действием федерального закона о промышленной безопасности, периодическому обследованию подлежат установки основного производства и вспомогательные объекты, обслуживающие эти установки, например, дымовые трубы.

Тепловидение выступает в качестве метода оперативной многоточечной термометрии при диагностике состояния химических реакторов, температура которых нормирована в критических точках (рис. 11.63, а, см. цветную вкладку). С помощью тепловизоров отслеживают уровень продукта в резервуарах, особенно если температура продукта существенно отличается от температуры окружающей среды. При выполнении ряда условий возможна идентификация границ раздела между твердой, жидкой и газообразной фазы. Наиболее просто визуализируется на мониторе тепловизора граница между твердым или жидким продуктом и газообразной средой, поскольку температура

газа изменяется вслед за температурой окружающей среды, в то время как температура материалов с большой тепловой инерцией изменяется медленнее и обнаруживает характерные сдвиги температурных сигналов в ходе суточного цикла. В ряде случаев возможно обнаружение осадка (шлама), наличие которого на практике зачастую уменьшает полезный объем резервуаров и может приводить к значительным экономическим убыткам. Наиболее трудно установить границу раздела газа и пены, а также тонкого слоя шлама и жидкости, в особенности, если шлам скапливается в центре резервуара. В свою очередь, контроль за границей между двумя жидкостями возможен, если они существенно различаются по теплоемкости, например, удастся контролировать структуру вода-нефть. Очевидно, что ТК затруднителен или невозможен на резервуарах, выполненных из материалов с невысоким коэффициентом излучения, например, нержавеющей стали, а также при наличии слоя теплоизоляции или вентилируемых зазоров. Указанные трудности можно преодолеть, нанося на поверхность блестящего металла вертикальную полосу материала с хорошими излучательными свойствами, а также проделывая "окна" в теплоизоляции. Увеличить температурные градиенты на поверхности резервуаров можно путем нагрева, как правило, с помощью мощных фенів. В отличие от традиционного активного ТК, можно нагревать не всю поверхность резервуара, а вертикальную полосу. Применимость метода к емкостям различного размера ограничивается чисто техническими возможностями. Пример термограммы резервуара с отчетливо видимой границей раздела продукт-газ приведен на рис. 11.63, б.

Положительные результаты получены также при испытаниях теплоизоляции химических танкеров, включающей металлический каркас, изоляцию из пенополиуретана и защитные металлические

листы. В силу большой площади участков, подлежащих контролю на танкерных судах объемом до 30 тысяч тонн, метод ИК термографии не имеет альтернативы при быстрой идентификации подозрительных зон. Весьма эффективно тепловизионное обследование теплозащиты изо термических резервуаров с жидким аммиаком, являющееся штатной процедурой на ряде российских предприятий. Резервуар представляет собой наземный двухстенный вертикальный цилиндрический металлический сосуд на железобетонном основании, окруженный железобетонной защитной стенкой (рис. 11.64, а, см. цветную вкладку). Основная теплоизоляция резервуара выполнена из вспученного перлитового песка, засыпаемого между обечайками. На рис. 11.64, б, приведена термограмма такого резервуара, в верхней части которого обнаружена зона слабого повышения температуры ( $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что свидетельствует об оседании перлитового песка. Тепловизионное обследование изо термических резервуаров, как правило, следует проводить в ночное время, чтобы снизить влияние солнечного нагрева и отражений, которые могут маскировать слабые температурные сигналы. Наибольшую трудность представляет съемка купола резервуаров из-за отраженного излучения холодного неба и соседних факелов горящего газа.

На рис. 11.65 (см. цветную вкладку) приведена термограмма теплообменника одного из российских химических предприятий. Значительные внутренние отложения были своевременно удалены благодаря тепловизионной диагностике.

## 11.10. 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 устрой-



ства, 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.

Важной 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, характери-

зующихся 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 комплексы для ТК микросхем и других полупроводниковых приборов входят программируемые столы и автоматизированные системы обработки данных. Например, тепловизионный микроскоп 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. Прибор позволяет контролировать качество нанесения покрытий, измерять тепловое сопротивление, обнаруживать короткие замыкания и разрывы проводников микросхем и т.п. Из используемого в радиоэлектронике специализированного софтвера следует отметить программу EQUAL (FLIR Systems), предназначенную для определения излучательной способности во всех точках зоны контроля с последующей корректировкой измерений и построением карт истинных температур (аналогичная программа используется в вышеупомянутой системе CompuTherm).

В СССР с его развитой электронной промышленностью проводились интенсивные исследования в области ТК (ВНИИ "Электронстандарт"), в частности, были созданы специализированные системы контроля 14ЭЭП300-021, 09ЭИ-1, АСТД и др. [1, 238]. Теоретические основы моделирования процесса ИК контроля и прогнозирования рабочего ресурса радиоэлектронных компонент были обобщены еще в 1974 г. Н.С. Данилиным с соавторами [239]. В настоящее время, судя по отсутствию публикаций, указанные работы оказались свернутыми, по-видимому, в связи с повсеместным переходом российской электронной промышленности на зарубежные комплектующие.

Как отмечено выше, существенной методической проблемой при использовании ТК в радиоэлектронике является разброс излучательных свойств используемых материалов, который может превышать 15 % (см. табл. 7.5). 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. Упомянутая программа EQUAL предусматривает предварительный равномерный нагрев изделия, например, печатной платы, в боксе с температурой +40...+50 °С, после чего составляют карту распределения коэффициента излучения. Затем снимают тепловые поля изделий в рабочем режиме и преобразуют их в карты 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 (дости-

гается 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 температурные сигналы наиболее коррелированы с соответствующими дефектами; 7) внедрение автоматизированных систем, которые имеют высокую стоимость и выпускаются ограниченными партиями.

Основные объекты ТК в радиоэлектронике описаны в табл. 11.21 и книгах [1, 238, 230].

В качестве иллюстрации на рис. 11.66 (см. цветную вкладку) показано тепловое поле платы персонального компьютера, указывающее на наличие перегретых компонент.

### 11.21. 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 локализируются на термограммах

Продолжение табл. 11.21

Объекты ТК	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
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
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

Продолжение табл. 11.21

Объекты ТК	Обнаруживаемые дефекты	Примечания
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

### 11.22. Типовые дефекты металлопроката, подлежащие выявлению методами НК [6]

Тип дефекта	Краткая характеристика дефекта
Центральная пористость	До 10...30 мм в поперечнике
Усадочная рыхлость	До 0,5 диаметра шаблона
Трещины	Протяженность от 2 до 20 мм, глубина различная
Флокены	Диаметр от 1 до 30 мм. Трещины параллельно прокату
Волосовины	Нитевидные дефекты протяженностью от 1 до 100 мм
Расслоения	Расположены параллельно прокату; площадь > 100 мм <sup>2</sup>
Пустоты	Незаварившаяся трещина диаметром от 2 до 20 мм

### 11.11. ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОКАТ

Анализ особенностей активного ТК дефектов металлопроката заслуживает отдельного параграфа, поскольку в этой области накоплен специфический отечественный опыт.

Дефекты металлопроката, описанные в табл. 11.22, 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 УЗ излучения осуществляют через

струю воды. Известны также разработки в области радиационного метода, однако необходимость защиты от ионизирующего излучения сужает область их применения.

Институт "ВЕМО" разработала автоматизированную систему активного ТК дефектов металлопроката [6], в которой нагрев движущегося по рольгангу металлического листа осуществляется 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, производится с помощью нескольких тепловизоров или линейных сканеров. В пилотной установке используется тепловизионная система Thermovision-550, которая на расстоянии 6 м от листа обеспечивает поле обзора  $2 \times 2$  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 в пределах от 100 до 400 кВт/м<sup>2</sup>, а время нагрева каждой точки 0,5...1 с при скорости 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 [6] подробно описаны этапы моделирования активного ТК путем теоретического решения соответствующей задачи теплопроводности и оптимизации параметров аппаратуры. В соответ-

ствии с теорией, изложенной в Главах 3 и 4, оптимизации подлежат мощность и длительность нагрева, а также оптимальное время наблюдения критериев дефектности, в качестве которых выбраны температурный сигнал  $\Delta T$  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 разработки, параллельный бóльший 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 расслоения имитированы воздушными полостями, закрытыми пробками из металла. Автоматизированная система ТК обеспе-

чивала 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 существ-

венно улучшают отношение сигнал/шум.

В табл. 11.23 приведено сравнение систем теплового и УЗ НК. Видно, что параметрам, предъявляемым потребителями к гипотетической оптимальной системе НК, в наибольшей степени соответствует система ТК.

### 11.23. Сравнительные характеристики систем теплового и УЗ НК металлопроката (адаптировано из [9])

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

Продолжение табл. 11.23

Технический параметр системы	Система ТК	Система УЗ НК	Требуемое (желательное) значение
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	—

## 11.12. СВАРНЫЕ И ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

### 11.12.1. 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 воздействие 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 моментами контроля и сварки. Этому недостатка лишены пассивные пирометрические системы, которые измеряют температуру в районе сварочной ванны. Геометрическая форма ванны, абсо-

лютные 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 +10 000 °С до +15 000 °С; поэтому разработаны устройства контроля более низких температур свариваемых материалов в средневольтном ИК диапазоне. Численный анализ процесса сварки, результаты которого описаны в [240], 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 некотором расстоянии. В простых пирометрах измеряют температуру основного металла на фиксированном расстоянии впе-

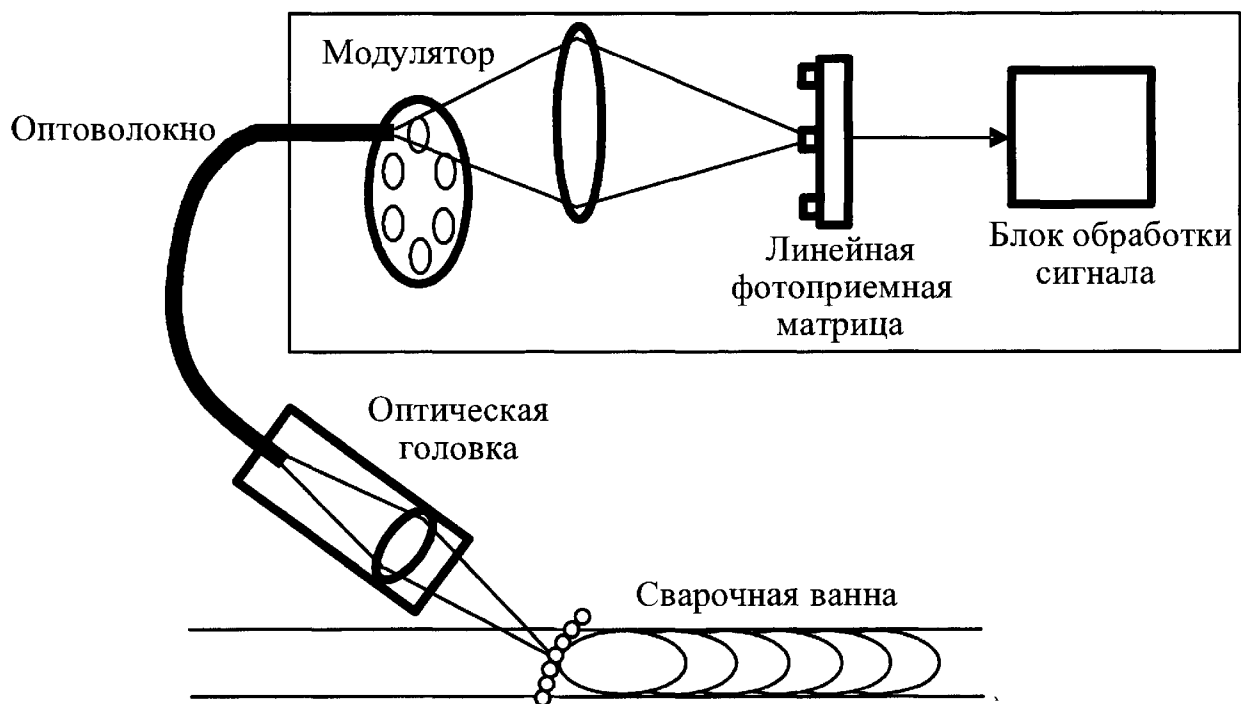
реди края сварочной ванны, что предоставляет информацию о ширине ванны и, косвенно, о глубине проплавления.

Наиболее эффективны сканирующие системы с дискретным измерением температуры вдоль некоторой линии (см. схему на рис. 11.67). Длина световода может достигать 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 [240], 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. 11.67. Данное устройство позволило

проанализировать влияние скорости газовой сварки, тока дуги и расхода газа на вид температурных распределений и качество сварного шва.

### 11.12.2. Точечная сварка

Точечную сварку тонких металлических листов, выполняемую путем пропускания импульсов электрического тока между двумя электродами, широко применяют в автомобилестроении. Типичный 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 более, чем в 100 млн. долларов ежегодно, причем время испытаний одного автомобиля составляет 7...10 дней.



**Рис. 11.67. Линейно-сканирующий ИК пирометрический датчик для контроля температуры при сварке (адаптировано из [240])**



Качество точечных швов определяется диаметром и структурой литой зоны. Очевидно, что эти параметры могут оказывать заметное влияние на характер теплопередачи через шов. Первые работы в области ТК были выполнены в СССР Н.А. Бекешко и Ю.А. Поповым еще в 70-е годы прошлого века [241, 242]. В работе [241] для нагрева швов в одно- и двусторонней процедуре ТК был использован плазмотрон, а критерием дефектности служил характер динамического измерения температуры в зоне шва, которую измеряли ИК радиометром. В более поздней работе тех же авторов для нагрева было предложено оценивать качество швов в двухсторонней процедуре тепловизионного контроля по наблюдаемому диаметру кольцевой изотермы, который линейно связан с диаметром литой зоны и увеличивается во времени [242]. Эксперименты были выполнены на стали 10Г2С толщиной 5+5 мм; нагрев производили лампой К-220/500. Теоретический анализ процесса охлаждения точечного шва с внутренним дефектом был выполнен В.П. Вавиловым и др. [243]. Несмотря на чрезмерное упрощение геометрии контроля, что не позволило применить принятую модель на практике, значение работы [243] состояло в том, что в ней впервые было 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 низ-

кого метрологического уровня тогдашних тепловизионных систем, не позволявших надежно измерять положение изотерм при повторяющихся испытаниях. Исследования в данном направлении были возобновлены в последние годы с использованием импульсного ТК, схема которого показана на рис. 11.68, а [244]. Для нагрева используют стандартные импульсные лампы и высокоскоростные тепловизионные системы. При фокусировании излучения лампы с энергией 6 кДж в импульсе длительностью 5 мс в зоне диаметром 2,5 см получено 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 тепловых изображениях сварных швов наблюдалось только в интервале времен от 15 до 65 мс после нагрева, причем дефектные швы характеризовались ярко выраженной зоной пониженной температуры (см. рис. 11.68, б).

### 11.12.3. Диффузионная сварка заготовок силовых выпрямительных элементов

В работе [245] описан ТК заготовок мощных выпрямительных элементов (ВЭ), которые 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.

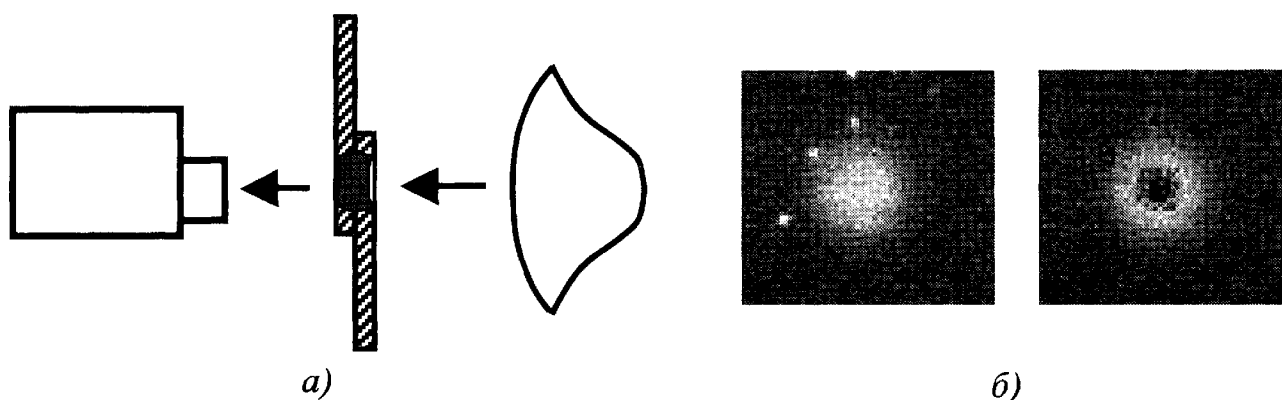


Рис. 11.68. Схема импульсного ТК точечных сварочных швов (а) и термограммы бездефектного (слева) и дефектного (справа) швов (б)

Диффузионная сварка стандартных образцов ВЭ была выполнена на установке УДС-3 в следующем режиме: температура +540 °С, давление 15 МПа, время выдержки 300 с, вакуум 66,5 мПа. Искусственные дефекты вносили в алюминиевую фольгу путем вдавливания, а также травления в слабом растворе соляной кислоты на глубину 15...20 мкм (см. рис. 11.69, а).

В реальных изделиях дефекты могут располагаться как между кремнием и алюминием, так и между алюминием и вольфрамом (рис. 11.69, а). На заключи-

тельной стадии технологического процесса на поверхность кремния наносят электрод из напыленного алюминия. Было установлено, что при отсутствии металлизации кремниевого слоя внутренние дефекты предварительно нагретого изделия видны с помощью тепловизора при визировании непосредственно через кремний, который прозрачен для ИК излучения (при этом имеют место не температурные, а чисто оптические эффекты). Схема искусственных дефектов и соответствующая термограмма изделия показаны на рис. 11.70.

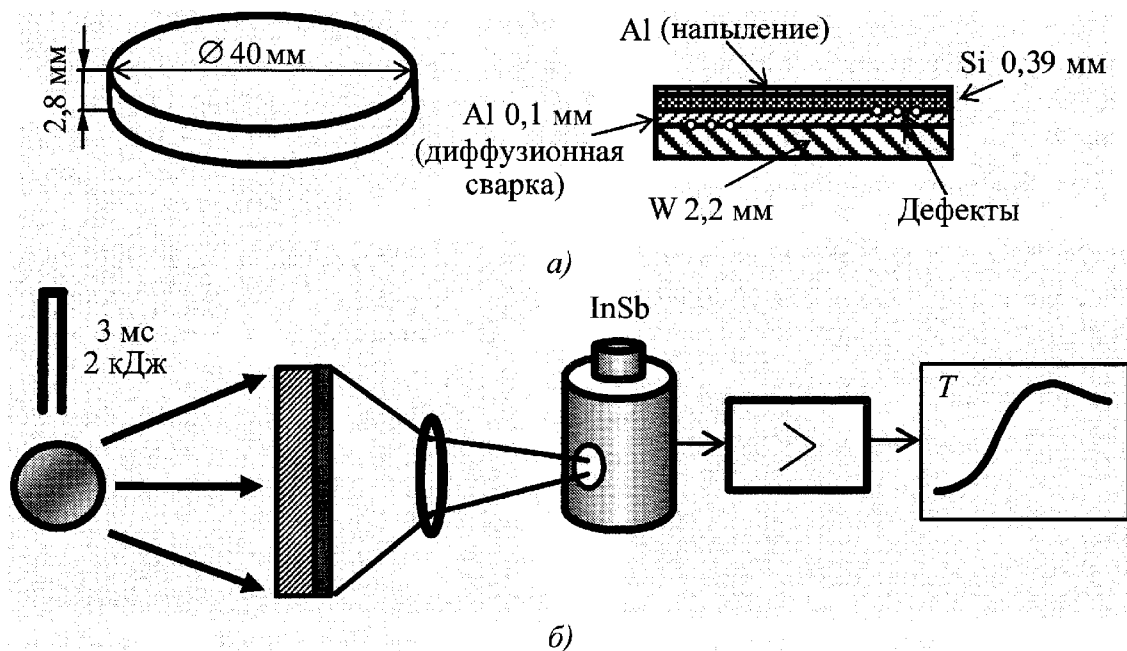


Рис. 11.69. Активный ТК качества диффузионной сварки силовых ВЭ:  
а – схема ВЭ; б – схема двустороннего импульсного ТК

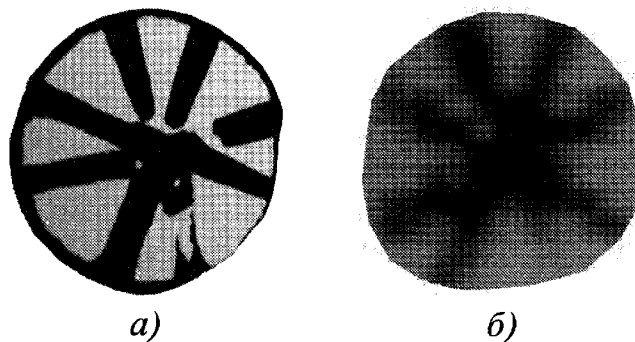


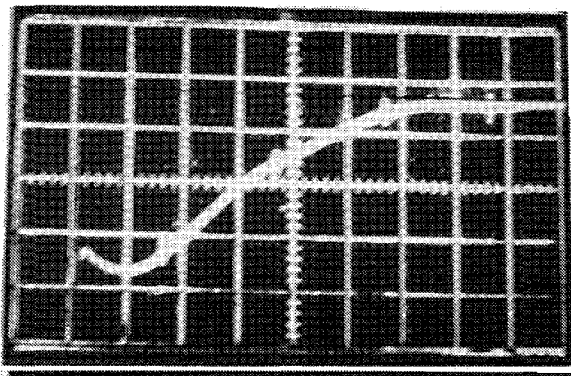
Рис. 11.70. Результаты тепловизионного контроля качества диффузионной сварки заготовок силовых выпрямительных элементов без внешней металлизации:  
а – искусственные дефекты (получено методом шлифа после разрушения изделия);  
б – термограмма дефектов (тепловизор ТВ-03)

После металлизации кремния (напыления алюминия), дефекты могут быть обнаружены при использовании двухстороннего импульсного ТК. Критерием дефектности служил характер изменения температуры во времени (метод определения температуропроводности по Паркеру). Примеры температурных откликов бездефектного и дефектного ВЭ приведены на рис. 11.71 (заметим, что наличие дефектов, внесенных описанным выше способом, приводило к росту интегральной температуропроводности). Усредненные значения интегральной температуропроводности для изделий различных классов качества приведены в табл. 11.24.

