

Нестерук Д.А., Вавилов В.П.

**Тепловой контроль и диагностика**  
Учебное пособие

Томск 2007

УДК 620.179.13

**Д.А.Нестерук, В.П.Вавилов**

Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск., 2007. – 104 с.

Учебное пособие содержит базовые сведения об активном и пассивном способах теплового неразрушающего контроля, а также описание физических основ и аппаратуры теплового метода. Описана постановка задач теплопередачи в дефектных структурах, а также изложены принципы моделирования тепловых процессов.

Пособие подготовлено на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» ТПУ и предназначено для обучения студентов специальностей 200102 («Приборы и методы контроля качества и диагностики»), 220501 («Управление качеством»), а также персонала, аттестуемого на I, II, III отечественный и международный уровень квалификации по тепловому методу НК.

УДК 620.179.13

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским Советом Томского политехнического университета

Рецензенты:

Рейно В.В.

Старший научный сотрудник  
лаборатории распространения  
волн Института оптики  
атмосферы СО РАН

©Томский политехнический университет, 2007

© Д.А.Нестерук, В.П.Вавилов, 2007

© Оформление. Издательство ТПУ, 2007

<b>Глава 1. Основы теплового неразрушающего контроля .....</b>	<b>5</b>
Основные термины в тепловом неразрушающем контроле .....	5
Области применения ТК.....	6
Системный подход к проектированию устройств активного ТК .....	6
Шкалы температуры .....	7
Распространенные способы измерения температуры .....	8
Термометры сопротивления.....	9
Термопары .....	11
Схемы активного теплового контроля.....	13
Основные характеристики ИТН .....	15
Типы ИТН .....	15
Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева .....	17
Типы дефектов, обнаруживаемых в тепловом контроле .....	18
Базовые процедуры активного ТК .....	19
<b>Глава 2. Теплопередача и моделирование задач теплопроводности .....</b>	<b>22</b>
Механизмы теплопередачи .....	22
Адиабатический и неадиабатический теплообмен.....	24
Теплопередача в тонких газовых промежутках.....	24
Дифференциальное уравнение теплопроводности.....	24
Теплофизические характеристики материалов.....	26
Дополнительные условия для решения уравнения теплопередачи .....	28
Прямые и обратные задачи ТК .....	30
Моделирование задач теплопередачи.....	30
Постановка задач теплопередачи .....	33
Классические решения теории теплопроводности.....	34
Анализ классических решений теплопроводности .....	42
Разностные соотношения .....	48
Построение сетки .....	48
Построение разностных схем .....	50
Оценка погрешности аппроксимации.....	51
Устойчивость и сходимость разностных схем.....	51
Примеры реализации численных расчетов для Matlab .....	52
<b>Глава 3. Основные закономерности активного ТК. Обработка результатов тепловизионных измерений .....</b>	<b>55</b>
Условия обнаружения сигналов от внутренних дефектов .....	55
Информативные параметры ТК.....	56
Основные функциональные зависимости температурных сигналов от параметров изделия и дефекта при импульсном ТК .....	58
Стандартная обработка тепловизионных изображений.....	65
Хранение тепловизионных изображений .....	67
Развитая обработка тепловизионных изображений .....	68
<b>Глава 4. Основы ИК термографии. Современные ИК тепловизоры и пирометры.....</b>	<b>78</b>
Историческая справка.....	78
Спектр электромагнитных колебаний .....	78

Законы теплового излучения .....	79
Закон Ламберта.....	81
Закон Кирхгофа .....	82
Схема и уравнение ИК термографирования .....	83
Проблема коэффициента излучения .....	84
Системы построения изображения в ИК диапазоне (тепловизоры)....	88
Приемники оптического излучения .....	89
Оптика тепловизоров .....	92
Основные характеристики тепловизоров .....	93
Классификация тепловизоров.....	95
ИК термометры (пирометры).....	97
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>100</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>103</b>

# Глава 1. Основы теплового неразрушающего контроля

## Основные термины в тепловом неразрушающем контроле

Основные термины, относящиеся к тепловому неразрушающему контролю (НРК), приведены в Таблице 1.1