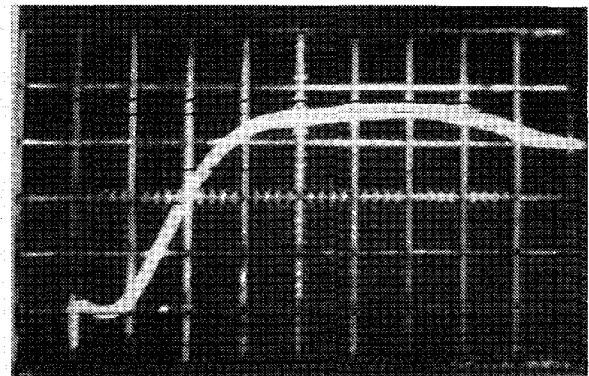
Статистическая оценка результатов ТК показала, что данным способом можно обнаруживать дефекты, занимающие более 5 % площади ВЭ.

### 11.12.4. Активный ТК паяных соединений

В 1986 г. в Томском НИИ интроскопии был разработан фоторегистрирующий ИК дефектоскоп ФИД-1, который явился дальнейшим развитием серии строчно-сканирующих дефектоскопов типа ТД-21А, созданных В.А. Стороженко в Харьковском институте радиоэлектроники [246, 247]. Прибор ФИД-1 был предназначен для активного ТК двухслойных металлических (сталь-бронза) цилиндрических изделий, изготовленных способом пайки (см. схему контроля на рис. 11.72, 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



а)



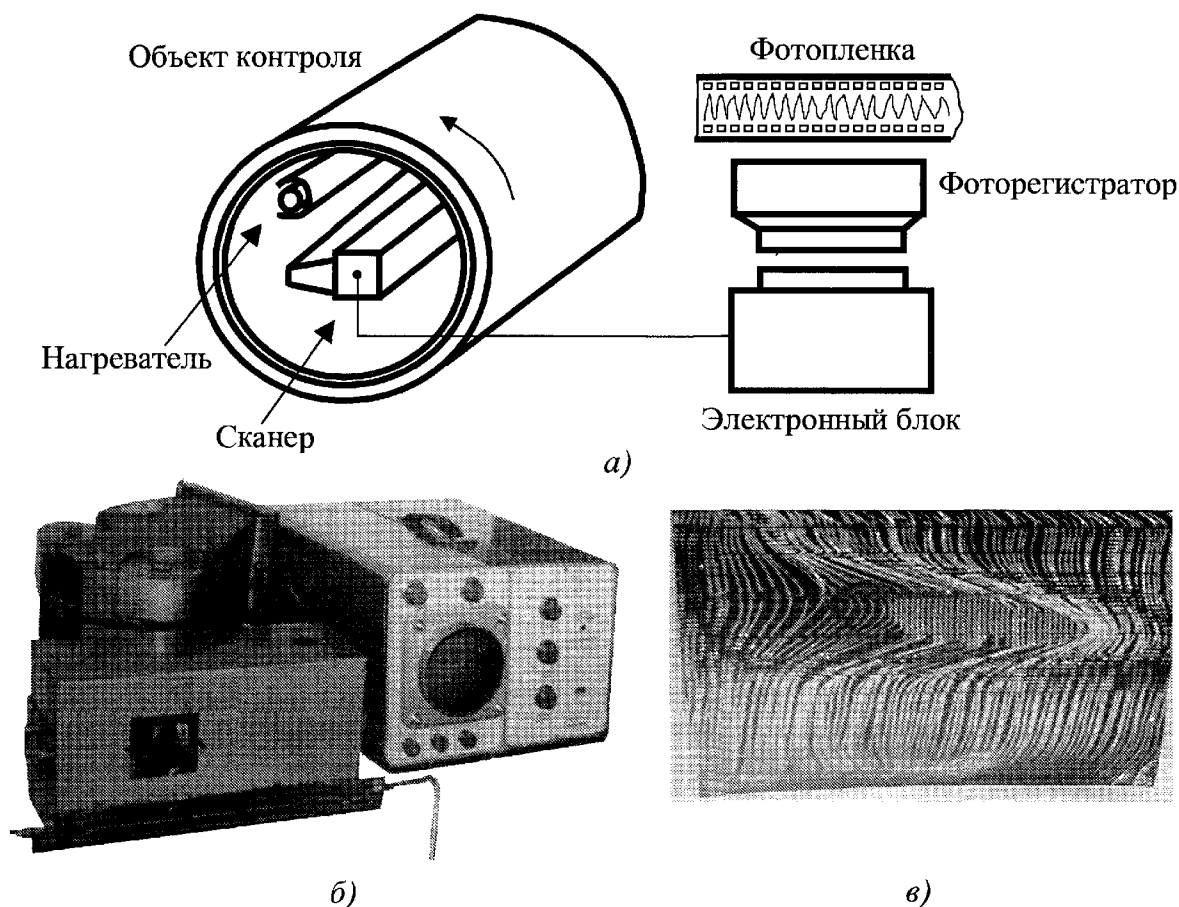
б)

**Рис. 11.71. Результаты импульсного ТК качества диффузионной сварки заготовок силовых ВЭ с внешней металлизацией:**

а – бездефектное изделие; б – изделие с дефектом размером 20 × 20 мм

### 11.24. 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. 11.72. Фоторегистрирующий ИК дефектоскоп для ТК паяных изделий (Томский НИИ интроскопии, 1986):**

*а* – схема контроля; *б* – внешний вид; *в* – пример записи температурных профилей на рулонную фотопленку

профилей (рис. 11.72, *б*) на рулонную фотопленку, которая перемещалась перед электронно-лучевой трубкой синхронно со сканированием (рис. 11.72, *в*).

В силу аналогового характера записи результатов, прибор ФИД-1 представляет собой скорее исторический интерес, будучи свидетельством уровня отечественных разработок в области активного ТК в 80-х годах прошлого века.

### 11.13. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ

В машиностроении внедрение гибких автоматизированных производств поставило задачу прогнозирования срока службы твердосплавного режущего инстру-

мента, широко используемого роботизированными станками 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 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. 11.73. Режущий инструмент устанавливается в кассету и нагревается 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. 11.74, а) определяют интегральный коэффициент температуропроводности данного типа режущего инструмента. При калибровочных механических испытаниях износостойкость (срок службы) инструмента оценивалась по износу режущей кромки. Коэффициент корреляции между температуропроводностью и износом режущей кромки составлял от 0,65 до 0,8. Вид корреляционного поля и регрессионная кривая показаны на рис. 11.74, б.

Испытания партий режущего инструмента, изготовленных различными производителями, показали, что даже в пределах одной партии может наблюдаться существенный разброс значений температуропроводности и, соответственно, срока службы. Оценка качества отдельного инструмента осуществляется в течение нескольких минут с учетом того, что для

усреднения данных рекомендуется выполнить 3...5 измерения для различных положений образца в кассете.

#### 11.14. ОБНАРУЖЕНИЕ КОРРОЗИИ В МАССИВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Человеческая 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

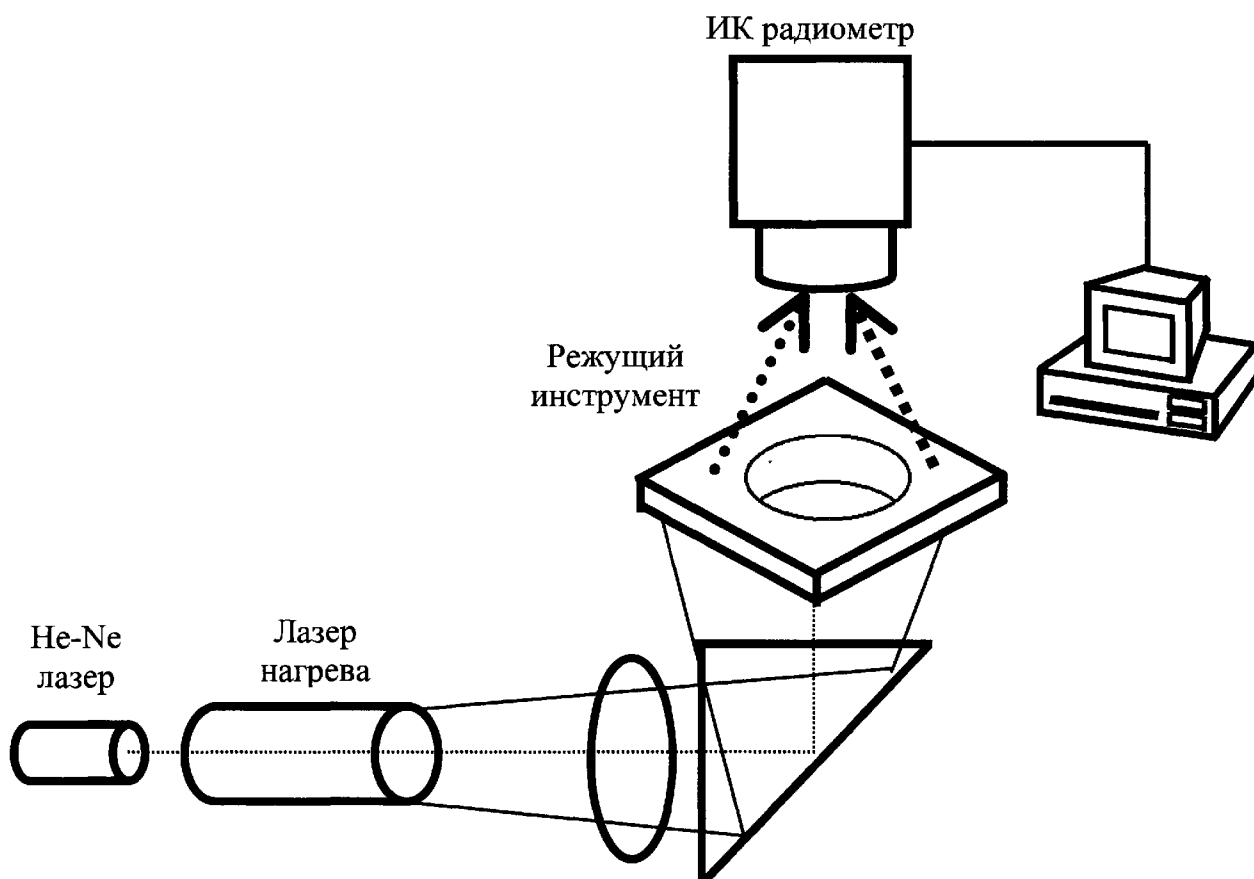


Рис. 11.73. Определение интегральной температуропроводности режущего инструмента по методу Паркера

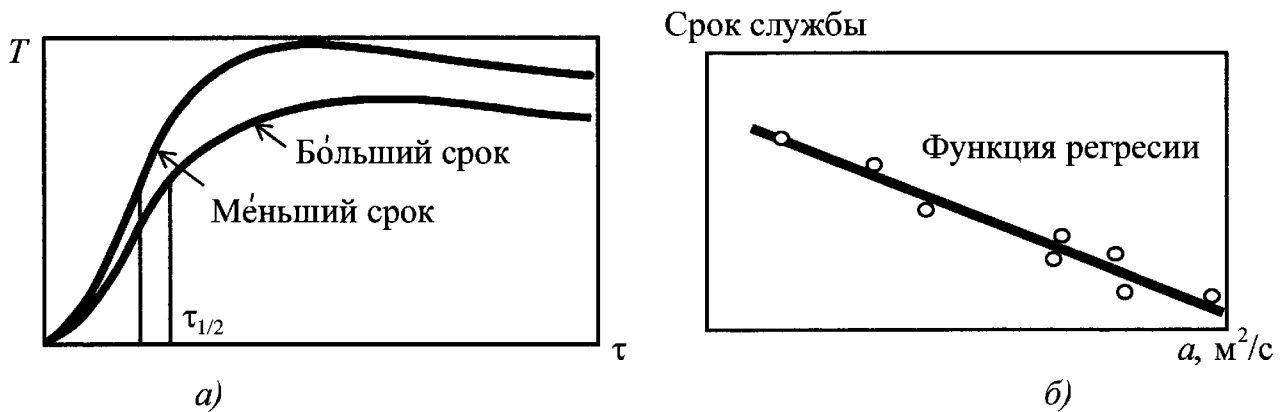


Рис. 11.74. Оценка срока службы режущего инструмента по теплопроводности: а – регистрируемый температурный сигнал; б – функция регрессии

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

- В стальных изделиях температурные сигналы в зонах уноса материала существуют в течение значительно более длительного времени, нежели в тонких алюминиевых листах (вплоть до десятков секунд), однако с ростом толщины металла усиливается диффузия тепла, а также возникает проблема оптимального прогрева изделия по всей глубине, что требует поглощения металлом значительной энергии.

- Результатом компромисса между факторами, определяющими эффективность ТК коррозии в металлах, является то, что тепловой метод оптимален для обнаружения коррозии в стали толщиной 1...3 мм (эта область применения ТК детально рассмотрена ранее).

- 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 разработана система ТК коррозии в котлах тепловых электростан-

ций (ТЭС), реализующая принцип линейного сканирования [248]. Площадь поверхности котлов, подлежащей контролю, может достигать 9000 м<sup>2</sup>, 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 формируется с помощью компьютера путем отбора тех строк сканирования, которые соответствуют определенному времени задержки (~ 0,5...1 с). В качестве прототипа авторы системы ссылаются на метод, описанный К. Малдагом в 1993 г., однако справедливости ради следует заметить, что в СССР устройства ТК с полосовым нагревом были разработаны В.А. Стороженко и Д.А. Рапопортом с сотрудниками еще в 70-х годах прошлого века [230, 247]. При НК стеклопластиковых композитов эффективность этих устройств была весьма высокой.

Унос материала на задней поверхности металлической стенки идентифицируют, используя упрощенное решение задачи нагрева адиабатической пластины толщиной  $L$  движущимся со скоростью  $V$

линейным источником с удельной мощностью  $q$ , Вт/м:

$$T(x, z) = \frac{q}{LVC\rho} \left[ e^{-V \frac{(x+|x|)}{2a}} + 2V \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) e^{-\frac{Vx+|x|\sqrt{(2n\pi a/L)^2 + V^2}}{2a}} \right]. \quad (11.30)$$

Формула (11.30) справедлива для так называемой "дальней зоны", причем начало координат совпадает с движущейся линией нагрева [236]. 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

$$x < \frac{2a}{V - \sqrt{(2\pi a/L)^2 + V^2}} \approx \frac{L}{\pi}. \quad (11.31)$$

При значительных 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

$$T \approx \frac{q}{LVC\rho}, \quad (11.32)$$

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 удов-

летворительным; расхождения объяснялись наличием выгнутых труб, нагрев которых отличался от нагрева основной массы труб. Равномерность нагрева была 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.

В качестве иллюстрации на рис. 11.75, а (см. цветную вкладку) приведена термограмма секции котла ТЭС, полученная путем нагрева с помощью двух импульсных ламп (совместные исследования Томского НИИ интроскопии и Института технологии конструкций, Италия). На термограмме отчетливо видна зона уноса 36 % материала на внутренней поверхности трубки; заметим, что поверхность секции не подвергалась какой-либо механической обработке, но изображение рис. 11.75, а получено после компьютерной обработки последовательности.

Пример ТК более толстостенного стального изделия приведен на рис. 11.75, 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 лабораторные эксперименты по обнаружению коррозии в коленах стальных труб [249]. 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.

### 11.15. АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ

ИК термографию успешно применяли при диагностике гоночных автомобилей, хотя данный метод может найти применение и при испытаниях обычных автомобилей. Так, например, пониженная температура тормозов может быть вызвана их неэффективной работой. ИК термография двигателя и системы выхлопа позволяет быстро измерить температуру критических деталей (заметим, что 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 [250]. Тепловые методы эффективны при разработке систем охлаждения радиаторов автомобилей, анализе трещинообразования в колесах, ветровых стеклах и фарах.

В свое время фирма AGEMA Infrared Systems выпускала стробоскопическую приставку к тепловизорам, что позволяло снимать температурное поле вращающихся шин в процессе их испытаний. Внутренние дефекты шин, например, отслоения корда от резины, обнаруживались в результате нагрева при трении шины о ролик. Судя по отсутствию публикаций, в настоящее время работы в этой области свернуты, в том числе, благодаря появлению более эффективных способов НК качества шин, например, голографической интерферометрии.

Из новейших применений ТК в автомобилестроении можно отметить автоматизированную вихретоко-тепловую систему фирмы Starmans Electronics (Чехия),

которая предназначена для обнаружения трещин в стальных стержнях квадратного сечения, используемых для изготовления валов и шпинделей [251]. Изделия на скорости до 0,2 м/с проходят сквозь кольцевой индукционный нагреватель. Для обзора стержней по периметру предложено использовать четыре высокочувствительных тепловизора. Предварительные испытания системы обеспечили выявление всех дефектов в соответствующем стандартном образце (минимальные размеры трещин составили 0,3 мм, или 0,3 % толщины самых тонких стержней).

### 11.16. ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Производство бумаги исторически явилось одной из первых областей удачного применения 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, работало именно в этой отрасли. При движении теплого бумажного листа участки с различной степенью увлажнения хорошо видны вследствие испарения воды. Влажность бумажного листа и ее распределение по ширине является критическим фактором качества, поэтому тепловой метод широко применяют в целлюлозно-бумажном производстве Скандинавии, Великобритании и США.

### 11.17. СУДОСТРОЕНИЕ (композиционные материалы)

Корпуса крупных речных и морских судов изготавливают из стали способом сварки, поэтому их НК проводят визуальными-измерительными, радиационными, УЗ, вихретоковыми 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, теп-



ловой метод является эффективным средством НК.

Т. Джонсом и Э. Линдгреном описаны результаты ТК элементов минного тральщика МНС-51, изготовленных из стеклопластикового композита [252]. Положительные результаты были получены при испытаниях корпусного каркаса, деталей кормовой палубы, кили и переборок.

### 11.18. 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 для оценки теплопотерь и обнаружения дефектных зон производственных корпусов, диагностики 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. 11.76 (см. цветную вкладку) приведена термограмма стены холодильного корпуса одного из российских мясокомбинатов, полученная с целью определить объем необходимого ремонта. Очевидно, что в условиях экономии средств целесообразно выполнить первоочередной ремонт в тех участках, где нарушена теплоизоляция стены (на рис. 11.76 дефектные участки обозначены овалами).

### 11.19. 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 различные 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. была 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 финансировался 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 режиме 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 обнаруживались, например, на фоне снега, создающего равномерный температурный фон (отечественный опыт бортовых тепловизионных съемок обобщен в книге Р.М. Алеева и др. [253]). В условиях неравномерного фона идентификация утечек затруднительна, даже если они сопровождаются значительными температурными аномалиями.

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 наблюдается в виде холодной зоны вследствие *поглощения*. Данный принцип использован в аппаратуре фирмы FLIR Systems (см. Главу 9).

Предварительные результаты по пассивному тепловизионному обнаружению облаков газа из трубопроводов с невысоким давлением были сообщены С. Лунгбергом в рамках выполнения проекта VOGUE [254]. 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 нескольких 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 подсти-

лающей поверхности. В России разрабатываются *комбинированные* системы обнаружения утечек, включающие как пассивный (тепловизионный), так и активный (лазерный) канал (аппаратура компании «Пергам-Инжиниринг»).