Таблица 1.1

### Основные термины теплового контроля

Тепловой неразрушающий контроль	Исследование изделий посредством наблюдения (визуализации) неоднородностей в тепловых потоках вызываемых внутренними дефектами.
Инфракрасный неразрушающий контроль	Вид теплового неразрушающего контроля с использованием инфракрасной (ИК) техники (тепловизор или пирометр).
Стационарный тепловой процесс	Значение температуры в любой точке образца не зависит от времени.
Нестационарный тепловой процесс	Значение температуры в любой точке образца зависит от времени.
Пассивный вид теплового неразрушающего контроля	Тепловой контроль (ТК) объектов, когда достаточные для регистрации температурные сигналы возникают вследствие функционирования объекта или объект находится при температуре, отличной от температуры окружающей среды. Температура поверхности сама по себе служит прямым индикатором качества и правильности функционирования.
Активный вид теплового неразрушающего контроля	ТК объектов, подразумевающий использование дополнительных источников тепловой стимуляции.
Тепловизор	Устройство для построения тепловизионных изображений.
Температурный сигнал	Разность между температурой в дефектной области и температурой в бездефектной области
Избыточная температура	Разность между текущей температурой и температурой принятой за начальную.
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
Импульсный метод (flash technique)	Длительность тепловой стимуляции существенно меньше характерного времени наблюдения; как правило, нагрев производят с помощью импульсного лазера или импульсной лампы
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)

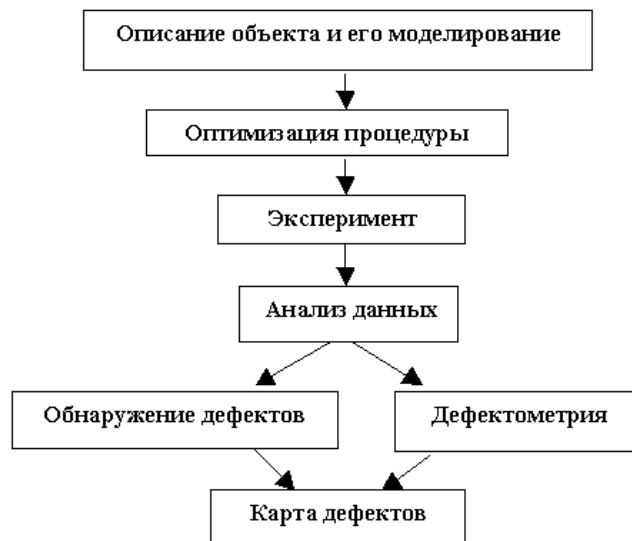
## **Области применения ТК**

Развитие (ИК) техники в последнее время значительно расширило область применения ТК. Ниже приводятся области, в которых этот метод ТК и ИК оборудование нашли широкое применение [1, 2, 3, 4]:

- производство, контроль за технологическими процессами (production): печатные платы, сварные соединения, производство стали, цемента, стекольная, бумажная промышленность;
- техническое обслуживание, техническая диагностика: электрическое оборудование, бойлеры и паровые системы, механическое оборудование, здания и сооружения, газораспределительные системы, резервуары с жидкими продуктами;
- медицина: заболевания кровообращения, онкология;
- мониторинг дорожного движения;
- борьба с лесными пожарами;
- биология;
- астрономия;
- военная техника.

## **Системный подход к проектированию устройств активного ТК**

Устройства активного ТК находят применение как в дефектоскопии, так и в дефектометрии. Технология применения активного ТК изображена на Рис. 1.1.



**Рис. 1.1. Технология активного ТК**

Исходным пунктом является **анализ объекта контроля**. ТФХ объекта, глубина и размеры дефекта определяют амплитуду температурного сигнала над дефектом и оптимальное время его выявления [5]. Предельные параметры обнаруживаемых дефектов определяются уровнем шума. При правильно поставленном эксперименте преобладающими являются шумы, обусловленные объектом контроля. Таким образом, свойства объекта

контроля определяют требования к аппаратуре ТК, в частности, к частоте записи термограмм, мощности и длительности нагрева.

При численном моделировании реальное изделие заменяют более простыми теоретическими моделями. Используя аналитические решения или численное моделирование, анализируют динамику температуры для модели в зависимости от ее размерности (одно-, дву- или трехмерное моделирование).

Моделирование конкретной процедуры ТК позволяет осуществить оптимизацию эксперимента с учетом возможных практических ограничений. Результатом оптимизированного эксперимента, как правило, является температурная функция  $T(i, j, \tau)$ , определенная для каждой точки объекта контроля.

Анализ экспериментальных данных проводят с помощью специализированного программного обеспечения, ставя цель обнаружить дефекты с заданными статистическими характеристиками, такими, как вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги. 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* – бездефектным областям.

С учетом технологии ТК, описанной выше, основными компонентами систем активного ТК являются: 1) источник нагрева; 2) компьютерная тепловизионная система; 3) специализированные компьютерные программы для моделирования задач ТК и обработки экспериментальных данных.