С методологической точки зрения, обнаружение утечек продукта из трубопроводов, в особенности заглубленных, является сложной научно-технической задачей. В книге [253] 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. По этой причине рекомендуется проводить обследования 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 [253]. 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.

В тепловизионном канале, помимо непосредственного обнаружения утечек продуктов, возможна оценка глубины залегания трубопровода  $l$  по поверхностному температурному перепаду  $\Delta T$ . Таким способом возможно выявить зоны "всплывания" трубы из почвы, в которых возрастает опасность нарушения целостности трубопроводов вследствие сдвигов почвы и движения наземного транспорта. Автором предложена простая формула для оценки  $l$  в зависимости от диаметра трубы  $D$ , теплопроводности почвы  $\lambda_s$ , коэффициента теплообмена  $\alpha$ , температур окружающей среды  $T_a$  и поверхности почвы  $T_s$ :

$$l = 0,297\lambda_s^{0,716} \alpha^{-0,542} D^{0,171} \Delta T_{norm}^{-0,893},$$

если  $|T_a - T_s| \leq 3^\circ\text{C}$ ;

$$l = 1,02\lambda_s^{0,543} \alpha^{-0,813} (T_a - T_s)^{-0,304} \times \\ \times D^{0,102} \Delta T_{norm}^{-0,762}, \quad (11.33)$$

если  $T_a - T_s > 3^\circ\text{C}$ ;

$$l = 0,42\lambda_s^{0,705} \alpha^{-0,747} (T_a - T_s)^{0,076} \times \\ \times D^{0,188} \Delta T_{norm}^{-0,914},$$

если  $T_s - T_a > 3^\circ\text{C}$ .

Здесь  $\Delta T_{norm} = \Delta T / (T_p - T_s)$ , где  $T_p$  — температура трубопровода.

Экспериментальные результаты отечественных исследований по тепловизионной диагностике целостности трубопроводов в различное время года приведены в [253].

## 11.20. ИК АЭРОСЪЕМКА

Аэрофотосъемка, в том числе в ближнем ИК диапазоне, применялась в течение почти всего прошлого столетия, в то время как регистрация излучения Земли в среднем ИК диапазоне стала возможной после создания бортовых тепловизоров,

а также с началом широкого использования портативных тепловизоров на борту самолетов и вертолетов.

Считается, что в целом средне- и длинноволновые 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, вулканы и геотермальные источники, лесные и торфяные пожары, животные и люди и т.п. В некоторых случаях удастся 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. Посредством съемки водной поверхности исследуют тайфуны, течения и обнаруживают источники "теплового загрязнения" водной среды (см. рис. 11.39).

ИК аэросъемка с борта самолетов и вертолетов помогает обнаружить очаги лесных и подземных пожаров, зоны самовозгорания в угольных шахтах, запыленные снегом трещины в ледниках и т.п. Тепловой метод 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, подсчета поголовья диких животных и т.п.

Для съемки природных ресурсов и для военных целей были созданы космические системы (в США: ERTS, SkyLab, HCMM, Spot, Irs, ADEOS, Landsat; в СССР

и в России: "Метеор-Погода", "Космос", "Ресурс-0"; 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 каналам, 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 (г. Москва), имеют массу 1900 кг, из них 500 кг приходится на полезную нагрузку.

Пространственное разрешение сканирующего устройства МСУ-Э, работающего в диапазоне от 0,5 до 0,9 мкм, составляет 45 м поперек и 32 м вдоль полета при ширине полосы сканирования 45 км. ИК сканирующее устройство МСУ-СК работает 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 Гбит, что позволяет хранить до 100 снимков размеров 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. Спутник передает информацию со скоростью 150 Мбит/с, которая принимается 21-й приемной станцией.

В табл. 11.25 приведены цены на спутниковые изображения.

**11.25. Цены на спутниковые изображения [255]**

Спутник/датчик	Число каналов	Стоимость снимка, долларов США	Ширина полосы съемки, км	Пространственное разрешение, м	Стоимость съемки площади 100 км <sup>2</sup> , 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

### 11.21. ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТИВОПЕХОТНЫХ И ПРОТИВОТАНКОВЫХ МИН

Согласно оценкам ООН более, чем в 80 странах мира установлено свыше 100 млн. противопехотных мин (по другим оценкам: от 200 до 300 млн.). Также следует отметить, что интенсивность установки новых мин составляет приблизительно 1 млн. штук в год, что в 20 раз превышает интенсивность разминирования. Жертвами мин становятся 26 тыс. 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 военные 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.

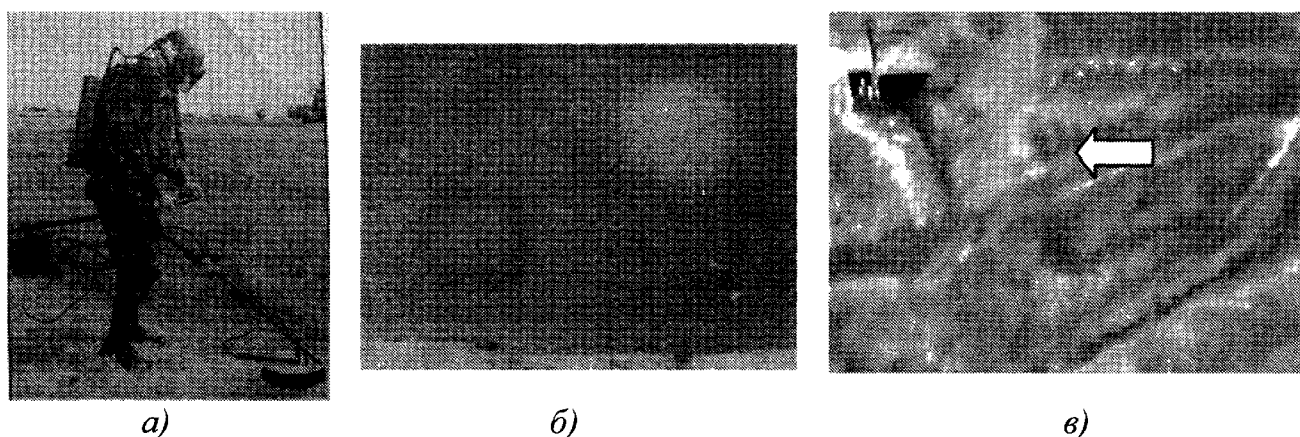
В США введены в действие программы по данной или родственной тематике (исследовательская корпорация Коулмана, Центр изучения окружающей среды армии США и др.). В течение нескольких последних лет в рамках ежегодного симпозиума Defense & Security (бывший AeroSense) проводится специализированная конференция 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 количество технических средств для обнаружения поверхностных и заглубленных 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, исполь-

зующей различные физические принципы. На практике продолжают широко использовать визуальный контроль, собак-ищек и стандартные металлоискатели. Однако современные безоболочечные мины могут содержать металлические детали весьма малой массы, что делает металлоискатели бесполезными. С другой стороны, на поле боя и в зонах проживания населения имеется большое количество металлических объектов, создающих высокий уровень ложной тревоги. В настоящее время перспективными считаются георадары, а также ИК системы (рис. 11.77, 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, изменением 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) создают сигнал, превышающий помехи.

Тепловизоры используют для обнаружения мин, скрытых в почве, в течение нескольких десятилетий. В монографии Р. Хадсона [12] упоминается, что предельная глубина обнаружения может достигать 40 см, что представляется преувеличением в свете более поздних исследований. Механизм чистой теплопроводности был рассмотрен ранее, 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.



**Рис. 11.77. Обнаружение скрытых в почве противопехотных мин:**

*а* – солдат армии США использует детектор металла, нащлемный тепловизор и георадар; *б* – термограмма мин без оболочки (справа) и в алюминиевом корпусе, размещенных в песке на глубине 3 см (мощность инсоляции около  $250 \text{ Вт/м}^2$ ; *в* – термограмма двух мин, скрытых в почве открытого лесного участка (с высоты 30 м)

На 11.77, *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 инсоляции. Следует подчеркнуть, что, благодаря низкой теплопроводности тринитротолуола, круглая безоболочечная мина создает положительный температурный сигнал  $\Delta T$ , а мина в металлическом корпусе – отрицательный. При более мощной инсоляции выявляемость мин может быть существенно лучше; например, армия США с успехом использовала тепловизионную технику обнаружения мин в Кувейте в ходе операции "Шторм в пустыне". Значительно более трудный случай обнаружения мин в почве, покрытой растительностью, приведен на рис. 11.77, *в*. В данном случае идентификация возможна благодаря круглой форме соответствующих температурных отпечатков (опыту оператора).

## 11.22. СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ, ОХРАНЫ И АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Первые приборы ночного видения (ПНВ), появившиеся перед Второй мировой войной, использовали подсветку сце-

ны ИК прожектором и легко обнаруживались 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 класса приборов негативно сказывается наличие в сцене точечных ярких источников света (эффект "ослепления"). С появлением относительно недорогих малогабаритных тепловизоров, использующих матричные неохлаждаемые приемники излучения, расширяется применение тепловизионных ПНВ.

Преимуществами тепловизоров являются пассивность, слабая зависимость 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 на тепловизоры. Тем не менее, появились сообщения о продаже в США малогабаритных тепловизоров рыбакам-охотникам по цене около 6 тысяч долларов. Полицией США принят к использованию вариант тепловизора ThermaCAM 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.

Фирмой H.E.A.T. разработаны два типа коммерческих систем, в которых комбинируются сигналы усилителя яркости и тепловизора (техника слияния изображений – fusion vision). В первом типе приборов чисто оптическое изображение, полученное с помощью усилителя яркости, накладывается на дисплей теплового изображения форматом 1280 × 1024. Пользователь имеет возможность регулировать яркости отдельно по каждому каналу с целью адаптироваться под конкретную ситуацию. Приборы второго типа работают с цифровыми изображениями и могут включать набор различных алгоритмов предварительной обработки данных с целью облегчить оператору принятие решения. В данных приборах возможно использование дополнительных устройств (системы определения наземных координат GPS, выведения карт местности и т.п.). Во всех указанных приборах используют тепловизионные модули с форматом изображения 160 × 120, 320 × 240 и 640 × 480.

Тепловизоры находят все большее применение при тушении пожаров. Для этой сферы применения созданы упрощенные варианты приборов, работающих при высокой температуре среды (преимущественно, разработки фирмы BAE Systems). Тепловизоры позволяют пожарным измерять температуру в различных зонах и идентифицировать участки, где она близка к температуре возгорания бумаги, дерева и т.п. В условиях задымленности тепловизоры обеспечивают прием-

лемую видимость, что делает стратегию тушения пожаров более осмысленной.

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.

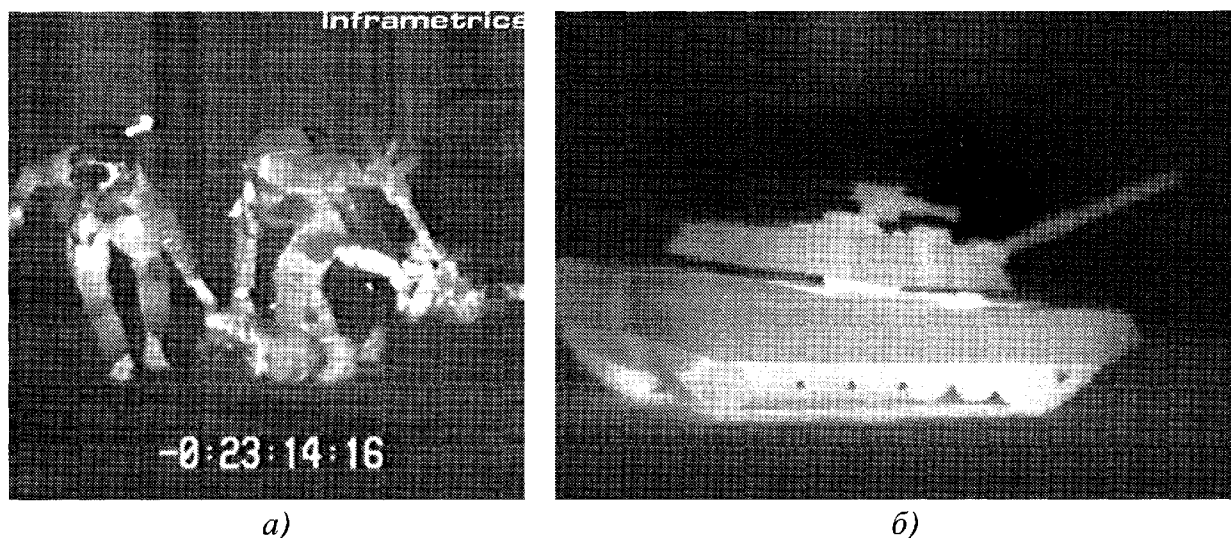
В ряде стран, например, в Финляндии, созданы поддерживаемые муниципальными органами фирмы, в задачу которых входит поиск пропавших людей с помощью тепловизора, установленного на борту вертолета. Сообщалось об использовании тепловизоров для поиска людей под развалинами зданий, например, после землетрясений.

Тепловизионное наблюдение, включая ночное видение, является основной областью применения тепловидения в качестве средства обеспечения антитеррористической деятельности, что приобрело в последнее годы важное значение.

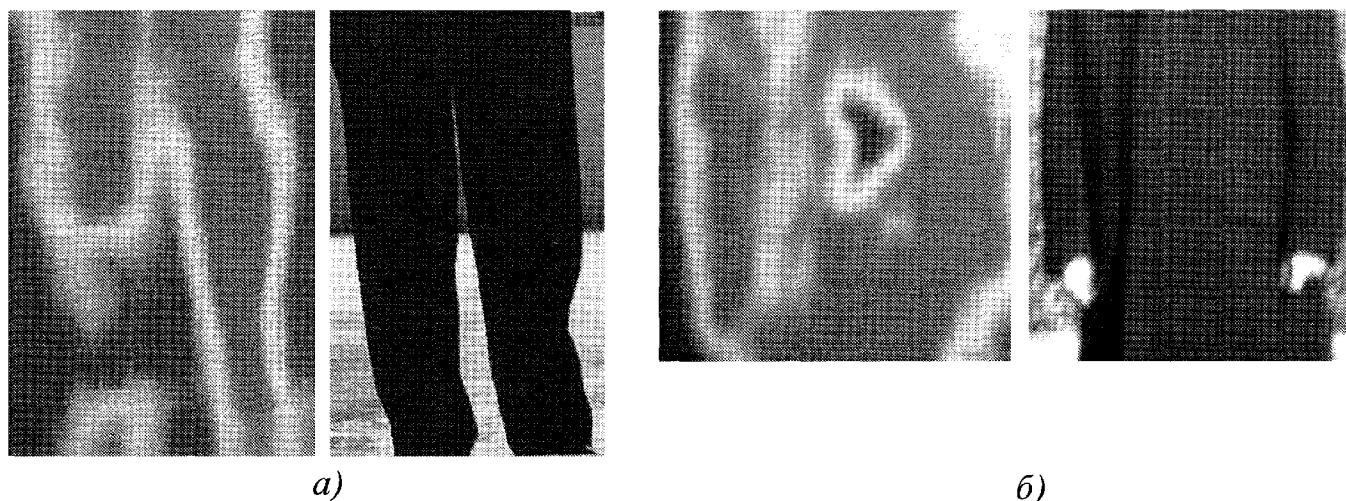
Две иллюстрации использования тепловизоров в качестве ПНВ показаны на рис. 11.78. В последние годы несколькими фирмами, в частности, ThruVision (Великобритания), разрабатываются системы пассивного и активного видения терагерцового диапазона, т.е. использующие длины волн электромагнитного излучения около 1 мм. Соответствующая иллюстрация приведена на рис. 11.79.

### 11.23. ВОЕННАЯ СФЕРА

Обзор развития ИК техники, приведенный в п. 7.1, показывает, что, как и во многих других областях науки и техники, развитие ИК технологии стимулировалось военными применениями. Их подробный анализ выходит за рамки настоящей книги, поэтому, в основном, ограничимся их перечислением (обнаружение заглубленных мин с помощью теплового метода описано подробно потому, что в данной



**Рис. 11.78. Применение тепловизоров в качестве приборов ночного видения (ПНВ):**  
*а* – полицейская операция; *б* – обнаружение боевой техники



**Рис. 11.79. Выявление скрытых объектов на расстоянии 10 м с помощью "тепловизоров" терагерцового диапазона типа Т-4000 производства фирмы ThruVision (Великобритания):**  
*а* – наркотики на ноге под брюками; *б* – пистолет под шерстяным пальто

технологии реализованы принципы активного ТК). В большинстве случаев военного применения ИК техники используются ее такие преимущества, как дистанционность, скрытность от визуального обнаружения, привязка к энерговыделяющим объектам.

Основными направлениями военного применения тепловидения 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 излу-

чению 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 как средство наведения боевых средств.

Наблюдение объектов в ИК диапазоне электромагнитного излучения было описано в п. 11.22. 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 осуществляется 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 *сигатурой*. Восприятие и оценка распределения испускаемого излучения по поверхности объекта составляет основу выявления и расшифровки ИК сигатур. В табл. 11.26 приведены основные факторы и субфакторы, влияющие на обнаружение целей по ИК излучению и расшифровку их ИК сигатур. Поскольку не существует единой модели объектов обнаружения, которая учитывала бы все перечисленные в табл. 11.26 факторы, разрабатывают модели, привязанные к специфическим сценариям обнаружения и ИК системам определенного типа.

### 11.26. Факторы, влияющие на обнаружение целей по их тепловому излучению [155]

Основной фактор	Субфакторы	
Факторы, связанные с назначением системы	Разведка. Наблюдение. Навигация. Векторная атака	Атака целей противника. Оценка разрушений
Цели и фоны	Тип. Размер. Форма. Контраст. Температура. Отражательная способность. Излучательная способность	Движение. Затенение. Маскировка. Камуфляж. Поверхностные помехи (clutter). Отличительные признаки

Продолжение табл. 11.26

Основной фактор	Субфакторы	
Окружающая среда	Видимость. Облачность. Положение Солнца. Инсоляция. Суточные изменения параметров. Сезонные изменения параметров	Уровень освещения. Ослабление. Пропускание. Рассеяние. Излучение вдоль трассы. Турбулентность
Платформа	Экипаж и взаимодействие его членов. Уровень вибраций. Время экспозиции цели	Высота. Расстояние. Скорость
Параметры детектора	Тип. Спектральный диапазон. Поле зрения. Разрешение. Динамический диапазон. Чувствительность	Пространственная частота отбора данных. Тип развертки. Частота кадров
Система воспроизведения изображений	Угол наблюдения экрана. Соотношение размеров. Цветовая палитра. Отношение сигнал/шум. Разрешение. Ресурс фосфорного слоя. Характеристики полутонного представления данных	Тип развертки. Контраст. Наличие вуали. Фоновая освещенность. Фликкер-эффект (мерцание). Частота кадров. Размер поля поиска
Параметры оператора	Обученность. Мотивация. Опыт. Наличие стресса. Степень важности задачи	Острота зрения. Шаблон поиска. Усталость. Возраст. Коэффициент интеллекта (IQ)

Военная ИК техника широко 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 о фрагментарном использовании тепловизионных ПНВ российской армией в Чечне.

Представляет интерес привести порядок цен на военные тепловизоры зарубежного производства. Например, амери-

канский танковый тепловизор стоит около 100 тыс. долларов США, цена тепловизионного устройства для стрелкового прицела составляет 30 тыс. долларов, а цена вертолетной противотанковой системы может достигать 600 тыс. долларов. В то же время, как отмечалось выше, появление неохлаждаемых матричных фотоприемников может существенно снизить цены на неизмерительные тепловизоры и сделать их доступными и российской

армии. В 2008 г. заключен контракт между ФГУП "Рособоронэкспорт" и французской компанией Thales на поставку большого количества (1000!) тепловизоров Catherine для бронетехники российской армии.

В последние годы уделяется особое внимание защите ключевого персонала правительств и крупных компаний от террористов и преступников. Специально с целью снижения риска передвижения по дорогам в угрожаемых зонах американской компанией Ibis-Tek разработана установка Cobra на базе типового автомобиля-внедорожника. Установка снабжена выдвигающимся пулеметом с углом обстрела 360°. В качестве средства ночного видения и наведения на цель использован тепловизор EMX на базе ИК матрицы форматом 160 × 120 и объектива с фокусным расстоянием 100 мм. Система Cobra значительно дешевле аналогичных военных машин и требует меньше обслуживающего персонала.

## 11.24. МЕДИЦИНА

### 11.24.1. ИК тепловидение

В 1939 г. Д. Харди обосновал возможность регистрации температуры тела человека по ИК излучению. За прошедшие годы медицинские приложения стали очевидным и динамичным аспектом тепловидения. Пик интереса к медицинскому тепловидению в СССР пришелся на 80-е года прошлого века, когда тепловизионные осмотры населения проводились более, чем в ста населенных пунктах 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 разработан ряд методических документов.

Особенно интенсивные работы по применению отечественных тепловизоров проводились в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (г. Ленинград) под руководством М.М. Мирошникова, Р.Н. Ивановой и В.П. Мельниковой. Методическое обеспечение медицин-

ского тепловидения было более разнообразным, чем технической тепловизионной диагностики; параметры медицинских тепловизоров были регламентированы ОСТ 3-4408-82 Минмедпрома СССР; состоялось несколько всесоюзных конференций "Тепловизионная медицинская аппаратура и практика ее применения в медицине".

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 Института 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 повторяет 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 УЗ 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 врачей-термографистов и создано Общество медицинской термологии, которое проводит международные конференции по данной тематике. В США тепловизоры применяются в качестве инструмента диагностики не только крупными медицинскими учреждениями, но и частнопрактикующими врачами, например, хиропрактиками. В последние годы интерес к скрининговому обследованию населения методом

медицинской ИК термографии усилился в связи с необходимостью ранней диагностики атипичной пневмонии (SARS) и птичьего гриппа (bird flu). В крупных аэропортах ряда стран Юго-Восточной Азии установлены тепловизионные камеры, позволяющие выявлять пассажиров с повышенной температурой. Предприняты попытки внедрить тепловизоры в российские международные аэропорты.

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 0,02...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.). Более того, результаты исследований, выполненных в Институте 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). Алгоритмы медицинской диагностики в течение ряда лет разрабатывали 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. Соответствующая программа, ориентированная на выдачу заключений пациентам, входит в комплект упомянутого выше тепловизора ТКВр-ИФП.

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 невысок (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 УЗ стимуляцией.

В ряде случаев (диагностика молочных желез и заболеваний органов кровообращения) достаточно погружать руки пациента в холодную или теплую воду. Следует заметить, что в отечественной практике 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 теп-

ловизоров 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, тромбоз, 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, педиатрии и т.д.

В качестве экзотического можно отметить применение тепловизоров в качестве полиграфа – детектора лжи (см. п. 11.25).

Примеры медицинских термограмм приведены на рис. 11.80 (см. цветную вкладку).

#### 11.24.2. СВЧ тепловидение (радиотермометрия)

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 тепловидение, которое реализуют с помощью приемников СВЧ излучения и накожных накладных антеннозондов (рупоров). В зависимости от режимов калибровки, частотного диапазона и конструкции приемника излучения СВЧ тепловидение позволяет определять абсолютные и относительные температуры по глубине биологических объектов. В ИРЭ РАН создан радиотермограф РТ-20, который в комплексе со специализированным алгоритмом обработки данных может быть использован в качестве теплового томографа (см. рис. 11.81).

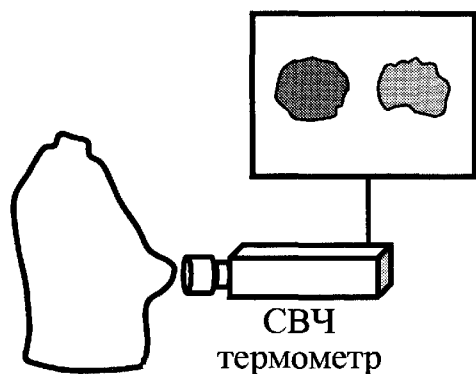


Рис. 11.81. Радиотермометрия

Разновидностью метода определения глубинной температуры биологических объектов является *пассивная акустическая термотомография*, разработанная Ю.В. Гуляевым, В.И. Пасечником, К.М. Бограчевым и др. Восстановление профиля температуры на глубине нескольких сантиметров в биологической ткани представляет типичную обратную задачу, решаемую рядом методов, например, методом регуляризации А.Н. Тихонова, методом "стандартного источника" и др. [256].

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.

В последние годы, в особенности, в связи с необходимостью противодействовать терроризму, наблюдается выраженный прогресс в разработке *дистанционных* систем визуализации электромагнитного излучения СВЧ диапазона (терагерцовое тепловидение), см. рис. 11.79.

## 11.25. ПРОЧИЕ ОБЛАСТИ

В криминалистике, помимо известных методов обнаружения подделок в отраженном излучении ближнего ИК диапазона, выполнялись 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.

В последние годы выполнены исследования по применению тепловизоров в качестве полиграфа – детектора лжи. В США проверка персонала на полиграфе является общепринятой процедурой, достоверность которой может достигать 90 %. Оценка правдивости ответов испытуемого проводится по трем каналам: скорости кровотока, частоте дыхания и интенсивности потоотделения. Испытания являются инвазивными и поставляют только скалярную информацию.

Преимущества тепловидения состоят в следующем:

- 1) неинвазивность;
- 2) наличие зависимости между квадратом отклонения поверхностной температуры (относительно внутренней температуры тела) от скорости кровотока;
- 3) возможность получения векторной информации, если для фиксации реакции испытуемого регистрируют динамические последовательности термограмм;
- 4) обеспечение дополнительного информативного канала, что в принципе должно повысить достоверность метода;
- 5) документированность метода, что позволяет сравнивать результаты испытаний, проведенных с большими интервалами времени.

В работе [257] приведены результаты оценки возможности тепловидения в качестве инструмента детектирования лжи при анализе имитированного грабежа. Использован коротковолновый тепловизор Radiance HS фирмы Raytheon с температурным разрешением 0,025 °С. Наиболее информативной оказалась периорбитальная (окологлазничная) зона. Величина температурных сигналов была весьма малой, но специфическая компьютерная обработка данных обеспечила вероятность правильного детектирования лжи на уровне 78 %.

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. В лабораторных условиях продемонстрирована возможность обнаружения "поясов шахидов" со взрывчаткой на теле человека, однако очевидно, что в практических случаях применения тепловизоров, например, в аэропортах, весьма трудно установить порог принятия решения: при низком пороге произойдет отбраковка большинства пассажиров, а высокий порог приведет к пропуску искомых объектов.

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 во многих случаях 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 (тепловизионные) 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 России 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, анализ качества пива в кегах, исследования по динамике бильярдных шаров и т.д.

# АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТК И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

### 12.1. ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ ОПЕРАТОРОВ-ТЕРМОГРАФИСТОВ В РОССИИ

Система аттестации специалистов в области НК разработана Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзором, ранее Госгортехнадзор), однако в работах по ТК также заинтересованы и другие федеральные ведомства: Госэнергонадзор, Госархстройнадзор и др. Требования к лицензированию работ по технической диагностике в промышленности, аккредитации лабораторий НК и аттестации соответствующих специалистов приобрели особое значение после принятия в 1997 г. Федерального закона "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

Проблема заключается в том, что многие традиционные объекты НК, подведомственные Ростехнадзору, в частности объекты котлонадзора, подъемные сооружения, объекты хранения и переработки зерна, не являются приоритетными 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 Ростехнадзору. 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, в свете непрекращающихся аварий, Минпромэнерго России ставит задачу их инспекции с точки зрения промышленной безопасности. Ростехнадзор обладает реальными рычагами воздействия на про-

мышленные предприятия любой формы собственности, поэтому в последние годы происходит упорядочение системы аттестации специалистов именно в рамках этого федерального ведомства. С учетом вышесказанного Ростехнадзор недавно расширил список объектов аттестации, в том числе по ТК, на строительные сооружения и электротехнические установки.

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. Необходимость наличия лицензии также зависит от цели обследования; например, для выдачи заключения о промышленной безопасности дымовых труб на нефтехимических предприятиях необходима лицензия Ростехнадзора. В то же время для штатной тепловизионной диагностики дымовых труб промышленных предприятий до последнего времени была достаточна местная (федеральная) лицензия, выдаваемая лицензионными палатами городов.

Энергоаудит жилых зданий с выдачей энергетического паспорта требует аккредитации обследующей организации в Минэнерго РФ в качестве энергоаудитора. Ситуация в строительстве изменилась с 1 января 2009 г.: прекращена выдача лицензий на строительство и проектирование зданий и сооружений, а также на инженерные изыскания. Согласно принятым изменениям в Градостроительном кодексе РФ вводится саморегулирование в строительстве как новый механизм регулирования строительной деятельности. На смену лицензиям пришли свидетельства о допуске к соответствующим видам работ, которые должны быть получены саморегулируемыми организациями (СРО).



Ситуация с ТК осложняется тем, что количество отечественных государственных стандартов, нормативных и методических документов, относящихся к ТК, относительно невелико (см. п. 12.2). Некоторые документы, например, ГОСТ-18353–70 и ГОСТ-23483–79, были разработаны в советское время и требуют пересмотра в связи с существенной модернизацией аппаратной базы тепловидения и появлением новых способов контроля. Пособиями для подготовки специалистов по ТК могут служить книги и справочники [1, 2, 9, 11, 20, 167, 258, 259], а также настоящее издание.

Согласно "Правилам аттестации персонала в области неразрушающего контроля" (ПБ 03-440–02) аттестации подлежит 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) *теплого*; 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 [260].

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 Ростехнадзора ПБ 03-440–02. Типовая программа подготовки по ТК и список экзаменационных вопросов приведены в Приложениях 3 и 4.

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".

## 12.2. 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.

### 12.2.1. 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. Теплоизоляция 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 1.42107–81 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".

10. ГОСТ Р 8.619–2006 "Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки".

#### Дополнительные стандарты

11. ГОСТ 28243–96 "Пирометры. Общие технические требования".

12. ГОСТ 25380–82 "Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающую конструкцию".

13. ГОСТ 26254–84 "Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций".

14. ГОСТ 26602.1–99 "Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче".

15. ГОСТ 26602–85 "Окна. Метод определения сопротивления теплопередаче".

16. ГОСТ 8.326–78 "Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений".

17. ГОСТ 8.010–72 "Общие требования к стандартизации и аттестации методик выполнения измерений".

18. ГОСТ Р 51379–99 "Энергосбережение. Энергетический паспорт промышленного потребителя топливно-энергетических ресурсов".

19. ГОСТ Р 51380–99 "Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям".

20. ГОСТ Р 51387–99 "Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение".

21. ГОСТ Р 51388–99 "Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения".

22. ГОСТ Р 51541–99 "Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей".

23. ОСТ 16.0.800.343–76 "Турбогенераторы. Испытание сердечника статора".

#### **12.2.2. Зарубежные стандарты**

1. Standard ISO 6781 (Intern. Comiss. on Standardization). Thermal insulation, Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method. Стандарт ISO 6781–83 "Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод".

2. Standard ISO 9869-1998. Thermal insulation. Building elements. In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.

3. Standard ISO TC 163/SC 2 (ISO/FDIS 6946: 2007 (E)). Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method.

4. Standard ISO Committee Draft ISO/CD 18434. Condition monitoring and diagnostics of machines, 09.01.2003.

5. Standard ISO WD 18436-5N13. Condition monitoring and diagnostics of machines. Accreditation of organizations and training and certification personnel. Part 5 "Thermography", 2001.

6. Standard ISO/TC 108/SC 5/WG 11. Condition monitoring and diagnostics of machines using infrared imaging. Part 1 "General guidelines", 1997.

7. Draft standard ISO/TC 135/SC 8. Non-destructive testing – Infrared Thermography – Vocabulary and terminology

8. 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.

9. ASTM Standard C1060-90 "Thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings. – ASTM, 1996, U.S.A.

10. ASTM C1153-90 Standard practice for the location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging. – Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, U.S.A.

11. 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.

12. SNT-TC-1A Standard. "Qualification, certification. IR Thermography", U.S.A.

13. ASTM Standard E1316-93. Standard terminology for nondestructive examination, Section J, Terms, U.S.A.

14. ASTM Standard C 3259-95 "Infrared determination of the temperature of applied coating on wood products during the coating cycle", U.S.A.

15. 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.

16. Standard MIL-ST-185 "Survey procedure of thermal image method for electrical components", U.S.A.

17. Standard EPRI-NR-6973 "Guide for IR thermography", U.S.A.

18. MIL-HDBK-728, V. 1, "Nondestructive testing".

19. Standard MIL-STB-2194 "Infrared thermal imaging. Survey procedure for electrical equipment", U.S.A.

20. Standard 149-GP-2MP "Manual for thermographic analysis of building enclosure", Canada.

21. ASTM Standard E-1149-90. Standard terminology relating to NDT by infrared thermography, U.S.A.

22. ASTM Standard D-4788-88. Test method for detecting delaminations in bridge decks by using infrared thermography, 1997, U.S.A.

23. ASTM Standard E-1934. Standard guide for examining electrical and mechanical equipment with infrared thermography, 1999, U.S.A.

24. Standard 149-GP-2MP. Manual for thermographic analysis of building enclosures, 1986, Canada.

25. Standard MTS-199X (Intern. Electr. Testing Assoc.). Maintenance testing of electrical systems.

26. Standard ATS-1999 (Intern. Electr. Testing Assoc.). Acceptance testing of electrical systems.

27. Standard SS024210. Thermal insulation: Thermography of buildings, Sweden.

28. Standard A04-420. Essais nondestructifs. thermographie infrarouge. Caracterisation de l'appareillage, 1993, France.

29. Standard A 09-400. Norme Française de thermographie infrarouge, France.

30. Standard X 10-023-82. Isolation thermique. méthode infrarouge pour la détection qualitative d'irrégularités thermiques dans la structure externe des bâtiments, 1982, France.

31. Standard MIL-ST-185. Survey procedure of thermal image method for electrical components, U.S.A.

32. Standard EPRI-NR-6973. Guide for IR thermography, U.S.A.

33. Standard MIL-HDBK-728, Vol. 1, "Nondestructive testing", U.S.A.

34. Standard MIL-STB-2194. Infrared thermal Imaging. Survey procedure for electrical equipment, U.S.A.

35. Standard SNT-TC-1A. Qualification, certification. IR thermography, U.S.A.

36. Standard 149-GP-2MP. Manual for thermographic analysis of building enclosure. Canada.

37. Стандарт Японии JIS T 1141 "Медицинская термография" (на япон. языке).

### 12.2.3. Прочие нормативные документы и методики

1. СНиП 23-02-03 "Тепловая защита зданий" (с 1 октября 2003 г. взамен СНиП П-3-79\*).

2. СНиП 2.04.14-88\* "Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов (с изменениями № 1 в части требований к теплозащите)".

3. Диагностика и определение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом (методика). – Свид. об аттестации МВИ № 1305/442 от 10.01.2001, Госстандарт РФ. 36 с.

Один из последних документов, оформленный в виде методики Госстандарта РФ (ныне Ростехрегулирование). Содержит методические особенности применения тепловизоров при контроле ограждающих конструкций строительных сооружений. Приведена теория возникновения сигнала в дефектных участках, порядок определения сопротивления теплопередаче, принципы расшифровки термограмм и форма протокола.

4. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных со-

оружений 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.

5. Методика тепловизионной диагностики дымовых труб и газоходов. – Свид. об аттестации МВИ № 11/442 от 6.03.2002, Госстандарт РФ. 44 с.

Один из последних документов, оформленный в виде 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.

6. Метод инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. РД 153-34.0-20.364-00.

Документ разработан на основе многолетнего опыта применения тепловизоров на предприятии ОРГРЭС (г. Москва).

7. Основные положения метода ИК диагностики электрооборудования и высоковольтных линий. РД 153-34.0-20.363-99, 2003.

Детальный нормативно-методический документ, отражающий многолетний опыт предприятия ОРГРЭС, г. Москва.

8. Вестник Госэнергонадзора. Инструктивное письмо от 11.06.99 № 32-10/223 "О применении портативного компьютерного термографа ИРТИС-200".

Минпромэнерго РФ рекомендует применять отечественный тепловизор ИРТИС-200.

9. 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 Минпромэнерго РФ, РАО "ЕЭС России" и на тяговых подстанциях железнодорожного транспорта.

10. Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритного тепловизора (ВСН 43-96). Утв. 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.

11. Инструктивные указания по осуществлению прямых тепловизионных методов определения фактических теплотехнических показателей ограждающих конструкций при паспортизации жилых домов массовых серий. ГУП "НИИМосстрой", г. Москва, 1998.

12. 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.

13. Руководящий технический материал РТМ 1.2.167-2000 "Неразрушающий контроль сотовых панелей летательных аппаратов в условиях ремонта авиационной техники радиационными и тепловизионными методами". М., 2000. 14 с.

14. СП 13-101-99 "Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб". М.: Госстрой РФ, 1999.

Тепловизионный метод упоминается в качестве рекомендуемого.

15. Инструкция по эксплуатации железобетонных дымовых труб с металлическими газоотводящими стволами на тепловых электростанциях, РД 34.21-562-93.

Тепловизионный метод упоминается в качестве рекомендуемого.

16. Технологический регламент по теплотехническим обследованиям, нарушающему контролю и диагностике технического состояния тепловыделяющих объектов автоматизированным бесконтактным тепловизионным методом. – Свид. об аттестации № 06/442-2001 от 26.06.00, Госстандарт РФ. 20 с.

Общие положения по использованию портативных тепловизоров и софтвера IrWin (FLIR Systems) для диагностики разнообразного оборудования.

17. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант). Свид. об аттестации МВИ № 02/442-2002 от 9 авг. 2002 г.

18. Методика тепловизионного контроля. Утв. Госэнергонадзором РФ, ноябрь 2001 г. и Госстроем РФ, май 2002 г.

19. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. РД-13-04-2006, Ростехнадзор, 2006.

Один из последних нормативных документов Ростехнадзора, включающий требования к организации теплового контроля, квалификации персонала, средствам измерения, порядку проведения и оценке результатов контроля.

20. Методика тепловизионного контроля теплотехнической однородности стеновых панелей в заводских условиях. Разраб. ГУП "НИИМосстрой", 2002.

21. Методические указания по комплексному контролю теплозащиты зданий и сооружений. Проект РД. Ростехнадзор, 2008.

Один из наиболее разработанных методических документов по оценке теплозащиты зданий. Представлен фирмой "ТТМ", г. С.-Петербург. Содержит указания как по тепловизионному обследованию, так и по контролю воздухопроницаемости.

22. Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной

техники. – МДС 23-1.2007. ФГУП "НИЦ "Строительство". М., 2007. 12 с.

Рассмотрены особенности определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях.

23. Методические указания по проведению испытаний на нагревание генераторов, МУ-34-70-069-84, СПО "Союзтехэнерго", 1984.

24. Рекомендации по проведению тепловых испытаний силовых масляных трансформаторов (и автотрансформаторов) на месте их установки. М.: "Энергия", 1972.

25. Голунов А.М. "Охлаждающие устройства масляных трансформаторов". М.: Энергия, 1964.

26. Типовая инструкция по эксплуатации узла контактных колец и щеточного аппарата турбогенераторов мощностью 165 МВт и выше. ТИ 34-70-024-84, СПО "Союзтехэнерго", 1984.

27. Информационное письмо № 1-90 СПО "ОРГРЭС" "Об испытании стали статора генератора".

28. 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.

29. 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).

30. 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 Германским обществом неразрушающего контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вавилов В.П.** Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1984. 162 с.
2. **Nondestructive Testing Handbook**. V. 3. Infrared and Thermal Testing. ASNT, 2001. 714 p.
3. **Infrared methodology and technology**. Nondestructive testing monographs and tracts. Gordon and Breach Science Publishers, 1994. V. 7. 526 p.
4. **Maldague X.** Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography. London: Springer-Verlag, 1993. 440 p.
5. **Maldague X.** Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. N.Y.: John Wiley & Sons, 2001. 682 p. (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering).
6. **Бажанов С.А.** Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств. М.: НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2000. 76 с. (Библиотечка электротехника. Прилож. к журн. "Энергетик").
7. **Вавилов В.П., Климов А.Г.** Тепловизоры и их применения. М.: Интел универсал, 2002. 88 с.
8. **Вавилов В.П., Александров А.Н.** Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М.: НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2002. 82 с. (Библиотечка электротехника. Прилож. к журн. "Энергетик").
9. **Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др.** Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
10. **Vavilov V.** The basics of transient IR thermographic NDT: Short Course Notes. SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2002. 105 p.
11. **Вавилов В.П.** Тепловой контроль // Неразрушающий контроль: в 8 т. Т. 5. 2 изд., перераб. М.: Машиностроение, 2006. С. 9 – 361.
12. **Хадсон Р.** Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 530 с.
13. **Vernotte P.** Mesure de la conductibilité thermique des isolants. methode de touthau // Chaleur et industrie. 1937. No. 208. P. 331 – 337.
14. **Beller W.S.** Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking // Missiles and Rockets. 1965. V. 16. No. 22. P. 1234 – 1241.
15. **Green D.R.** Principles and applications of emittance-independent infrared nondestructive testing // Appl. Optics. 1968. V. 7. No. 9. P. 1796 – 1805.
16. **Carslow H.S., Jaeger T.S.** Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford Univ. Pres, 1959. 580 p.
17. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 604 с.
18. **Balageas D.L., Krapez J.-C., Cielo P.** Pulsed photo-thermal modeling of layered materials // J. Appl. Physics. 1986. V. 59. No. 2. P. 348 – 357.
19. **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. London: Academ. Press, 1982. P. 239 – 280.
20. **MacLaughlin P.V., Mirchandani H.G.** Aerostructure NDT evaluation by thermal field detection (Phase II): Final Rep., AIRTASK, Naval Air System Command AIR-310G. Washington, 1984. 198 p.
21. **Попов Ю.А., Карпельсон, Строков В.А. и др.** Тепловой контроль качества многослойных изделий // Дефектоскопия. 1976. № 3. С. 76 – 81.
22. **Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П.** Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987. 340 с.
23. **Тиванов Г.Г.** Анализ математических моделей, используемых при тепловом контроле качества композиционных материалов // Дефектоскопия. 1987. № 5. С. 83 – 85.
24. **Troitsky O., Reiss H.** Estimation of thermal diffusivity of thin film materials by a one-level, two-point 'diverging'-thermal-wave technique. Part I: Theory // High Temp. – High Pressures. 2003/2004. Vol. 35/36. P. 265 – 280.
25. **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 // Rev. of Progress in Quant. NDE. Vol. 15. Seattle. P. 653 – 658.
26. **Maillet D., Andre S., Batsale J.-C. et al.** Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms. London: John Wiley & Sons Publ., 2000. 360 p.
27. **Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. 1961. Vol. 32. P. 1679 – 1684.
28. **Zalameda J.N., Winfree W.P.** Improved sampling of thermal transients using Focal Plane Array infrared imagers // Proc. SPIE "Thermosense-XXVI". 2004. V. 5405. P. 374 – 381.