### **Шкалы температуры**

Температура — величина, обратная изменению энтропии (степени беспорядка) системы при добавлении в систему единичного количества теплоты:  $1/T = \Delta S / \Delta Q$ , где  $T$  – температура,  $\Delta S$  – приращение энтропии,  $\Delta Q$  – изменение энергии. Согласно закону Стефана-Больцмана (для одного моля газа)  $p\nu = RT$ , где,  $p$  – давление газа,  $\nu$  – объем газа,  $R$  – константа, называемая универсальной газовой постоянной, значение которой для заданной массы газа – одной грамм-молекулы – зависит только от выбранной единицы измерения абсолютной температуры  $T$ . Чтобы определить числовое значение температуры  $T$ , необходимо выбрать для нее единицу измерения. Для этого достаточно **произвольно** установить значение температуры, соответствующей четко определенному и воспроизводимому явлению.

Существуют 2 **абсолютные** термодинамические шкалы – шкала Кельвина и шкала Рэнкина [6]. Посредством простого смещения нуля термодинамической шкалы можно получить **производные** шкалы температур, не являющиеся абсолютными, но с **такой же единицей измерения**, как у исходной абсолютной шкалы.

**Абсолютные шкалы.** *Шкала Кельвина.* Единица измерения кельвин (К) определяется из того условия, что температура воды в тройной точке (температура равновесия воды, льда и пара) равна 273,16 К (т.е. в шкале Кельвина диапазон температур от абсолютного нуля до точки замерзания воды разделен на 273,16 частей)

*Шкала Рэнкина.* Единица измерения — градус Рэнкина ( $^{\circ}\text{R}$ ) — равен  $\frac{5}{9}$  кельвина; при таком определении температура в тройной точке воды равна  $491,69^{\circ}\text{R}$ .

**Производные шкалы.** *Шкала Цельсия.* Получается из абсолютной шкалы Кельвина, если за нуль принять температуру замерзания воды; единица измерения этой шкалы — градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) — равна одному кельвину:  $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.16$

*Шкала Фаренгейта.* Получается смещением нуля абсолютной шкалы Рэнкина; единица измерения — градус Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ) — равна одному градусу Рэнкина:

$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459.67$ . Шкала распространена в Великобритании и, в особенности, в США. Примечательно, что этой шкале на 100 градусов разделён интервал от температуры самой холодной зимы в городе, где жил Фаренгейт, до температуры человеческого тела.

Формулы перехода от одной шкалы к другой имеют следующий вид:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32] (5/9) ,$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = (9/5) T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

### **Распространенные способы измерения температуры**

**Стеклянный термометр.** Основан на расширении/сжатии жидкости (обычно ртуть или подкрашенный спирт) в стеклянной оболочке из-за изменения температуры [7]. Широко используемый метод из-за высокой автономности и невысокой цены. Диапазон измерений от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$  с точностью до  $0,03^{\circ}\text{C}$ . Основные недостатки при использовании в ТК: возможность измерения только в отдельных точках, высокая токсичность ртути.

**Жидкие кристаллы.** Открыты в 1888 году Ф. Райнитцером. Долгое время рассматривались в качестве физического курьеза [8]. Принцип действия: молекулы холестерина меняют ориентацию в пространстве в зависимости от температуры и отражают падающий белый свет в диапазоне от красного до фиолетового. В зависимости от состава, чувствительность может достигать  $0.01^{\circ}\text{C}$ . Преимущества: экономичный метод, чувствительный к незначительным изменениям температуры, позволяет измерять и визуализировать температуру всей поверхности. Недостатки: контактный характер, ограниченный диапазон чувствительности ( $5, 10^{\circ}\text{C}$ ), необходимость предварительной подготовки поверхности, а также последующей очистки. Жидкокристаллические термоиндикаторы обычно поставляются в виде густой жидкости, которая наносится на зачерненную поверхность. При наблюдении в направлении нормали слой жидкого



термоиндикатора по мере повышения температуры показывает следующую последовательность цветов: красный, желтый, зеленый, голубой, фиолетовый.

**Термометры сопротивления.** Метод изобретен В. Сименсом в 1871 году. Датчики такого типа составляли 25% американского рынка температурных датчиков в 1988 году. Принцип: зависимость величины электрического сопротивления от температуры. Преимущества: высокая воспроизводимость результатов (возможность замены вышедшего из строя датчика на аналогичный), высокая стабильность (платиновое сопротивление с чувствительностью  $0,006^{\circ}\text{C}$  используется как температурный стандарт). Недостатки: контактный характер измерений в отдельных точках, хрупкость, высокая стоимость (при использовании платины), трудность обеспечения хорошего контакта.