29. **Winfrey W.P., J.N. Zalameda J.N.** Single sided thermal diffusivity imaging in composites with a shuttered thermographic inspection system // Proc. SPIE "Thermosense-XXIV". 2002. Vol. 4710. P. 536 – 544.
30. **Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G. et al.** Inversion for hidden corrosion characterization: theory and applications // Intern. J. Heat & Mass Transfer. 1996. V. 39. P. 355 – 371.
31. **Marinetti S., Bison P.G., Grinzato E.** 3D heat flux effects in the experimental evaluation of corrosion by IR thermography // Proc. European Seminar "Quant. IR Thermography – QIRT'02". Dubrovnik, 2002. P. 92 – 97.
32. **Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P.** Thermographic NDE: Data inversion procedure (Part II: 2D analysis and experimental results) // Res. in NDE. 1991. No. 2. P. 101 – 124.
33. **Bison P.G., Grinzato E., Martinetti S.** Moisture evaluation by dynamic thermography data modeling // Proc. SPIE "Thermosense-XVI". 1994. V. 2245. P. 176 – 182.
34. **Troitsky O. Yu.** SPIE International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace and Remote Sensing: Thermosense-XV // SPIE Proc., 1993. V. 1933. P. 309 – 312.
35. **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.
36. **Вавилов В.П., Иванов А.И.** Импульсный тепловой контроль многослойных изделий // Дефектоскопия. 1984. № 6. С. 39 – 47.
37. **Krapez J.-C., Spagnolo L., Frieß M.** Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography // Intern. J. of Thermal Sciences, 2004. V. 43. P. 967 – 977.
38. **Philippi L., Batsale J.-C., Maillet D., Degiovanni A.** Measurements of thermal diffusivities through processing of infrared images // Rev. Sci. Instrum., 1995. V. 66 (1). P. 223 – 229.
39. **Bison P.G., Grinzato E., Marinetti S.** Local thermal diffusivity measurement // J. Quant. Infr. Thermogr. 2004. V. 1. No. 2. P. 241 – 250.
40. **Delpesh Ph., Krapez J.-C., Bala-geas D.L.** Thermal defectometry using the temperature decay rate method // Proc. "Quant. Infr. Thermography QIRT-94", Eurotherm Seminar N 42, Sorrento, Italy, August 23 – 26, 1994. P. 220 – 225.
41. **Fourier J.** Théory du mouvement de la chaleur dans les corps solides, 1er partie // Mémoires de l'Académie des Sciences. 1824. Vol. 4. P. 185 – 555. 1826. Vol. 5. P. 153 – 246.
42. **Angström M.A.** New method of determining the thermal conductivity of bodies // Phil. Mag. 1863. V. 25. P. 130 – 142.
43. **Вавилов В.П., С. Маринетти С.** Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // Дефектоскопия. 1999. № 2. С. 58 – 72.
44. **Almond D., Patel P.** Photothermal science and techniques. London: Chapman & Hall, 1996. 242 p.
45. **ГОСТ 26254–84.** Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М., 1984.
46. **Vavilov V., Demin V., Shiryaev V.** Inspecting smokestacks by IR thermographic surveying and heat conduction modeling // Proc. SPIE "Thermosense-XXIII". 2001. V. 4360. P. 324 – 332.
47. **Degiovanni A., Lamine A.-S., Houlbert A.-S., Maillet D.** Identification of subsurface defects using a sensibility analysis // Proc. of Fourth Europ. Conf. on Composite Mater., Stuttgart, 1990. P. 691 – 695.
48. **Winfrey W.P., Zalameda J.N.** Thermographic determination of delaminations depth in composites // Proc. SPIE "Thermosense-XXV". 2003. V. 5073. P. 363 – 373.
49. **Bennett C.A., Patty R.R.** Thermal wave interferometry: a potential application of the photo-acoustic effect // Appl. Optics. 1982. V. 21. P. 49 – 54.
50. **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. Phys. 1990. V. 68. No. 12. P. 6087 – 6098.
51. **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. 1<sup>st</sup> Intern. Conf. on Inverse Problems in Engineering, Palm Coast, Florida, U.S.A., June 13 – 18, 1993. P. 122 – 129.
52. **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.
53. **Winfrey W.P.** Enhanced thermographic detection of delaminations with computational pulse shaping // Rev. of Progress in Quant. NDE. N.Y.: Plenum Press, 1998. V. 17A. P. 441 – 448.
54. **Вавилов В.П., Касаткин М.А.** Тепловой контроль поверхностных усталостных трещин в жаропрочных сплавах // Дефектоскопия. 1988. № 3. С. 32 – 38.

55. **Вавилов В.П., Касаткин М.А.** Тепловой контроль жаропрочных никелевых сплавов // Дефектоскопия. 1990. № 4. С. 51 – 54.
56. **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. 1992. P. 218 – 223.
57. **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". Florida. 2000. P. 144 – 150.
58. **Delpech Ph., Balageas D.L.** Mesure par thermographie infrarouge stimulée de résistances thermique d'interface dans des structures bonnes conductrices de la chaleur // Journée d'Etude du 9 Janvier 1991, Soc. Fr. des Thermiciens, Paris, France. 12 p.
59. **Balageas D.L., Deom A.A., Boscher D.M.** Characterisation and NDT of carbon epoxy composites by a pulsed photothermal method // Mater. Evaluation. 1987. N 4. P. 461 – 465.
60. **Boscher D.M., Balageas D.L., Deom A.A., Gardette G.** Nondestructive evaluation of carbon epoxy laminates using transient infrared thermography // Proc. 16th NDE Symp., San Antonio, Texas, U.S.A., 21 – 23 April, 1987. P. 322 – 328.
61. **Krapez J.-C., Balageas D.L.** Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography // Proc. Quant. Infr. Thermography QIRT-94: Eurotherm Seminar, Sorrento, Italy, August 23 – 26, 1994. P. 260 – 266.
62. **Krapez J.-C., Balageas D.L., Deom A., Lepoutre F.** Early detection by stimulated infrared thermography. comparison with ultrasonics and holo/shearography // 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. P. 303 – 321.
63. **Lugin S., Netzelmann U.** A defect shape reconstruction algorithm for pulsed thermography // NDT&E Intern. 2007. V. 40. P. 220 – 228.
64. **Vavilov V., Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S.** Thermal characterization and tomography of carbon fibre reinforced plastics using individual identification technique // Mater. Evaluation. 1996. V. 54. No. 6. P. 604 – 611.
65. **Shepard S.M., Lhota J., Hou Y., Ahmed T.** Blind characterization of materials using single-sided thermography // Proc. SPIE "Thermosense-XXVI". 2004. V. 5405. P. 442 – 446.
66. **Boscher D.M., Deom A.A., Gardette G., Balageas D.L.** Thermal NDT of carbon epoxy laminates // Proc. Eurotherm-4 Seminar, Nancy, France, June 28 – July 1, 1988. P. 46 – 50.
67. **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, 1994. V. 262. P. 117 – 132.
68. **Winfrey W.P., Zalameda J.N.** Thermographic determination of delaminations depth in composites // Proc. SPIE "Thermosense-XXV". 2003. V. 5073. P. 363 – 373.
69. **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.
70. **Куш Д.В., Рапопорт Д.А., Будадин О.Н.** Обратная задача автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия. 1988. № 5. С. 64 – 68.
71. **Almond D.P., Saintey S., Lau S.K.** Edge effects and defect sizing by transient thermography // Proc. Quant. Infr. Thermography QIRT'94, Eurotherm Seminar N 42, Sorrento, Italy, August 23 – 26, 1994. P. 247 – 252.
72. **Вавилов В.П., Ширяев В.В.** Способ определения размеров дефектов при тепловом контроле // Дефектоскопия. 1979. № 11. С. 63 – 65.
73. **Favro L.D., Crowther D.J., Kuo P.K., Thomas R.L.** Inversion of pulse-echo thermal wave Images // Proc. SPIE "Thermosense-XV". 1993. V. 1933. P. 138 – 141.
74. **Walther H.G., Seidel U.** Some remarks on definition, resolution and contrast in photothermal imaging // Proc. Eurotherm Seminar N 27 "Quant. Infrared Thermography-QIRT 92", Châtenay-Malabry, France, July 7 – 9, 1992. P. 251 – 258.
75. **Friedrich K., Seidel U., Walther H.G. et al.** Proposal for photothermal characterisation of boundaries between layer and substrate // Res. NDE. 1993. No. 5. P. 31 – 39.
76. **Rosenfeld A., Kak A.** Digital picture processing. V. 1. Orlando: Academic Press, 1982. 434 p.
77. **Пикалов В.В., Мельникова Т.С.** Томография плазмы. Новосибирск: Наука, 1995. 210 с.
78. **Воронцов С.С., Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. и др.** Алгоритм самосогласования проекций в тепловизионной томографии // Автоматизация аэродинамического эксперимента. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1985. С. 63 – 74.



79. **Ахметов В.Д., Фатеев Н.В.** Инфракрасная томография времени жизни и диффузионной длины носителей заряда в слитках полупроводникового кремния // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 1. С. 40 – 47.
80. **Barrett A., Myers P.S., Sadowsky N.L.** Detection of breast cancer by microwave radiometer // *Radio Sci.* 1977. Vol. 12. No. 68. P. 167 – 171.
81. **Троицкий В.С.** К теории контактных радиотермометрических измерений внутренней температуры тел // Изв. вузов. Сер. "Радиофизика". 1981. Т. 24. № 9. С. 1054 – 1058.
82. **Пасечник В.И., Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н. и др.** Определение глубинной температуры биологических объектов методом пассивной акустической термотомографии / Тр. Нижегород. акустической научной сессии. Н. Новгород: ННГУ, 2002. С. 375 – 378.
83. **Rosencwaig A., Gersho A.** Thermal-wave imaging // *Science.* 1982. V. 218. P. 223 – 228.
84. **Mandelis A.** Theory of photothermal wave diffraction tomography via spatial Laplace spectral decomposition // *J. Opt. Soc. Am.* 1991. Vol. A6. P. 298.
85. **Pade O., Mandelis A.** Computational thermal-wave tomography of aluminum with ray-optic reconstruction / *Rev. Sci. Instrum.* 1993. Vol. 64. P. 3548.
86. **Busse G., Renk F.** Stereoscopic depth analysis by thermal wave transmission for NDE // *Appl. Phys. Lett.* 1983. Vol. 42. N 4. P. 366 – 368.
87. **Vavilov V., Maldague X., Dufort B., Ivanov A.I.** Adaptive thermal tomography algorithm // *Proc. SPIE "Thermosense-XV"*. 1993. V. 1933. P. 166 – 173.
88. **Вавилов В.П., Ширяев В.В.** Тепловой томограф: а. с. 1266308 (СССР). М., 1984.
89. **Вавилов В.П., Джин Х., Томас Р., Фавро Л.** Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве // *Дефектоскопия.* 1990. № 12. С. 122 – 130.
90. **Vavilov V., Bison P.G., Bressan C. et al.** Some new ideas in dynamic thermal tomography // *Proc. Eurotherm Seminar N 27 "Quant. Infrared Thermography-QIRT 92"*, Chatenay-Malabry, France, July 7 – 9, 1992. P. 259 – 255.
91. **Стороженко В.Щ., Мельник С.И., Орел Р.П.** Новый алгоритм теплової томографії // *Методи та прилади контролю якості.* 1999. № 4. С. 26 – 30.
92. **Plotnikov Yu.A., Winfree W.P.** Automation of the image analysis for thermographic inspection // *Proc. SPIE.* Vol. 3397. Non-destructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports and Aerospace Hardware II. 1998. P. 135 – 140.
93. **Maldague X., Marinetti S.** Pulse phase infrared thermography // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 2694 – 2698.
94. **Couturier J.-P., Maldague X.** Pulsed phase thermography of aluminum specimens // *Proc. SPIE "Thermosense-XIX"*. 1997. V. 3056. P. 170 – 175.
95. **Ibarra-Castanedo C., Maldague X.** Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on Plexiglas and aluminum samples // *Proc. SPIE "Thermosense-XXVI"*. 2004. V. 5405. P. 348 – 365.
96. **Левкович-Маслюк Л.** Дайджест вейвлет-анализа // *Компьютерра.* 1998. № 8. С. 31 – 37.
97. **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. Venice: CNR, 1999. P. 117 – 122.
98. **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.
99. **Grinzato E., Vavilov V.** Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modeling // *Rev. Generale Termique.* 1998. V. 37, No. 8. P. 669 – 679.
100. **Kanstad S.O., Nordal P.E.** Experimental aspects of photothermal radiometry // *Can. J. Phys.* 1986. V. 64. P. 1155 – 1164.
101. **Carlomagno G. M., Berardi P.G.** Unsteady thermophototopography in nondestructive testing // *Proc. 3<sup>rd</sup> Biannual Exchange.* St. Louis, 1976. P. 33 – 39.
102. **Busse G., Wu D., Karpen W.** Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography // *J. Appl. Physics.* 1992. V. 71. P. 3962 – 3965.
103. **Wu D., Salerno A., Malter U. et al.** Inspection of composites by using lockin thermography // *Proc. Eurotherm Seminar 27 "Quant. InfraRed Thermography QIRT'96"*, Châtenay-Malabry, France, July 7 – 9, 1992. P. 251 – 254.
104. **Beaudoin J.L., Marianne E., Danjoux R., Egee M.** Numerical system for infrared scanners and application in the subsurface control of materials by photothermal radiometry // *Proc. SPIE "Infrared Technology and Applications"*. 1985. V. 590. P. 287.

105. **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.
106. **Zweschper Th., Dillenz A., Riegert G., Busse G.** Thermography with excitation by elastic waves: comparison of techniques (pulse, burst, lockin) // Proc. Intern. QIRT Conf. "Quant. IR Thermography", Dubrovnik, Croatia, Sept. 24 – 27, 2002. P. 47 – 52.
107. **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. No. 64 "Quant. IR Thermography", Reims, France, July 18 – 21, 2000. P. 206 – 211.
108. **Dillenz A., Zweschper Th., Busse G.** Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features // Insight. 2000. V. 42. No. 12. P. 815 – 817.
109. **Zweschper Th., Dillenz A., Busse G.** Ultrasound lock-in thermography – a defect selective method for the inspection of aerospace components // Insight. 2001. V. 43. No. 3. P. 173 – 179.
110. **Zweschper Th., Dillenz A., Busse G.** Ultrasound lockin thermography – an NDT Method for the inspection of aerospace structures // Proc. Eurotherm Seminar. No. 64 "Quant. IR Thermography", Reims, France, July 18 – 21, 2000. P. 212 – 217.
111. **Dillenz A., Zweschper Th., Busse G.** Phase angle thermography with ultrasound burst excitation // Proc. Eurotherm Seminar. No. 64 "Quant. IR Thermography", Reims, France, July 18 – 21, 2000. P. 247 – 252.
112. **Favro L.D., Han X., Ouyang Z. et al.** IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse // Proc. SPIE "Thermosense-XXII". 2000. V. 4020. P. 182 – 185.
113. **Burke M.W., Miller W.O.** Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory // Proc. SPIE "Thermosense-XXVI". 2004. V. 5405. P. 313 – 321.
114. **Shepard S.** Advances in pulsed thermography // Proc. SPIE "Thermosense-XXIII". 2001. V. 4360. P. 511 – 515.
115. **Shepard S.M., Hou Y., Ahmed T., Lhota J.R.** Reference-free analysis of flash thermography data // Proc. SPIE "Thermosense-XXVIII". 2006. V. 6205. P. 620513.
116. **Shepard S., Lhota J., Hou Y., Ahmed T.** Gold standard comparison of thermographic sequence data // Insight. 2004. V. 46. No. 4. P. 210 – 213.
117. **Gruss C., Lepoutre F., Balageas D.** Nondestructive evaluation using a flying-spot camera // Proc. 8<sup>th</sup> Intern. Thermo Conf., Budapest, Hungary, June 2 – 4, 1993. P. 6.
118. **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", Orlando, USA, 1995. V. 2423. P. 145 – 152.
119. **Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.** Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. Киев: Техника, 1988. 128 с.
120. **Cramer K.E., Winfree W.P.** Thermographic detection and quantitative characterization of corrosion by application of thermal line source // Proc. SPIE "Thermosense-XX". 1998. V. 3361. P. 291 – 297.
121. **Woolard D., Cramer K.** The thermal photocopier: A new concept for thermal NDT // Proc. SPIE "Thermosense-XXVI". 2004. V. 5405. P. 366 – 373.
122. **Ширяев В.В., Вавилов В.П., Иванов А.И.** Способ активного теплового контроля: а. с. СССР 1075131; приор. 1 марта 1982 г. // Бюл. изобр. 1984. № 7. 6 с.
123. **Lesniak J.R., Boyce B.R.** Differential thermography applied to structural integrity assessment // Proc. SPIE "Thermosense-XVII". 1995. V. 2473. P. 179 – 187.
124. **Ritter R., Schmitz B.** Photothermal inspections of adhesion strengths and detection of delaminations // Proc. Eurotherm Seminar N 27 "Quant. InfraRed Thermography QIRT'96", Châtenay-Malabry, France, July 7 – 9, 1992. P. 251 – 254.
125. **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", Reims, France, July 18 – 21, 2000. P. 36 – 41.
126. **Gros X.E., Strachan P., Lowden D.W., Edwards I.** NDT data fusion // Proc. 6th European Conf. NDT. 1994. V. 1. P. 355 – 364.
127. **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.