**Термопары.** Изобретены Т.И. Зеебеком в 1821 году. В 1984 г. составляли 41% американского рынка температурных датчиков. Принцип: в электрической цепи, сформированной из 2 проводников из различных материалов, генерируется ЭДС, пропорциональная разности температур между этими контактами. Диапазон измерений температуры: от абсолютного нуля до  $+2750^{\circ}\text{C}$ . Преимущества: экономичность, удобство применения (датчик может быть достаточно удален от аппаратуры измерения). Недостатки: невысокий уровень электрических сигналов, зашумленность (точность измерения обычно ограничена  $0,5^{\circ}\text{C}$ ), один из двух контактов должен находиться при известной температуре, хрупкость датчиков, контактный характер измерений в отдельных точках, длительное время установления теплового равновесия между датчиком и объектом измерения (порядка одной секунды).

**Радиационные измерения (измерения ИК излучения).** Принцип: дистанционное измерение излучаемой поверхностью тела энергии. Преимущества: бесконтактный невозмущающий характер измерения. Недостатки: влияние коэффициента излучения поверхности как неизвестного фактора, наличие отражения излучения окружающих тел, высокая стоимость аппаратуры (в сравнении с рассмотренными выше). Широкое распространение ИК приборов измерения температуры с середины 60-х годов обусловило рост интереса к ТК.

### **Термометры сопротивления**

Работа термометров сопротивления основана на зависимости величины электрического сопротивления материала от его температуры  $T$ :  $R(T) = R_0 F(T - T_0)$ , где  $R_0$  – сопротивление при температуре  $T_0$ , а функция  $F$  является характеристикой материала и равна 1 при  $T = T_0$ . Так, для металлов  $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$ , где температура  $T$  выражается в  $^{\circ}\text{C}$ , а  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . Для термисторов, изготавливаемых из смесей полупроводниковых оксидов,  $R(T) = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)]$ , где  $T$  – абсолютная температура. Коэффициенты в законе изменения  $R$  обычно известны из серии измерений при нескольких

температурах; поэтому, измерив величину  $R$ , можно определить температуру термометра.

Для измерения сопротивления термометра сопротивления часто применяют мостовая схема (мост Уитстона).

Для малых изменений температуры  $\Delta T$  в окрестности значения  $T$  общую зависимость изменения сопротивления от температуры можно

линеаризовать:  $R(T + \Delta T) = R(T)(1 + \alpha_R \Delta T)$ , где  $\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT}$  температурный

коэффициент сопротивления, или чувствительность при температуре  $T$ .

Величина  $\alpha_R$ , очевидно, зависит от температуры и материала термометра.

Например, при температуре  $0^\circ\text{C}$  для платины  $\alpha_R = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ; для некоторых термисторов  $\alpha_R = 5,2 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Термометры сопротивления можно разделить на 3 группы: металлические термометры сопротивления, термисторы и кремниевые термометры сопротивления.

**Металлические термометры сопротивления.** Характеризуются положительным температурным коэффициентом. В зависимости от диапазона температур и других предъявляемых требований, металлические термометры сопротивления изготавливаются из платины, никеля и, реже, из меди и вольфрама. Можно получить платину очень высокой чистоты (99,999%), что позволяет очень точно определять ее электрические характеристики. Химическая пассивность платины и отсутствие кристаллических изменений обеспечивают стабильность электрических свойств. Благодаря точности определения электрических характеристик и их стабильности обеспечивается взаимозаменяемость платиновых термометров сопротивления, которые используются в интервале температур от минус 200 до  $1000^\circ\text{C}$ , если это позволяет защитный корпус.

**Термисторы.** Основное отличие термометров сопротивления этого типа состоит в том, что их чувствительность к температуре значительно выше (приблизительно в 10 раз), чем металлических. Кроме того, их температурный коэффициент обычно отрицательный и сильно зависит от температуры. Термисторы изготавливают из смесей поликристаллических полупроводниковых оксидов металлов ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnTiO}_4$ ).

Порошки оксидов спекаются в форме под давлением и упрочняются посредством поверхностного обжига при температурах порядка  $1000^\circ\text{C}$  в контролируемой атмосфере. Металлические выводы припаиваются к двум точкам предварительно металлизированной поверхности полупроводника. Термисторы выпускаются в виде дисков, цилиндров, колец, шариков. Чувствительный элемент может иметь защитный корпус или капсулу. Высокие значения удельного сопротивления используемых материалов позволяют получить необходимые сопротивления при малой массе и, следовательно, малых размерах (порядка 1 мм). Вследствие этого термисторы имеют малые габариты, что позволяет проводить измерения

температуры практически в точке, а также малую теплоемкость, что обеспечивает их малую инерционность.