128. **Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K.** NDT data fusion at pixel level // *NDT&E International*. 1999. V. 32. P. 283 – 292.
129. **Gyekenyesi A.L.** Testing static and dynamic stresses in metallic alloys using thermoelastic stress analysis // *Mater. Evaluations*. 2002. March. P. 445 – 451.
130. **Wong A.K., Sparrow J.G., Dunn S.A.** On the revised theory of the thermoelastic effect // *J. of Physics and Chemistry*. 1988. V. 49. P. 395 – 400.
131. **Tenek L.H., Henneke II E.G.** Flaw dynamics and vibrothermographic-thermoelastic NDE of advanced composite materials // *Proc. SPIE "Thermosense-XIII"*. 1991. P. 252 – 259.
132. **Ранцевич В.Б.** Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость // *Дефектоскопия*. 1977. № 5. С. 102 – 108.
133. **Разрушение** / под ред. Г. Либовица. Т. 7. Разрушение неметаллов и композитных материалов. М.: Мир, 1976. 466 с.
134. **Куриленко Г.А.** Контроль и прогнозирование индивидуального сопротивления усталости деталей машиностроения на основе кинетики пассивных тепловых полей: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2000. 402 с.
135. **Luong M.P.** Infrared thermography of fatigue in metals // *Proc. SPIE "Thermosense-XIV"*. 1992. V. 1682. P. 222 – 232.
136. **Luong M.P.** Infrared thermographic evaluation of fatigue behavior of concrete // *Transact. 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Structural Mech. in Reactor Technol. (SMiRT 13)*, Lyon, France, Aug. 17 – 22, 1997. P. 155 – 162.
137. **Проблемы прочности в биомеханике** / под ред. И.Ф. Образцова. М.: Высш. шк., 1988. 310 с.
138. **Янковский В.Э., Горяинов О.П., Клевню В.А. и др.** Микроразрушение костной ткани // *Ортопедия, травматология и протезирование*. 1991. № 10. С. 9 – 12.
139. **Balageas D., Levesque P.** EMIR: a photothermal tool for electromagnetic phenomena characterization // *Rev. Générale Thermique*. 1998. V. 37. P. 725 – 739.
140. **Balageas D., Levesque P.** Mines detection using the EMIR method // *Proc. Quant. IR Thermography QIRT'02, Dubrovnik, Croatia*, 24 – 27 Sept., 2002. P. 71 – 78.
141. **Hartikainen J., Lehtiniemi R., Luukkala M.** Fast photothermal measurement system utilizing CO<sub>2</sub> laser and RF induction heating // *Rev. Progress in Quant. NDE* / ed. D.O. Thompson, D.E. Chimenti. N.Y.: Plenum Press, 1991. V. 10A. P. 539 – 543.
142. **Riegert G., Zweschper T., Busse G.** Lockin thermography with eddy current excitation // *QIRT J.* 2004. V. 1. No. 1. P. 21 – 32.
143. **McCullough R.W.** Transient thermographic technique for NDI of aerospace composite structures // *Proc. SPIE "Thermosense-XXVI"*. 2004. V. 5405. P. 390 – 401.
144. **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, D.E. Chimenti. N.Y.: Plenum Press, 1992. V. 11. P. 1331 – 1338.
145. **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, D.E. Chimenti. N.Y.: Plenum Press, 1993. V. 12. P. 1260 – 1265.
146. **Maldague X. et al.** A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments // *Rev. Generale de Thermique*. 1998. V. 37. No. 2. P. 708 – 716.
147. **Marinetti S., Finesso L., Marsilio E.** Matrix factorization methods: Application to thermal NDT/E // *NDT&E Intern.* 2006. V. 39. No. 8. P. 611 – 616.
148. **Ciliberto A., Cavaccini G., Salvetti O et al.** Porosity detection in composite aeronautical structures // *Infrared Physics & Technology*. 2002. V. 43. P. 139 – 143.
149. **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, Dubrovnik, Croatia*, Sept. 24 – 27, 2002. P. 12–13.
150. **Lyon B.R. Jr., Orlove G.** A brief history of 25 years (or more) of infrared imaging radiometers // *Proc. SPIE "Thermosense-XXV"*. 2003. V. 5073. P. 17 – 21.
151. **Брамсон М.А.** Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1965. 223 с.
152. **Госсорг Ж.** Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988. 396 с.
153. **DelGrande N., Clark G.A., Durbin P.F. et al.** Buried object remote detection technology for law enforcement // *Proc. SPIE "Surveillance Technologies"*. 1991. V. 1479. P. 335 – 352.

154. Булюбаш Б.В., Гуревич В.З. Электричество и тепло. М.: Наука, 1978. 172 с.
155. **The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook: Vol. 1 – 8 / J.S. Accetta, D.L. Shumaker exec. ed.** Bellingham. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993. 630 p.
156. **Gunapala S.D., Bandara S.V., Liu J.K. et al.** Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion Laboratory // *Infr. Physics & Technol.* 2001. V. 42. P. 267 – 282.
157. **Baker I.M., Crimes G., Ard C. et al.** Photovoltaic CdHgTe-Silicon Focal Planes // *Proc. IV Intern. Conf. on Advanced Detectors and Systems.* London: Institution of Electrical Engineers, 1990. P. 53 – 58.
158. **Sheppard F.D., Yang A.C.** Silicon Shottky retinas for infrared imaging // *IEDM (Intern Electron Devices Meeting) Technical Digest.* N.Y.: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1973. P. 310 – 313.
159. **Криксунов Л.З.** Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
160. **Якушенков Ю.Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
161. **Мирошников М.М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
162. **Ллойд Д.** Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 410 с.
163. **Справочник по инфракрасной технике:** в 4-х т. / под ред. У. Волфа и Г. Цисса. М.: Мир, 1999.
164. **Абрамович Б.Г., Картавец В.Ф.** Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978. 214 с.
165. **Sachs L.** Applied Statistics. N.Y.: Verlag, 1982. 220 p.
166. **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.
167. **Дроздов В.А., Сухарев В.И.** Термография в строительстве. М.: Стройиздат, 1987. 238 с.
168. **Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V.** Non-destructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography // *Res. in NDE.* N.Y.: Springer-Verlag, 1994. V. 5. No. 4. P. 257 – 271.
169. **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, 1992. P. 211 – 252.
170. **Hart J.M.** A practical guide to infrared thermography for building surveys: Building Research Establishment Report. Garston, Watford. 24 p.
171. **Evans J.** Meteorology and infrared measurements // *Proc. SPIE "Thermosense IV".* 1981. V. 313. P. 64 – 68.
172. **Вавилов В.П.** Диагностика строительных конструкций методом инфракрасной термографии // *В мире неразрушающего контроля.* 2000. № 2. С. 8 – 11.
173. **Данилов О.Л., Бобряков А.В., Гаврилов А.И. и др.** Особенности тепловизионного способа определения тепловых потерь ограждающими конструкциями зданий // *Энергоназор и энергосбережение сегодня.* 2001. № 2. С. 52 – 57.
174. **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.
175. **Иванов Г.С., Подолян Л.А.** Энергосбережение в зданиях // *Новости теплоснабжения.* 2001. № 7. С. 8 – 13.
176. **Диагностика и определение** теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом: методика: Свид. об аттестации МВИ № 1305/442 от 10.01.2001. М.: Госстандарт РФ, 2001. 36 с.
177. **Standard ISO 6781 (Intern. Comiss. on Standardization).** Thermal insulation, Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes. Infrared method. Стандарт ISO 6781–83. Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод.
178. **Luong M.P.** Infrared thermographic evaluation of fatigue behavior of concrete // *Transact. 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Structural Mech. in Reactor Technol. (SMiRT 13),* Lyon, France, Aug. 17 – 22, 1997. P. 155 – 162.
179. **Вавилов В.П., Маринетти С., Нестерук Д.А.** Тепловизионная оценка сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях // *Дефектоскопия.* 2009 (в печати).

180. ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. М., 1984.
181. ГОСТ 26629–85. Метод тепловизионного контроля качества. Теплоизоляция ограждающих конструкций. М., 1985.
182. СНиП 23-02-03. Тепловая защита зданий (с 1 октября 2003 г. взамен СНиП II-3-79\*). М., 2003.
183. Корниенко С.Г. Обнаружение зон напряженно-деформированного состояния бетонных монолитов методом тепловой инфракрасной съемки // Прикладная физика. 1997. № 1. С. 134 – 138.
184. Moropoulou A., Avdelidis N.P., Koui M. Detection of defects of airport pavements using infrared thermography. CSNDT J., Sept./Oct. 2000. P. 5 – 8.
185. ASTM Standard D-4788-88. Test method for detecting delaminations in bridge decks by using infrared thermography. 1997.
186. Frumuselu D., Radu C. IR thermography applied to ground-level reinforced concrete constructions belonging to electricity networks // Insight. 1998. V. 40. No. 7. P. 501 – 504.
187. Grinzato E., Bison P.G., Bressan C. et al. Active thermal testing of delaminations in frescoes' plaster // Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Conf. on Nondestr. Testing of Works of Art, Berlin, Germany, 3 – 8 October, 1994. P. 357 – 366.
188. 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. N.Y.: Plenum Press, 1998. V. 17. P. 1769 – 1776.
189. Grinzato E., Bison P.G., Bressan C., Mazzoldi A. NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating // Proc. Eurotherm Seminar N 60, QIRT'98, Lodz, 1998. P. 64 – 67.
190. Вавилов В.П., Гринцато Э., Бизон П., Маринетти С. Тепловой контроль воздушных расслоений под фресками // Дефектоскопия. 1994. № 7. С. 73 – 83.
191. Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Vavilov V. Thermal NDE Enhanced by 3D Numerical Modeling Applied to Works of Art // Proc. 15<sup>th</sup> World Conf. on NDT, Rome (Italy), 15 – 21 Oct. 2000 (available only on CD). 9 p.
192. Grinzato E., Marinetti S., Vavilov V., Bison P.G. Nondestructive testing of wooden painting by IR thermography // Proc. 8<sup>th</sup> Europ. Con. NDT, Barcelona, Spain, 2002. P. 342 – 346.
193. 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, Germany. 18–19 June, 2001. P. 227 – 234.
194. Энно И.К., Дужих Ф.П., Мелентьев Н.Н. Дефектоскопия дымовых труб инфракрасной техникой // Электрические станции. 1988. № 6. С. 23 – 26.
195. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987. 240 с.
196. Франчук С.В. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1969. С. 264.
197. Тепловой расчет котельных агрегатов / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973. 320 с.
198. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. 15-е изд. М.: СПО ОРГРЭС, 1996. 46 с.
199. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения метода ИК-диагностики электрооборудования и высоковольтных линий, 2003.
200. ОСТ 16.0.800.343-76. Турбогенераторы. Испытание сердечника статора.
201. Методические указания по проведению испытаний на нагревание генераторов: МУ-34-70-069-84. М.: СПО "Союзтехэнерго", 1984.
202. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции. М.: Госэнергоиздат, 1976. 236 с.
203. Lanius M.A. Infrared applications for steam turbine condenser systems // Proc. SPIE "Thermosense-XXII". 2000. V. 4020. P. 107 – 113.
204. Ducar R.J. Pulsed thermographic inspection and application in commercial aircraft repair // Proc. SPIE "Thermosense-XXI". 1999. V. 3700. P. 77 – 83.
205. Airbus adopts infrared thermography for in-service inspection // Insight. 1994. V. 36. No. 10. P. 126.
206. Вавилов В.П., Климов А.Г., Ширяев В.В. Активный тепловой контроль воды в авиационных сотовых конструкциях // Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 32 – 38.
207. Maldague X., Cielo P., Poussart D., Emerson P. Thermographic nondestructive evaluation of turbine blades: Methods and image processing // Industrial Metrology. 1990. V. 1. P. 139 – 153.
208. Морозов Г.А. Развитие методов неразрушающего контроля в авиации // Контроль. Диагностика. 2002. № 7. С. 3 – 8.


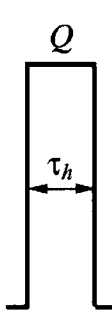

209. **Cielo P.** Pulsed photothermal evaluation of layered materials // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 56. No. 1. P. 230 – 234.
210. **Cielo P., Dallaire S.** Optothermal NDE of thermal-barrier coatings // *Proc. '85 ASM's Intern. Conf. Surface Modification and Coatings*, Toronto, Canada, 14 – 16 Oct., 1985. P. 10 – 14.
211. **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*. N.Y.: Plenum Press, 1991. V. 10B. P. 1193 – 1200.
212. **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*. 1989. V. 8. No. 2. P. 107 – 120.
213. **Osiander R., Maclachlan Spicer J.W., Amos J.M.** Thermal inspection of SiC/SiC ceramic matrix composites // *Proc. SPIE "Thermosense-XX"*. 1998. V. 3361. P. 339 – 348.
214. **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*. N.Y.: Plenum Press, 1993. V. 12. P. 1236 – 1240.
215. **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.
216. **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.
217. **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"*. 1994. V. 2245. P. 210 – 219.
218. **Shepard S.M., Favro L.D., Thomas R.L.** Thermal wave NDT of ceramic coatings // *Proc. SPIE "Thermosense XVII"*. 1995. V. 2473. P. 190 – 193.
219. **Bison P., Marinetti S., Grinzato E. et al.** Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography // *Proc. SPIE "Thermosense-XXV"*. 2003. V. 5073. P. 165 – 173.
220. **Вавилов В.П., Маринетти С., Чернуски Ф., Роба Д.** Тепловой неразрушающий контроль теплозащитных покрытий турбинных лопаток // *Дефектоскопия*. 2005. № 7. С. 74 – 83.
221. **Alcott J.** An investigation of nondestructive inspection equipment: Detecting hidden corrosion on USAF aircraft // *Mater. Evaluation*, 1994. No. 5. P. 64 – 73.
222. **DelGrande N.K., Durbin P.F.** Dual-band IR imaging to defect corrosion damage within airframes and concrete structures // *Proc. SPIE "Thermosense-XVI"*. 1994. V. 2245. P. 202 – 209.
223. **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*. N.Y.: Plenum Press, 1993. V. 12. P. 724 – 729.
224. **Zalameda J., Rajic N., Winfree W.P.** A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation // *Proc. SPIE "Thermosense-XXV"*. 2003. V. 5073. P. 374 – 385.
225. **Prati J.** Detecting hidden exfoliation corrosion in aircraft wing skin using thermography // *Proc. SPIE "Thermosense-XXII"*. 2000. V. 4020. P. 200 – 209.
226. **Burleigh D.** A portable, combined thermography/shearography NDT system for inspecting large composite structures // *Proc. SPIE "Thermosense-XXIV"*. 2002. V. 4710. P. 578 – 587.
227. **Delpech 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*. N.Y.: Plenum Press, 1993. V. 12. P. 672 – 678.
228. **Burleigh D., Kuhns D., Cowell S., Engel J.** Thermographic nondestructive testing of honeycomb composite structural parts of Atlas space launch vehicle // *Proc. SPIE "Thermosense-XVI"*. 1994. V. 2245. P. 132 – 138.
229. **Куш Д.В., Рапопорт Д.А., Будалин О.Н.** Обратная задача автоматизированного теплового контроля // *Дефектоскопия*. 1988. № 5. С. 64 – 68.
230. **Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.** Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. Киев: Техника, 1988. 128 с.
231. **Cramer K.E.** Quantitative thermal imaging of aircraft structures // *Proc. SPIE "Thermosense-XVII"*. 1995. V. 2473. P. 226 – 232.
232. **Thompson K.G., Crisman E.M.** Thermographic inspection of solid-fuel rocket booster field joint components // *Mater. Evaluation*. 1990. No. 48. P. 1096 – 1099.
233. **Welch C., Eden T.J.** Numerically enhanced thermal inspection of shuttle solid rocket motor inhibitor/liner/fuel bondline // *Rev. of Progress in Quant. NDE*. N.Y.: Plenum Publishing Corp, 1989. Vol. 8B. P. 2027 – 2034.

234. **Burleigh D., Engel J.** NDT of adhesively bonded fixed foam insulation for Atlas/Centaur cryogenic fuel tanks // Proc. 6<sup>th</sup> NASA NDE Conf. Houston: Johnson Space Center, 1989. P. 86 – 94.
235. **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.
236. **Cramer K., Winfree W., Hodges K. et al.** Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA // Proc. SPIE "Thermosense-XXVIII". 2006. V. 6205. P. 62051B1-9.
237. **Gazarik M., Johnson D., Kist E. et al.** Development of an extra-vehicular (EVA) infrared (IR) camera inspection system // Proc. SPIE "Thermosense-XXVIII". 2006. V. 6205. P. 62051C1-11.
238. **Концевой Ю.А., Кудин В.Д.** Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. 140 с.
239. **Данилин Н.С., Бакланов О.Д., Загоровский Ю.И.** Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем. М.: Изд-во МО СССР, 1974. 164 с.
240. **Boillot J.P., Cielo P., Begin G. et al.** Adaptive welding by fiber optic thermographic sensing: An analysis of thermal and instrumental considerations // Welding Journal. 1985. July. P. 209 – 217.
241. **Бекешко Н.А., Попов Ю.А.** Контроль качества точечных сварных соединений термографическим методом // Дефектоскопия. 1971. № 3. С. 123 – 127.
242. **Бекешко Н.А., Попов Ю.А.** Контроль диаметра литой зоны точечных сварных соединений с помощью визуализации тепловых полей // Дефектоскопия. 1972. № 6. С. 86 – 90.
243. **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.
244. **Shepard S., Chaudry B., Predmesky R., Zaluzek M.** Pulsed thermographic inspection of spot welds // Proc. SPIE "Thermosense-XX". 1998. V. 3361. P. 320 – 323.
245. **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.
246. **Вавилов В.П., Ширяев В.В., Танасейчук С.Ю.** Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений // Дефектоскопия. 1978. № 10. С. 63 – 67.
247. **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.
248. **Cramer K.E., Jacobstein R., Reilly T.** Boiler tube corrosion characterization with a scanning thermal line // Proc. SPIE "Thermosense-XXIII". 2001. V. 4360. P. 594 – 605.
249. **Maldague X.** Pipe inspection by IR thermography: NDT solution // Mater. Evaluation. 1999. V. 57. No. 9. P. 899 – 902.
250. **Martinez V.M., Martinez B.T., Olmeda Gonzalez P.O., Peralta Uria R.W.** Fault detection in diesel engines using infrared thermography // Insight. 2000. V. 44. No. 4. P. 228 – 232.
251. **Starman S., Matz V.** Automated system for crack detection using infrared thermographic testing // Proc. 17<sup>th</sup> World Conf. on NDT, 25 – 28 Oct., Shanghai, China. 6 P. (only CD).
252. **Jones T.S., Lindgren E.A.** Thermographic inspection of marine composite structures // Proc. SPIE "Thermosense XVI". 1994. V. 2245. P. 173 – 175.
253. **Алеев Р.М., Овсянников В.А., Чепурский В.Н.** Воздушная тепловизионная аппаратура для контроля нефтепродуктопроводов. М.: Недра, 1995. 160 с.
254. **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". 2002. V. 4710. P. 468 – 477.
255. **Попелуев А.А., Архангельский В.В.** Дистанционные методы исследования окружающей среды: учеб. пособие для вузов. Томск: STT, 2001. 184 с.
256. **Пасечник В.И., Аносов А.А., Барбаненков Ю.Н. и др.** Определение глубинной температуры биологических объектов методом пассивной акустической термотомографии // Тр. Нижегородск. акустической научной сессии. Н. Новгород: ННГУ, 2002. С. 375 – 378.
257. **Pavlidis I.T.** Lie detection using thermal imaging // Proc. SPIE "Thermosense-XXVI". 2004. V. 5405. P. 270 – 279.
258. **Синеглазов В.М., Кеткович А.А.** Активная тепловая интроскопия. Киев: Техника, 1990. 110 с.
259. **Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева.** М.: Машиностроение, 2003. 650 с.
260. **Неразрушающий контроль. Россия, 1900 – 2000 г.: справочник / под ред. В.В. Клюева.** М.: Машиностроение, 2002. 628 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1. ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

### П1.1. Функции чувствительности для полуограниченного тела

Функция нагрева	Теплообмен на поверхности	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau/\tau}$	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau_h/\tau_h}$	$\frac{\partial T/T}{\partial Q/Q}$	$\frac{\partial T/T}{\partial \alpha/\alpha}$	$\frac{\partial T/T}{\partial \lambda/\lambda}$	$\frac{\partial T/T}{\partial a/a}$
	$\alpha^F = 0$	$1/2$ (1.1)*	$-^{**}$ (1.2)	1 (1.3)	- (1.4)	-1 (1.5)	$1/2$ (1.6)
	$\alpha^F \neq 0$	Т. 2.4*** (2.1)	- (2.2)	1 (2.3)	Т. 2.4 (2.4)	Т. 2.4 (2.5)	Т. 2.4 (2.6)
	$\alpha^F = 0$	Т.4 (3.1)	Т.4 3.2)	1 (3.3)	- (3.4)	-1 (3.5)	$1/2$ (3.6)
	$\alpha^F \neq 0$	Т. 2.4 (4.1)	Т. 2.4 (4.2)	1 (4.3)	Т. 2.4 (4.4)	Т. 2.4 (4.5)	Т. 2.4 (4.6)
	$\alpha^F = 0$	$-1/2$ (5.1)	- (5.2)	1 (5.3)	- (5.4)	-1 5.5)	$1/2$ (5.6)
	$\alpha^F \neq 0$	Т. 2.4 (6.1)	- (6.2)	1 (6.3)	Т. 2.4 (6.4)	Т. 2.4 (6.5)	Т. 2.4 (6.6)

\* Номер решения в табл. П1.2.

\*\* Решение отсутствует.

\*\*\* См. решение в табл. 2.4.



## П1.2. Функции чувствительности для полуограниченного тела (см. табл. П1.1)

Номер формулы в табл. П1.1	Формула
(2.1)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau/\tau} = \frac{\frac{x}{\sqrt{\pi}} - x^2 e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{1 - e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(2.4)	$\frac{\partial T/T}{\partial \alpha/\alpha} = \frac{\left(1 - \frac{2x}{\sqrt{\pi}}\right) - (1 - 2x^2)e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) - 1}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(2.5)	$\frac{\partial T/T}{\partial \lambda/\lambda} = \frac{\frac{2x}{\sqrt{\pi}} - 2x^2 e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) - 1}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(2.6)	$\frac{\partial T/T}{\partial a/a} = \frac{\frac{x}{\sqrt{\pi}} - x^2 e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{1 - e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(3.1)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau/\tau} = \frac{1}{2\sqrt{1-1/r}}, \quad r = \tau/\tau_h$
(3.2)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau_h/\tau_h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{r}\sqrt{r-1} - r}, \quad r = \tau/\tau_h$
(4.1)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau/\tau} = \frac{\frac{x}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-1/r}}\right) e^{-x^2} - x^2 \operatorname{erfc}(x) + x^2 e^{-x^2/r} \operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})}{e^{-x^2/r} \operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r}) - \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}, \quad r = \tau/\tau_h$
(4.2)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau_h/\tau_h} = \frac{x^2}{r} \frac{\frac{1}{\sqrt{\pi x} \sqrt{1-1/r}} e^{-x^2(1-1/r)} - \operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})}{\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r}) - e^{x^2/r} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha \sqrt{a\tau}}{\lambda}, \quad r = \tau/\tau_h$

Продолжение табл. П1.2

Номер формулы в табл. П1.1	Формула
(4.4)	$\frac{\partial T/T}{\partial \alpha/\alpha} = \frac{\frac{2x}{\sqrt{\pi}}(1 - \sqrt{1-1/r})e^{-x^2} + (1 - 2x^2)\operatorname{erfc}(x) - [1 - 2x^2(1-1/r)]e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})}{e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r}) - \operatorname{erfc}(x)},$ $x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}, r = \tau/\tau_h$
(4.5)	$\frac{\partial T/T}{\partial \lambda/\lambda} = 2x^2 \frac{\frac{1}{x\sqrt{\pi}}(1 - \sqrt{1-1/r})e^{-x^2} - \operatorname{erfc}(x) + (1-1/r)e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})}{\operatorname{erfc}(x) - e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})},$ $x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}, r = \tau/\tau_h$
(4.6)	$\frac{\partial T/T}{\partial a/a} = \frac{\frac{x}{\sqrt{\pi}}(1 - \sqrt{1-1/r})e^{-x^2} - x^2\operatorname{erfc}(x) + x^2(1-1/r)e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r})}{e^{-x^2/r}\operatorname{erfc}(x\sqrt{1-1/r}) - \operatorname{erfc}(x)},$ $x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}, r = \tau/\tau_h$
(6.1)	$\frac{\partial T/T}{\partial \tau/\tau} = \frac{1 - 2x^2 + 2\sqrt{\pi}x^3 e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{-2 + 2\sqrt{\pi}x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(6.4)	$\frac{\partial T/T}{\partial \alpha/\alpha} = x \frac{-2x + \sqrt{\pi}(1 + 2x^2)e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{-1 + \sqrt{\pi}x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(6.5)	$\frac{\partial T/T}{\partial \lambda/\lambda} = \frac{-1 - 2x^2 + 2\sqrt{\pi}x(1 + x^2)e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{1 - \sqrt{\pi}x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}$
(6.6)	$\frac{\partial T/T}{\partial \alpha/\alpha} = \frac{1 + 2x^2 - 2\sqrt{\pi}x(1 + x^2)e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}{2 - 2\sqrt{\pi}x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)}, \quad x = \frac{\alpha\sqrt{a\tau}}{\lambda}$

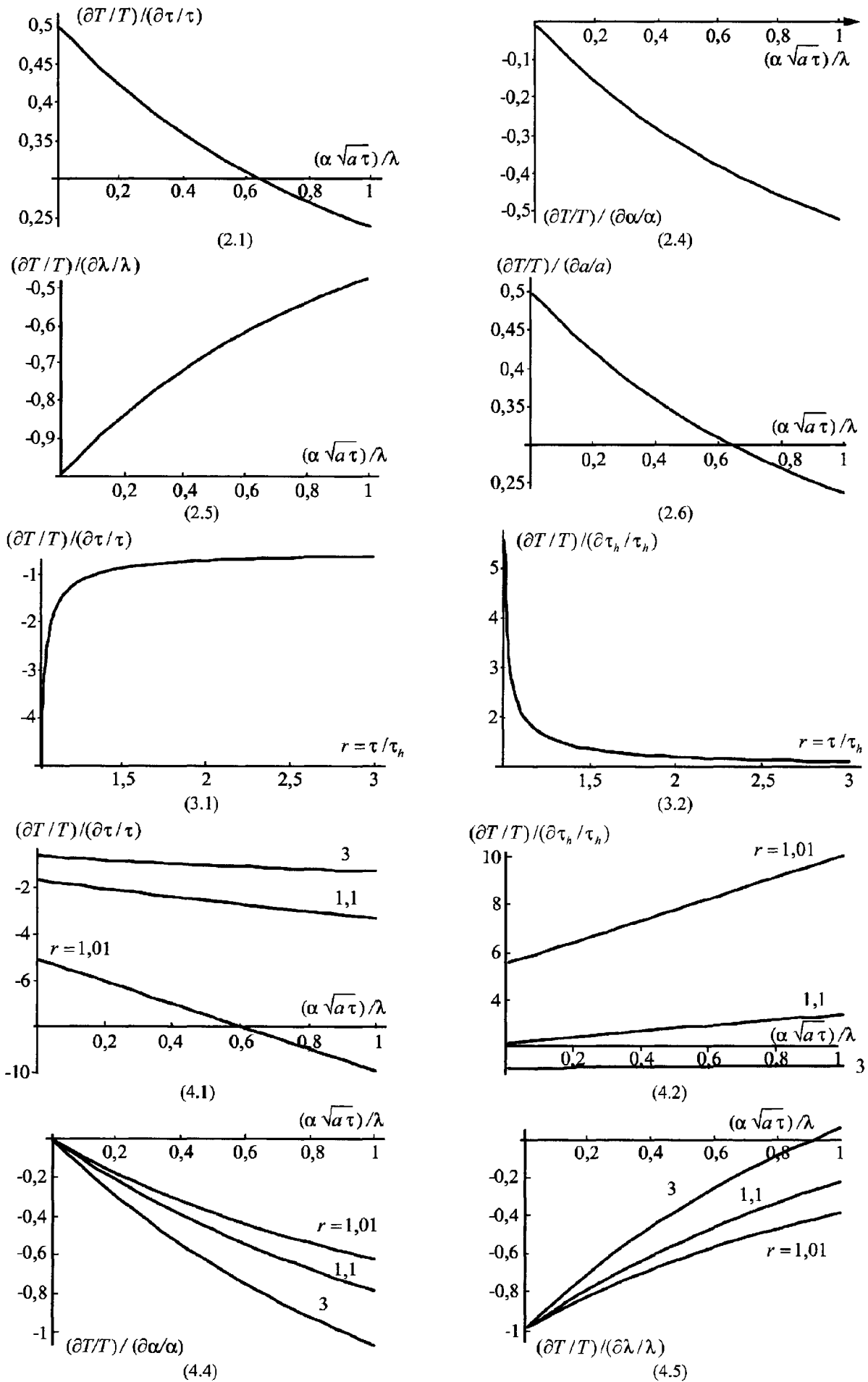


Рис. П1.1. Графики функций чувствительности для неадиабатического полуограниченного тела (см. формулы в табл. П1.2, окончание следует)

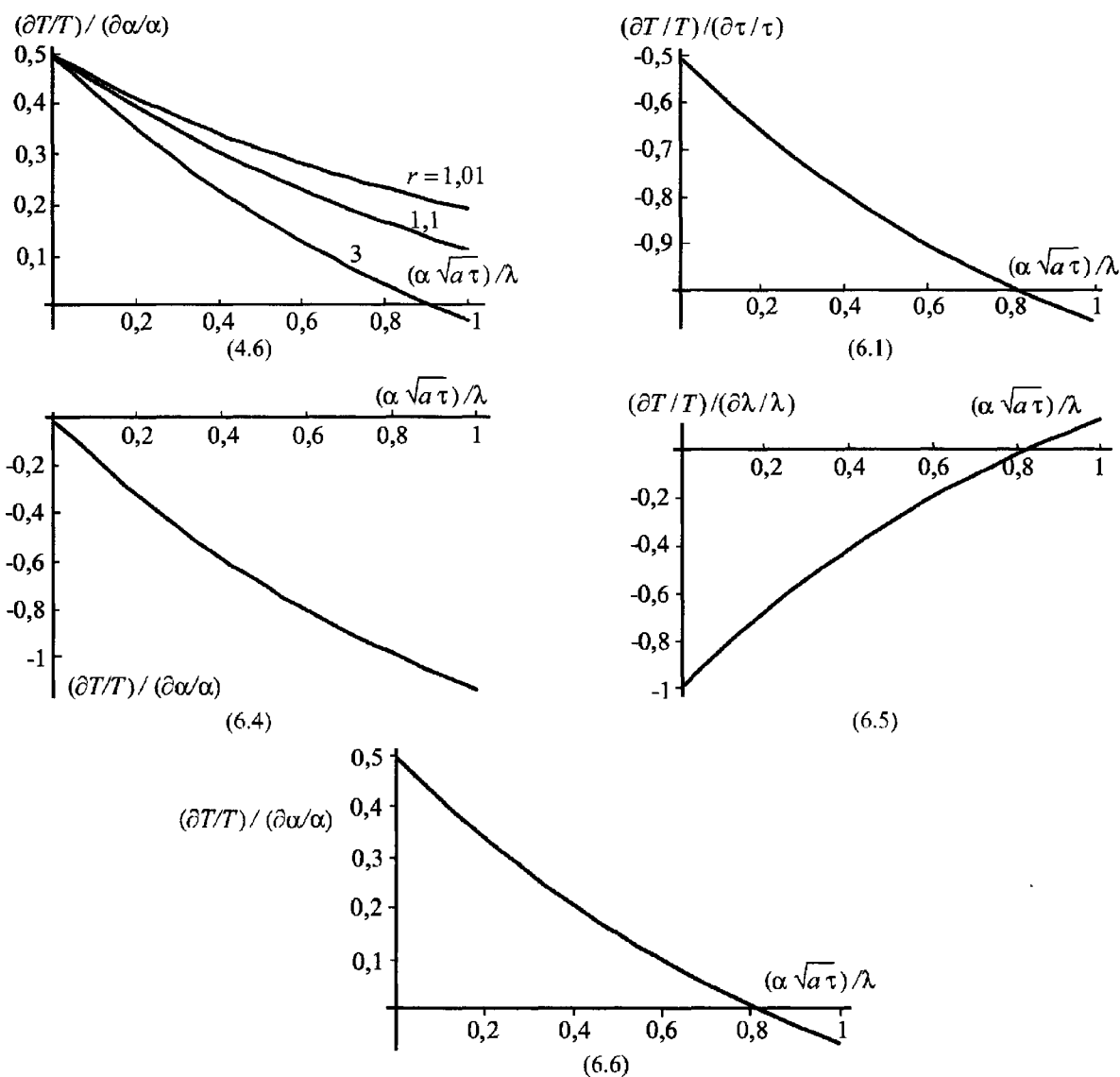


Рис. П1.1. (окончание). Графики функций чувствительности для неадиабатического полуграниченного тела (см. формулы в табл. П1.2)

## Приложение 2. ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ, ПОДСКАЗАННЫЕ АВТОРУ МНОГОЛЕТНЕЙ ПРАКТИКОЙ

**Закон № 1.** Любая обработка портит данные.

*Следствие.* Следует избегать обработки исходных данных.

**Закон № 2.** Дефекты, чьи отметки выглядят как шум, являются шумом.

*Следствие.* Большинство дефектов невозможно обнаружить.

**Закон № 3.** Мировая константа шума равна  $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

*Следствие.* Тепловизоры с чувствительностью лучше  $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$  не обеспечивают лучших результатов.

**Приложение 3. ТИПОВАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
ПО ТЕПЛОВОМУ МЕТОДУ (система экспертизы промышленной безопасности Ростехнадзора РФ)**

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
<p>1.1. Термины и определения</p> <p>1.2. Тепловой вид НК</p> <p>1.3. Активный ТК</p> <p>1.4. Пассивный ТК</p> <p>1.6. Типовые группы дефектов, выявляемых ТК</p>	<p align="center"><i>1. Классификация видов и методов НК</i></p> <p>1.1. Термины и определения</p> <p>1.2. Тепловой вид НК</p> <p>1.5. Квалификационная система методов ТК</p> <p>1.6. Типовые группы дефектов, выявляемых ТК</p>	<p>1.3. Тепловой вид НК</p> <p>1.5. Квалификационная система методов ТК</p> <p>1.6. Типовые группы дефектов, выявляемых ТК</p>
<p>2.1. Элементы теории теплопроводности: теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Определения, единицы измерения. Закон теплопроводности (Фурье)</p> <p>2.4. Источники теплового излучения, температура и ее измерение. Реперные точки температурных шкал</p>	<p align="center"><i>2. Физические основы ТК</i></p> <p>2.1. Элементы теории теплопроводности: теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность. Определения, единицы измерения</p> <p>2.2. Закон теплопроводности (Фурье)</p> <p>2.4. Источники теплового излучения, температура и ее измерение. Статистическое и термодинамическое определение температуры. Международная практическая шкала. Яростная, цветовая и радиационная температура, их взаимосвязь. Реперные точки температурных шкал</p> <p>2.5. Закономерности испускания, распространения и поглощения теплового излучения</p> <p>2.6. Коэффициент излучения. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина. Ламбертовский излучатель</p>	<p>2.1. Элементы теории теплопроводности</p> <p>2.2. Способы измерения ТФХ при импульсном, гармоническом и изотермическом воздействии</p> <p>2.3. Адиабатические системы. Температурные волны. Измерение тепловых потоков, тепломеры</p> <p>2.4. Источники теплового излучения, температура и ее измерение. Методы фотографической и телевизионной пирометрии. Метрологическое обеспечение температурных измерений. Измерение температур при быстропотекающих процессах</p> <p>2.5. Закономерности испускания, распространения и поглощения теплового излучения</p> <p>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 опτικοгеометрические характеристики). ИК излучение новых излучателей, способы его фильтрации. Поляризация ИК излучения. Поляризационные ИК фильтры (типы, характеристики, области применения)</p>

<p>2.7. Спектр излучения АЧТ. Поглощение, рассеяние и пропускание ИК излучения в атмосфере</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>3.1. Оптические системы для фокусировки, модуляции и сканирования ИК излучения, их характеристики</p>	<p>3. <i>Элементы теории оптико-электронных приборов</i></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 селекции 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> <p>3.5. Цифровые и аналоговые методы фильтрации пространственных частот. Способы компьютерной обработки тепловизионных сигналов. Пороговая разность температур, обнаруживаемая тепловизором, и факторы, влияющие на нее</p>

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
<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. <i>Аппаратура ТК</i></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. Пировидиконы 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>
<p>5.1. Основные информативные параметры ТК</p>	<p>5. <i>Технология ТК</i></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>5.5. Методика измерений и порядок передачи результатов измерений на обработку</p>		<p>5.3. Выбор метода контроля и аппаратуры в зависимости от задачи и вида объекта контроля. 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>
<p>6.1. Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД. Поверка средств ТК</p>	<p>6. Метрологическое обеспечение и стандартизация</p> <p>6.1. Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД. Поверка средств ТК</p>	<p>6.1. Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД. Поверка средств ТК</p>
<p>7.1. Понятие о средствах ТК как измерительных или индикаторных приборах в зависимости от требований НТД. Поверка средств ТК</p>	<p>7. Правила безопасности на опасных производственных объектах</p> <p>7.1. Конструкция технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах</p> <p>7.2. Правила безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов</p> <p>7.3. Требования к качеству технических устройств, сооружений (объектов контроля) на опасных производственных объектах</p> <p>7.4. Техническая оснащенность и организация работ по ТК в лаборатории НК</p> <p>7.5. Требования безопасности при проведении НК</p> <p>7.6. Организация участка для проведения НК</p>	<p>Охрана труда</p> <p>7.1. Конструкция технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах</p> <p>7.2. Правила безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов</p> <p>7.3. Требования к качеству технических устройств, сооружений (объектов контроля) на опасных производственных объектах</p> <p>7.4. Техническая оснащенность и организация работ по ТК в лаборатории НК</p> <p>7.5. Требования безопасности при проведении НК</p> <p>7.6. Организация участка для проведения НК</p>



## Продолжение прил. 3

I уровень (не менее 40 ч)	II уровень (не менее 80 ч)	III уровень
	7.7. Требования техники безопасности на производстве. Общие положения 7.8. Требования пожарной безопасности.	7.7. Требования техники безопасности на производстве. Общие положения 7.8. Мероприятия по пожарной безопасности
8. Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД	8. Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД. Критерии оценки состояния объектов контроля по результатам ТК и диагностики с учетом специфических требований каждой отрасли производства	8. Основные положения зарубежных стандартов и отечественных НТД
	9. Современное состояние и направления развития ТК, его значимость для обеспечения качества и надежности выпускаемой предприятием продукции	9. Современное состояние и направления развития ТК
	10. Стандарты, методические рекомендации, инструкции, порядок оформления результатов ТК	
	11. Понятие о других методах НК	11. Значимость НК для обеспечения качества и надежности выпускаемой предприятием продукции. Понятие о других методах НК
12. Критерии оценки состояния объекта контроля с учетом специфических требований каждой отрасли производства (промышленный сектор)		12. Критерии оценки состояния объекта контроля с учетом специфических требований каждой отрасли производства (промышленный сектор)
13. Характерные особенности проведения ТК строительных объектов и объектов ЖКХ		
14. Характерные особенности проведения ТК объектов энергетики		
15. Перспективы развития ТК и области его применения по областям и объектам контроля		
16. Практические занятия по овладению навыками телевизионной съемки		

## Приложение 4. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВОПРОСЫ ОБЩЕГО ЭКЗАМЕНА ПО ТК

### 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 серых тел 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  $\infty$ ;
- в) от  $-1$  до  $+1$ ;
- г) любые.

6. Сильный ветер ... эффективность тепловизионной диагностики электроустановок:

- а) улучшает;
- б) ухудшает;
- в) не влияет на;
- г) слегка улучшает.

7. Коэффициенты пропускания оптически прозрачных материалов могут принимать значения:

- а) от 0 до 1;
- б) от 0 до 2;
- в) от 0 до 0,5;
- г) все вышеперечисленное.

8. При визировании пламени в замкнутом резервуаре тепловизор:

- а) измеряет температуру пламени;
- б) измеряет комбинацию температуры пламени и температуры стенки резервуара за пламенем;
- в) измеряет температуру стенки за пламенем;
- г) неработоспособен.

9. ИК излучение занимает диапазон длин волн от ... до ...

- а)  $0,076 \dots 0,76\text{ мкм}$ ;
- б)  $0,76 \dots 1000\text{ мкм}$ ;
- в)  $1000 \dots 2000\text{ мкм}$ ;
- г)  $2000 \dots 4000\text{ мкм}$ .

10. Абсолютно черное тело (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".

13. Показатель визирования ИК термометра:

- а) зависит от температуры объекта контроля;
- б) зависит от расстояния до объекта контроля;
- в) есть величина, определенная для данной модели;

- г) "а" или "б".

14. При визировании окон жилого дома и отсутствии соответствующей коррекции тепловизор измеряет:

- а) истинную температуру наружной поверхности стекла;
- б) истинную температуру стен внутри помещения;
- в) комбинацию истинной температуры наружной поверхности стекла, температуры окружающей среды и посторонних тепловых источников;
- г) температуру окружающей среды.

15. Действие жидкостных термометров основано на:

- а) 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 у:

- а) любых тел;
- б) АЧТ;
- в) серых тел;
- г) "а", "б" и "в".

18. Наиболее высокой интегральной излучательной способностью при одной и той же температуре и будет обладать:

- а) полированный алюминий;
- б) шероховатый алюминий;
- в) полированное железо;
- г) литое необработанное железо.

19. К основным ТФХ объектов не относят:

- а) теплопроводность;
- б) температуропроводность;
- в) теплоемкость;
- г) температуру.

20. Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладает:

- а) алюминий;
- б) углепластик;
- в) сталь;
- г) титан.

21. Какие средства бесконтактной визуализации тепловых полей могут применяться в тепловизионной технической диагностике:

- а) тепловизоры на пировидиконах;
- 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) расстоянием до объекта;
- г) "а" и "б".

23. Поле обзора тепловизора с матричным детектором ИК излучения зависит от:

- а) размера матрицы детекторов;
- б) фокусного расстояния объектива тепловизора;
- в) диаметра входного зрачка оптической системы;
- г) "а" и "б".

24. Охлаждение объекта контроля ветром относится к следующему механизму теплопередачи:

- а) конвекции;
- б) излучению;
- в) теплопроводности;
- г) "а", "б" и "в".

25. Какие эталонные излучатели могут использоваться для калибровки тепловизоров по температуре:

- а) полостные излучатели типа АЧТ;
- б) планарные (плоскостные) излучатели;
- в) дифференциальные излучатели АЧТ;
- г) все вышеперечисленное.

26. Если дефект проводит тепло хуже, чем основной материал, то место, где он находится, при одностороннем активном ТК на стадии нагрева характеризуется локальным ... температуры:

- а) понижением;
- б) повышением;
- в) как "а", так и "б";
- г) ни "а", ни "б".