**Кремниевые термометры сопротивления.** Полупроводниковые датчики температуры этого типа отличаются от рассмотренных выше термисторов следующими особенностями. У кремниевых датчиков температурный коэффициент сопротивления положительный и имеет величину порядка  $0,7 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$  при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ ; более слабая зависимость сопротивления от температуры позволяет осуществить линеаризацию характеристики датчика с высокой точностью во всем рабочем диапазоне температур при помощи единственного резистора с постоянным сопротивлением, присоединенного, в зависимости от схемы измерения, последовательно или параллельно. Резисторы являются взаимозаменяемыми, что обеспечивается высокой точностью и стабильностью технологии изготовления. Рабочий диапазон температур от  $-50$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ .

### **Термопары**

Термопара, образованная двумя проводниками  $A$  и  $B$ , два спая которых находятся при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , создает ЭДС, зависящую, с одной стороны, от материала проводников  $A$  и  $B$  и, с другой стороны, от температур  $T_1$  и  $T_2$ .

Обычно температура одного спая постоянна и известна; она служит опорной (нулевой) точкой  $T_1 = T_r$ . Температура другого спая  $T_2$  является температурой  $T_x$ , которую приобретает этот спай в исследуемой среде с температурой  $T_x$ .

Поскольку измерительная информация поступает от спая, размеры которого могут быть очень малыми, это обеспечивает высокое быстродействие и позволяет проводить точечные измерения температуры.

Другое достоинство термопары заключается в вырабатываемом сигнале – ЭДС, для измерения которого не требуется пропускать ток через датчик, поэтому не возникает, как в случае термометров сопротивления, погрешности, связанной с саморазогревом, что существенно при измерениях в системах с малой тепловой инерцией, а также при низких температурах.

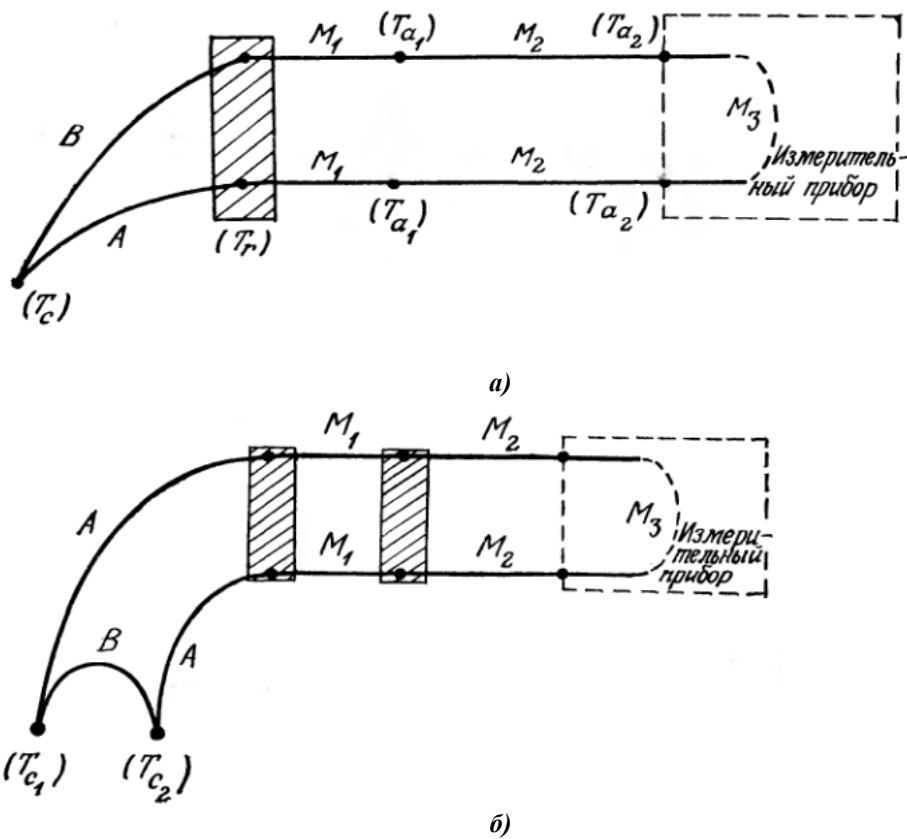
Недостаток термопары заключается в том, что необходимо знать температуру опорного спая. Любая погрешность  $T_r$  приводит к погрешности такого же порядка в определении  $T_x$ .