27. При одностороннем тепловом контроле 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 (в рамках линейных моделей теплопередачи):

- 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 от 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 дополнительно нагревают от внешнего источника;
- б) объект контроля дополнительно нагревают от внутреннего источника;
- в) объект контроля нагревается в процессе 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 нс;
- б) от долей секунд до нескольких секунд;
- в) до нескольких часов;
- г) десятки минут.

33. При обнаружении скрытых дефектов тепловым методом основным информационным параметром является:

- а) абсолютная температура отдельных точек;
- б) излучательная способность;
- в) перепад температуры между дефектной и бездефектной зоной;
- г) "а" и "б".

34. Оператор-термографист должен ввести следующие поправки в процесс измерения, используя соответствующие встроенные опции тепловизора:

- а) на коэффициент излучения объекта контроля;
- б) на температуру окружающей среды;
- в) на влажность окружающей среды;
- г) "а", "б" и "в".

35. Объемный нагрев металлических изделий возможен с помощью:

- а) электрического тока;
- б) лазера;
- в) импульсной ксеноновой 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) нанесение покрытий (краски);
- в) сверление отверстий;
- г) "а", "б" или "в".

38. Электронно-оптический преобразователь с внешним фотоэффектом имеет длинноволновую границу чувствительности:

- а) 0,2 мкм;
- б) 0,5 мкм;
- в) 1,3 мкм;
- г) 10 мкм.

39. Тепловизионные микроскопы имеют пространственное разрешение на уровне:

- а) десятка 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 до 1;
- б) от 0 до 2;
- в) от -1 до +1;
- г) все вышеперечисленное.

2. Сумма коэффициентов пропускания ( $\tau$ ), отражения ( $\rho$ ) и поглощения ( $\alpha$ ) объекта равна:

- а)  $\tau + \rho + \alpha = 1$ ;
- б) 0,5;
- в) 10;
- г) 100.

3. Закон Планка характеризует:

а) спектральное распределение мощности излучения нагретого тела;

б) интегральную мощность излучения нагретого тела при интегрировании по всему спектру;

в) мощность излучения в определенном спектральном диапазоне при интегрировании в пределах диапазона;

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. Максимум солнечного излучения приходится на длину волны ~0,5 мкм. Поэтому тепловизор со спектральной чувствительностью 7...14 мкм:

а) не будет чувствителен к солнечной засветке;

б) будет чувствителен к солнечной засветке, поскольку солнце излучает и в диапазоне чувствительности тепловизора;

в) будет чувствителен к солнечной засветке, поскольку солнечное излучение нагревает поверхность объектов контроля;

г) "б" и "в".

6. Чем больше угол визирования диффузного излучателя тепловизором или ИК термометром, тем ... "видимая" температура излучателя (объект-излучатель теплее окружающей среды и дополнительные источники подсветки отсутствуют):

а) выше;

б) ниже;

в) отсчет "видимой" температуры не изменяется;

г) как "а", так и "б".

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. Производится измерение температуры поверхности металлического объекта. Установленное в тепловизоре значение коэффициента равно 0,95. Измерения будут более точными в:

а) области полированного металла;

б) месте наличия ржавчины;

в) зависимости от температуры объекта;

г) зависимости от спектральной чувствительности тепловизора.

9. Фотонные приемники излучения, в отличие от тепловых:

а) имеют более низкую детектирующую способность;

б) не требуют охлаждения;

в) обладают ярко-выраженной спектральной чувствительностью;

г) требуют размещения охлаждаемых диафрагм.

10. Цифровую запись термограмм производят:

а) на флэш-карту;

б) во встроенную в тепловизор цифровую память;

в) на жесткий диск компьютера, подключаемого к тепловизору через USB порт или "огненную шину";

г) "а", "б" и "в".

11. При тепловизионном мониторинге удаленных объектов влияние атмосферы может проявляться как:

а) изменение метрологических показателей ИК системы измерения температуры;

б) ослабление резкости изображения;

в) ослабление ИК излучения из-за рассеяния и поглощения в атмосфере;

г) "б" и "в".

12. Объект контроля характеризуется температурой в диапазоне +45...+55 °С. Для наилучшего представления результатов в виде цветной термограммы, цветовая шкала тепловизора должна быть установлена:

а) от 0 до +55 °С;

б) от 0 до +45 °С;

в) от 0 до +100 °С;

г) от +45 до +55 °С.

13. Тепловизоры на базе мозаичных детекторов, установленных в фокальной плоскости (обозначаемые FPA) используют:

а) электронное сканирование;

б) оптико-механическое сканирование;

в) встроенные нагреватели;

г) или "а", или "б" в зависимости от типа ИК детектора.

14. На погрешность измерения абсолютных температур тепловизором влияют в основном:

а) изменение температуры элементов оптической головки тепловизора при переносе тепловизора из среды с одной температурой в среду с другой температурой;

б) светосила объектива;

в) отличие условий градуировки от условий измерения;

г) "а" и "в".

15. Тепловой поток через ограждающую конструкцию дома в стационарном режиме составляет 20 Вт/м<sup>2</sup>, температура внутренней стены +18 °С, наружной -22 °С. Термическое сопротивление ограждающей конструкции равно:

а) 0,5 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К;

б) 1 Вт<sup>-1</sup>·м<sup>2</sup>·К;

в)  $4 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;

г)  $2 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

**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 техническими параметрами тепловизоров являются:**

а) минимальная обнаруживаемая разность температур;

б) частота смены изображений;

в) формат изображения;

г) все вышеперечисленное.

**18. Оптическое увеличение изображения (оптический "зум") путем изменения фокусного расстояния объектива ... пространственное разрешение тепловизора:**

а) ухудшает;

б) улучшает;

в) не изменяет;

г) влияет случайным образом.

**19. Используемое в тепловизорах цифровое увеличение изображения (цифровой "зум") ... пространственное разрешение тепловизора:**

а) ухудшает;

б) улучшает;

в) не изменяет;

г) влияет 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. Источниками помех при тепловизионном обследовании закрытых распределительных устройств являются:**

а) поглощение излучения в атмосфере;

б) непредсказуемые изменения коэффициента излучения объекта контроля;

в) отраженное излучение оператора-термографиста (при визировании хорошо отражающих объектов под прямым углом);

г) "б" и "в".

**23. Применение матричных приемников излучения в тепловидении:**

а) всегда улучшает пространственное разрешение тепловизоров (по сравнению с одиночными ИК детекторами);

б) при соответствующей схеме считывания электрического сигнала позволяет наблюдать все элементы изображения в один и тот же момент времени;

в) всегда улучшает температурную чувствительность (по сравнению с одиночными ИК детекторами);

г) "а", "б" и "в".

**24. С увеличением числа элементов матричного ИК детектора:**

а) всегда улучшается пространственное разрешение;

б) пространственное разрешение улучшается при одном и том же фокусном расстоянии объектива тепловизора;

в) пространственное разрешение практически не изменяется;

г) температурное разрешение улучшается.

**25. Современные измерительные тепловизоры обеспечивают:**

а) измерение температуры в любой точке изображения;

б) визуализацию профилей температуры по любому сечению и построение изотерм;

в) псевдоцветовую "раскраску" изображения;

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. Значение коэффициента излучения объекта, установленное на тепловизоре, завышено по сравнению с истинным. Тепловизор покажет температуру объекта ... истинной:**

а) выше;

б) ниже;

в) равную;

г) "б" или "в" в зависимости от спектральной чувствительности тепловизора.

**29. Установлено, что коэффициент поглощения материала в узком спектральном интервале равен 0,85, а коэффициент отражения равен 0,11. Следовательно, коэффициент пропускания материала в том же спектральном интервале равен:**

а) 0,96;

б) 0,04;

в) 0,106;

г) 0,74.

**30. Температурное разрешение тепловизора можно улучшить путем:**

а) увеличения светосилы объектива;

б) использования приемника излучения с более высокой детектирующей способностью;

в) снижения частоты смены изображений (уменьшения полосы частот электронного тракта);

г) "а", "б" и "в".

**31. Установлено, что коэффициент поглощения материала в узком спектральном интервале**

равен 0,93. Следовательно, коэффициент излучения в том же спектральном интервале равен:

- а) 0,07;
- б) 1,93;
- в) 1,07;
- г) 0,93.

32. Коэффициент теплопроводности описывает перенос тепловой энергии в:

- а) стационарном режиме;
- б) нестационарном режиме;
- в) режиме периодического нагрева;
- г) режиме импульсного нагрева.

33. Производится тепловой контроль микросхемы. Необходимо:

- а) оптимизировать спектральный диапазон работы тепловизора;
- б) обеспечить высокое пространственное разрешение тепловизионной системы;
- в) учитывать изменяющийся от точки к точке коэффициент излучения;
- г) "б" и "в".

34. Для лучистого нагрева больших поверхностей без сканирования применяют:

- а) лазеры;
- б) кварцевые галогенные лампы;
- в) импульсные 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 характеристики обнаружения дефекта;
- в) ухудшает все характеристики обнаружения дефекта;
- г) не влияет на характеристики обнаружения дефекта.

36. Преимуществом нагрева изделий потоком горячего воздуха является:

- а) слабая зависимость от коэффициента излучения изделия;
- б) высокая плотность поглощенной энергии;
- в) импульсный характер нагрева;
- г) "б" и "в".

37. Находящаяся на некоторой глубине в океане подводная лодка может быть обнаружена по ИК термограмме поверхности воды, потому что:

- а) вода прозрачна для теплового излучения подлодки;
- б) вода прозрачна для солнечного излучения, нагревающего подлодку;
- в) на поверхности воды возникает след теплой воды, поднимающейся на поверхность от работающего двигателя;
- г) "а" и "б".

38. Что является основным информационным параметром при ТК:

- а) только локальная разность температур  $\Delta T$  (перепад температуры) между дефектной и бездефектной областью;
- б) перепад температуры  $\Delta T$  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 тепловом контроле электроустановок применяют следующие критерии дефектности:

- а) абсолютную температуру элемента;
- б) превышение температуры элемента над температурой окружающей среды;
- в) разность температур контролируемого элемента и эталонного элемента, находящегося в тех же условиях работы;
- г) "а", "б" и "в".

40. Как характеризуется временной ход температуры нагреваемой поверхности изделия при его нагреве прямоугольным импульсом:

- 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 теплофизических характеристик (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 называются 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 засветки;
- в) расфокусировании лазерного пучка, в результате чего возрастает поглощенная изделием энергия;
- г) "а" и "б".

43. При ТК контактных соединений на электрических подстанциях, находящихся на открытом воздухе следует учитывать на точность измерений:

- а) отраженного солнечного излучения;
- б) ветра;
- в) влажности воздуха;
- г) "а" и "б".

44. В качестве реперного маркера с известным коэффициентом излучения на поверхность объекта при тепловизионном контроле можно наносить:

- а) сажу ( $\epsilon = 0,98$ );
- б) липкую ленту из поливинилхлорида ( $\epsilon = 0,92$ );
- в) химически полированную алюминиевую фольгу ( $\epsilon = 0,03$ );
- г) "а" и "б".

45. Для регистрации длинноволнового ИК излучения (диапазон 7...14 мкм) в сканирующих тепловизорах применяют детекторы:

- а) охлаждаемые фотоспротивления из антимонида индия;
- б) охлаждаемые фоторезисторы на основе тройных соединений КРТ (кадмий–ртуть–теллур);
- в) фотоэлектронные умножители;
- г) все перечисленное.

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 ( $T$ , К) и Цельсия ( $t$ , °С):

- 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 (К) и Цельсия (°С):

- а)  $1 \text{ К} = 1 \text{ °С}$ ;
- б)  $1 \text{ К} = 10 \text{ °С}$ ;
- в)  $1 \text{ К} = 0,1 \text{ °С}$ ;
- г)  $1 \text{ К} = 273 \text{ °С}$ .

4. Может ли тепловизор использоваться в качестве датчика теплового потока при определении сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций строительных сооружений:

- а) не может;
- б) может;
- в) может, если тепловизор снабжен лазерным целеуказателем;
- г) может при наличии соответствующего программного продукта.

5. Мгновенный угол зрения тепловизоров, как правило, ... угла зрения ИК термометров:

- а) равен;
- б) больше;
- в) или "а", или "б";
- г) меньше.

6. Между спектральными коэффициентами поглощения  $\alpha$ , излучения  $\varepsilon$  и отражения  $\rho$  для непрозрачных материалов существует зависимость:

- а)  $\alpha = \varepsilon = 1 - \rho$ ;
- б)  $\alpha = \varepsilon = 1 + \rho$ ;
- в)  $\alpha = \varepsilon = 1/\rho$ ;
- г)  $\alpha = \varepsilon = \rho^2$ .

7. Поперечные размеры скрытых дефектов при ТК могут быть оценены:

- а) непосредственно по ИК термограммам;
- б) с использованием специальных алгоритмов, обеспечивающих выделение границ дефектных "отпечатков";
- в) с использованием внешней подсветки объекта контроля;
- г) "а" или "б".

8. Увеличение шероховатости поверхности объекта контроля изменяет ее коэффициент излучения следующим образом:

- а) увеличивает;
- б) уменьшает;
- в) никак не влияет;
- г) все вышеперечисленное.

9. При тепловизионных измерениях на небольших расстояниях серьезную проблему представляет:

- а) неизвестный коэффициент излучения;
- б) неизвестная температура окружающей среды и посторонних объектов;
- в) неизвестное расстояние до объекта контроля;
- г) "а" и "б".

10. Для устранения помех от высокотемпературных источников (Солнца, пламени и т.п.) в тепловидении применяют:

- а) механическую экранировку;
- б) спектральную фильтрацию;
- в) охлаждение приемника излучения;
- г) "а" или "б".

11. Спектральный коэффициент излучения "серого" тела:

- 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  $\varepsilon$  селективных излучателей изменяются в пределах:

- а)  $0 < \varepsilon < 1$ ;
- б)  $0,1 < \varepsilon < 10$ ;
- в)  $0,1 < \varepsilon < 100$ ;
- г)  $0,1 < \varepsilon < 0,5$ .

13. Коэффициент излучения металлов с ростом температуры:

- а) не изменяется;
- б) увеличивается;
- в) уменьшается;
- г) изменяется случайным образом.

14. Диффузно-излучающий объект имеет температуру окружающей среды (посторонние тепловые источники отсутствуют). Как изменяются показания тепловизора при визировании поверхности объекта под различными углами?

- а) практически не изменяются;
- б) увеличиваются;
- в) уменьшаются;
- г) зависят от абсолютного значения температуры.

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 на основе стандартных фотографических линз;
- г) "а" и "б".

16. Наиболее эффективна процедура ТК, которая обеспечивает максимальное значение:

- а) дифференциального перепада температуры между дефектной и бездефектной зоной;

б) безразмерного контраста температуры между дефектной и бездефектной зоной;

в) отношения сигнал/шум, где сигналом является выбранный критерий дефектности;

г) сдвига фаз между дефектной и бездефектной зоной после применения метода фазовой ИК термографии.

**17. Для тепловизионного обследования верхней части дымовых труб с поверхности земли следует применять:**

а) короткофокусные объективы;

б) любые объективы;

в) "а" или "б";

г) длиннофокусные объективы.

**18. Участки крыш со скрытой в теплоизоляции крыши водой видны на экране тепловизора по сравнению с бездефектными участками ...**

а) не обнаруживают заметных температурных различий;

б) более теплыми в вечерние часы;

в) более теплыми и днем, и ночью;

г) более холодными и днем, и ночью.

**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. «Серое» тело нагрето до температуры 300 К. На какой длине волны имеет место максимум 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. Температурное разрешение тепловизора как его паспортная характеристика ... от расстояния до объекта контроля:**

а) не зависит;

б) зависит линейно (ухудшается с увеличением расстояния);

в) зависит нелинейно;

г) зависит случайным образом.

**24. В каком спектральном диапазоне лучше производить тепловизионный контроль удаленных объектов, особенно в сложных метеословиях?**

а) 2...5 мкм;

б) 8...14 мкм;

в) 1...20 мкм;

г) 0,3...100 мкм.

**25. Какие спектральные фильтры применяются 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) охлаждения приемника излучения тепловизора;

г) все вышеперечисленное.

**27. При измерении температуры внутри вакуумплотных резервуаров тепловизором, работающим в диапазоне 3...5,5 мкм, следует применять окна из:**

а) силикатного стекла;

б) кварцевого стекла;

в) ИК стекла, прозрачного в диапазоне 3...5,5 мкм;

г) "б" или "в".

**28. Приемники излучения тепловизоров охлаждаются с целью:**

а) снизить собственные тепловые шумы приемника;

б) снизить шумы объекта контроля;

в) стабилизировать температуру внутри оптической головки;

г) "б" и "в".

**29. Для теплового контроля коррозии в заклепочных соединениях алюминиевых авиационных панелей следует применять:**

а) СВЧ нагрев;

б) нагрев импульсными ксеноновыми лампами;

в) нагрев электрическим током;

г) "а", "б" или "в".

**30. Метод фазовой ИК термографии с использованием одномерного преобразования Фурье применим:**

а) к динамическим последовательностям ИК термограмм;

б) только к одиночным термограммам;

в) "а" и "б";

г) только к стационарным процессам.

**31. В процедуре активного ТК точечным движущимся источником тепла 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 (нижней) 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 на стадии нагрева 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 на стадии нагрева в области над дефектами наблюдается:

- а) повышение температуры;
- б) понижение температуры;
- в) нет изменения температуры;
- г) изменяется гармонически.

35. Основными теплофизическими характеристиками (ТФХ) материалов являются:

- а) температура;
- б) коэффициент преломления ИК излучения;
- в) температуропроводность и теплопроводность;
- г) модуль упругости.

36. Какой зависимостью связан момент максимального температурного перепада над дефектом с глубиной его залегания при одностороннем ТК:

- а) никак не связан;
- б) возрастающей (линейной, квадратической) 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) ухудшает выявляемость дефектов, ничем не ограничена;
- г) повышает уровень нагрева объекта, улучшает выявляемость дефектов, ограничена порогом теплового разрушения объекта.

39. В основе теоретического 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. Если абсолютная температура "серого" объекта возрастает в 2 раза, полная мощность излучения во всем спектре возрастает в ... раз:

- а) 16;
- б) 8;
- в) 2;
- г) 4.

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) "б" или "в".

43. Для повышения вероятности распознавания дефектов с использованием ИК термограмм можно использовать:

- а) двухспектральные или мультиспектральные термограммы;
- б) пространственно-временную фильтрацию термограмм;
- в) обработку ИК термограмм с помощью обучающихся нейронных сетей;
- г) все вышеперечисленное.

44. Для привязки координат тепловых аномалий к поверхности объекта контроля применяют:

- а) подсвечивание объекта контроля лучом лазера;
- 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:

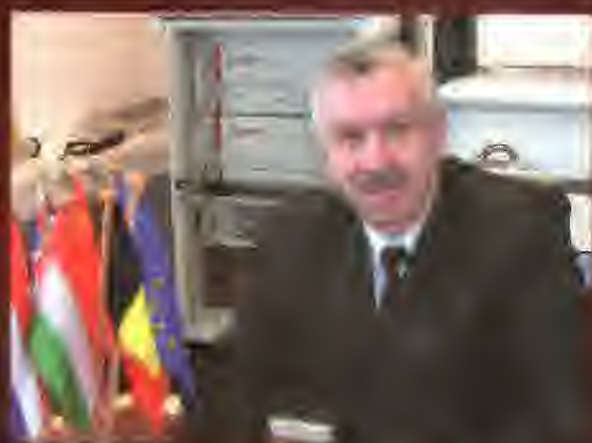
- а) повысить мощность источника нагрева;
- б) применить объемный нагрев объекта;
- в) использовать метод анализа изменения поверхностного температурного перепада во времени;
- г) "а", "б" и "в".

46. Для обнаружения влаги в пористых неметаллических материалах наиболее целесообразно применять:

- а) мощный лазер;
- б) индуктор;
- в) СВЧ излучатель;
- г) электрический ток.

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.



**В.П. Вавилов** - окончил Томский политехнический университет. В 1975 г. защитил кандидатскую, в 1986 г. - докторскую диссертацию по проблемам теплового контроля.

Опубликовал 14 монографий и более 200 статей, включая публикации на английском, итальянском, польском, французском, японском, китайском, испанском и португальском языках. Вице-президент Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (РОНКТД). Представляет интересы СНГ в Европейской рабочей группе по ИК термографии (QIRT). Член ИК секции Американского общества неразрушающего контроля (ASNT) и Международной Академии Инфракрасной Термографии. Лектор Международного оптического общества (SPIE) и Международного центра обучения инфракрасным технологиям (ITC), а также эксперт МАГАТЭ (IAEA) по тепловому контролю. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники за 2004 г. III-й уровень Ростехнадзора по тепловому контролю. Заслуженный деятель науки РФ.

ISBN 978-5-904270-05-6



9 785904 270056