Термопары в зависимости от их типа применяют от очень низких температур (от  $-270^{\circ}\text{C}$  для термопары медь — сплав серебра с кобальтом) до очень высоких температур ( $+2700^{\circ}\text{C}$  для термопары вольфрам-рений (5% Re)). В последнем случае они позволяют измерять значительно более высокие температуры, чем термометры сопротивления (приблизительно на  $1400^{\circ}\text{C}$ ).

В характеристиках термопар приводится изменение ЭДС при температуре опорного спая  $0^{\circ}\text{C}$ . На **Рис. 1.2** приведена принципиальная схема подключения термопары для измерения температуры, где  $A$ ,  $B$ ,  $M1$ ,

M2, M3 металлические проводники, концы которых находятся при температурах  $T_c$ ,  $T_r$ ,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ . Если  $T_r = 0$ , то температура  $T_c$  определяется из таблицы термо ЭДС для термопары.

Для измерения разности температур  $T_{c1}$  и  $T_{c2}$  применяется схема представленная на **Рис. 1.2**, где каждая пара соединений проводников из металлов M1 и M2 должна находиться при одинаковой температуре.



**Рис. 1.2.** Схема подключения термопары к измерительному прибору

а) для измерения температуры спая  $T_c$

б) для измерения разности температур  $T_{c1} - T_{c2}$

Чувствительность термопары к температуре, или термоэлектрическая способность  $S$ , зависит от температуры  $T_c$  и определяется соотношением:

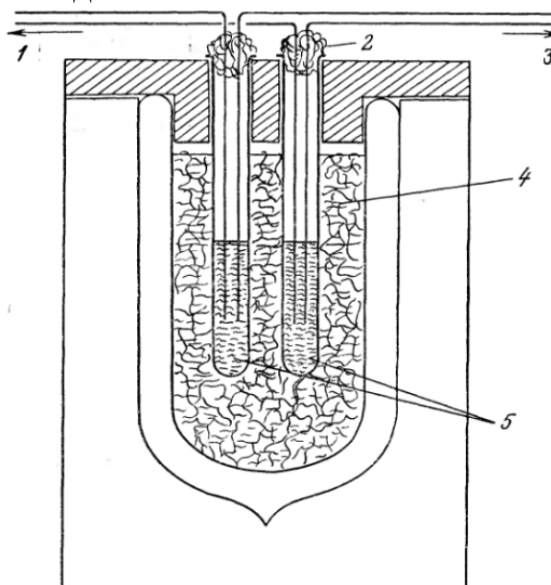
$S(T_c) = \frac{dE_{A/B}^{T_c}}{dT_c}$  и выражается в мкВ/°С. Например, для термопары железо-

константан  $S(0^\circ\text{C}) = 52,9$  мкВ/°С,  $s(700^\circ\text{C}) = 63,8$  мкВ/°С, а для термопары платино-родий (10% Rh)-платина  $S(0^\circ\text{C}) = 6,4$  мкВ/°С,  $S(1400^\circ\text{C}) = 11,93$  мкВ/°С. Таким образом, чувствительность термопар значительно ниже чувствительности измерительных установок с термометрами сопротивления.

**Опорная температура.** ЭДС термопары зависит одновременно от температуры  $T_c$  спая, расположенного в точке измерения, и от температуры ее опорного спая с соединительным проводом  $T_r$ . Что касается последней, то могут быть три случая:  $T_r = 0^\circ\text{C}$ ;  $T_r$  – постоянная, но не равная  $0^\circ\text{C}$ ;  $T_r$  – переменная, обычно равная температуре окружающей среды.

Опорная температура равна  $0^\circ\text{C}$ . Это равновесная температура смеси воды со льдом при нормальном атмосферном давлении. В этом случае

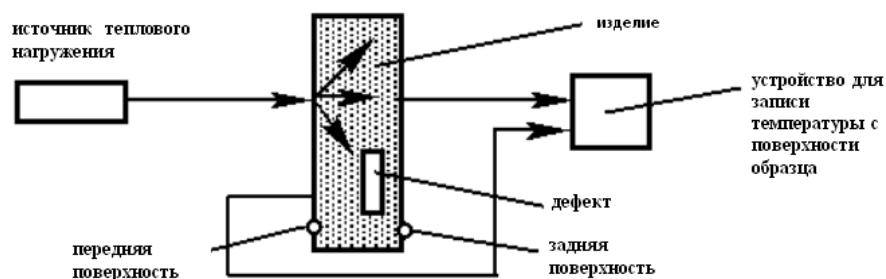
измеренная ЭДС позволяет непосредственно определить температуру  $T_c$  по таблице ЭДС для применяемой термопары. На **Рис. 1.3** показана конструкция термостата, обеспечивающая выполнение этого условия [6]. При точных измерениях необходимо учитывать влияние давления на равновесную температуру  $T_r$  смеси воды со льдом. Температура, равная  $0^\circ\text{C}$ , может поддерживаться с довольно высокой точностью ( $\pm 0,02^\circ\text{C}$ ) в термостате с охлаждением, основанным на использовании эффекта Пельтье. Такой термостат надежно работает в ограниченном диапазоне температур внешней среды, приблизительно от  $0$  до  $+50^\circ\text{C}$ .



**Рис. 1.3.** Схема термостата (1 - к измерительному спаю; 2 - вата; 3 - к измерительному прибору; 4 - смесь воды со льдом; 5 - ртуть)

### **Схемы активного теплового контроля**

Схема активного ТК представлена на **Рис. 1.4**. Исследуемое изделие подвергается тепловому воздействию посредством источника теплового нагружения (ИТН) на передней (относительно ИТН) поверхности. Внутри твердого тела тепловая энергия распространяется во всех направлениях за счет процесса диффузии. Из-за наличия скрытых дефектов тепловые потоки внутри образца перераспределяются, что приводит к появлению на передней и задней поверхности образца специфических температурных аномалий. Температурные аномалии (сигналы) наблюдаются и регистрируются с помощью устройств измерения или визуализации температуры (например, тепловизора). Амплитуда, форма и изменение во времени температурных сигналов служат информативными параметрами, которые позволяют оператору или автоматической системе обнаруживать те или иные дефекты (дефектоскопия), а также оценивать их параметры (дефектометрия).



**Рис 1.4. Схема активного теплового контроля**

С точки зрения расположения ИТН и устройства регистрации температуры относительно образца возможны две схемы активного ТК [7]. В **односторонней процедуре** (reflection procedure, one-sided test) ИТН и устройство регистрации температуры расположены с одной стороны относительно образца. **Двусторонняя процедура** (transmission procedure, two-sided test) предусматривает размещение нагревателя и регистратора по разным сторонам относительно образца.

В **Таблице 1.2** приведены сравнительные характеристики односторонней, двухсторонней и комбинированной процедур активного теплового контроля.

**Таблица 1.2**

**Сравнительные характеристики процедур активного ТК**

Схема	Основные черты			
	Импульсный нагрев (лампа-вспышка)	Импульс конечной длительности (продолжительный нагрев)	Периодический (гармонический) нагрев	Произвольный нагрев (несколько вспышек, произвольное изменение длительности)
<b>Односторонняя</b>	Близкорасположенные к поверхности дефекты и/или высокотеплопроводные материалы. Высокая производительность. Сильное влияние глубины расположения дефекта.	Глубоко расположенные дефекты и/или низкотеплопроводные материалы. Средняя производительность. Сильное влияние глубины расположения дефекта.	Частота должна быть оптимизирована в соответствии с глубиной дефекта. Низкая производительность. Сильное влияние глубины расположения дефекта.	Сильное влияние глубины расположения дефекта. Недостаточно изучен.
<b>Двусторонняя</b>	Тонкие и/или высокотеплопроводные материалы. Слабое влияние глубины дефекта. Производительность зависит от типа материала.	Образцы средней толщины. Слабое влияние глубины дефекта. Производительность зависит от типа материала.	Образцы средней толщины. Слабое влияние глубины дефекта. Производительность зависит от типа материала.	Недостаточно изучен.
<b>Комбинированная</b>	Совместное использование двухсторонней и односторонней процедуры. Метод не достаточно изучен.			

Вышеописанные процедуры различаются по чувствительности к скрытым дефектам. При одностороннем контроле уверенно обнаруживаются подповерхностные дефекты. Для обнаружения глубоких дефектов более пригодна двухсторонняя схема ТК, однако изделия большой толщины могут потребовать длительного нагрева мощным нагревателем. Двухсторонняя процедура не всегда возможна на практике вследствие отсутствия доступа к задней поверхности. В целом считается, что односторонняя процедура более пригодна для обнаружения дефектов, расположенных близко к нагреваемой поверхности, тогда как двухсторонняя процедура более эффективна для обнаружения дефектов расположенных возле задней поверхности образца.

### **Основные характеристики ИТН**

К основным характеристикам источников нагрева (охлаждения) относятся:

- энергетические характеристики: мощность нагрева ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), т.е. мощность, приходящаяся на единицу поверхности образца), энергия нагрева ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ), т.е. энергия, приходящаяся на единицу поверхности образца;
- размеры и форма зоны нагрева;
- спектр излучения.

Для импульсных источников нагрева (лампы-вспышки, лазеры) основным параметром является энергия нагрева, для других источников нагрева (электрические лампы, ИК лампы, тепловые пушки, энергия солнечного излучения и др.) паспортной характеристикой является мощность нагрева [5, 8].

Вследствие эффектов отражения и поглощения в материале объекта контроля, а также в окружающей среде, не вся энергия ИТН поглощается объектом контроля и участвует в создании температурных аномалий над дефектами. В частности, нагрев оптическим излучением видимого диапазона может сопровождаться значительными отражениями от поверхности контролируемого изделия. Более эффективен нагрев собственно тепловым излучением благодаря более высокому коэффициенту поглощения.

### **Типы ИТН**

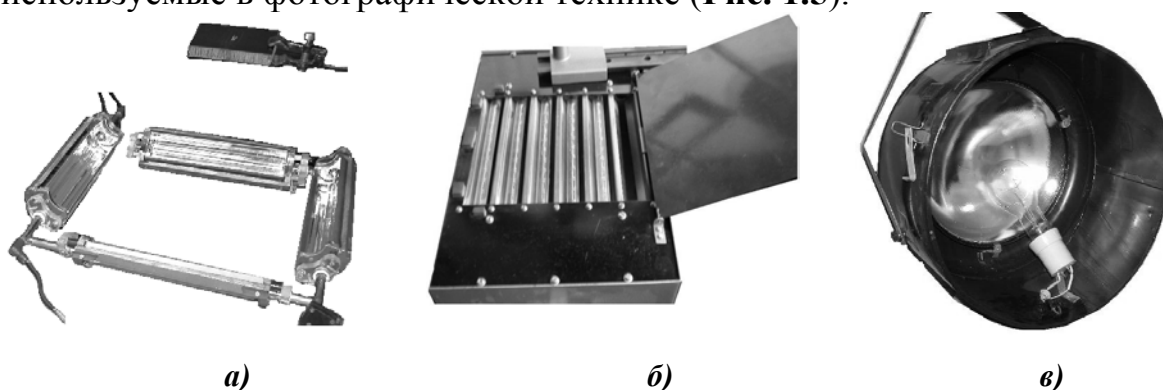
Тепловую стимуляцию (нагружение) объекта контроля можно производить путем нагрева или охлаждения, что с теплофизической точки зрения равноценно при одинаковой мощности теплового потока [5]. Однако, учитывая достижимые плотности тепловых потоков, фактор технологичности и возможные помехи, практически всегда применяют нагрев с помощью полей излучения или потоков газа и твердых частиц.

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

Наиболее просто можно нагреть поверхность объекта контроля с помощью электрических ламп накаливания. Достижимая плотность нагрева

может составлять до нескольких кВт/м<sup>2</sup> в зоне диаметром до 1 м при произвольной длительности нагрева. Такие лампы являются гибким и практичным средством «мягкого» нагрева неметаллов.

Для стимуляции металлов применяют галогенные лампы постоянного или импульсного действия, которые создают плотность энергии до 100 кВт/м<sup>2</sup> в течение времени от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Лазеры способны обеспечить практически любую плотность энергии, однако низкий к.п.д., большие габариты и стоимость ограничивают их применение в ТК лабораторными исследованиями. Лазеры также используют в технике «летающего пятна» для быстрого локального нагрева изделий, однако в этом случае снижается плотность поглощенной энергии. Поэтому, при контроле металлов наиболее эффективны мощные лампы-вспышки (flash tubes), используемые в фотографической технике (Рис. 1.5).



**Рис. 1.5. 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 0.2x0.2 м);*
- б - галогенные лампы (плотность энергии до 5 кВт м<sup>-2</sup>, длительность нагрева 5-50 с;  
неравномерность нагрева 25% в зоне 0.5x0.5 м);*
- в - лампа накаливания с рефлектором (плотность энергии до 2 кВт м<sup>-2</sup>,  
длительность нагрева 1-1000 с; неравномерность нагрева до 300% в зоне 0.5x0.5 м)*

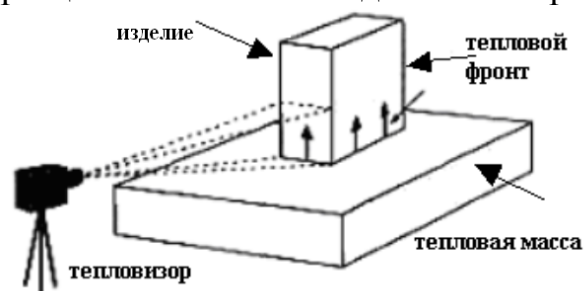
Конвекционный нагрев можно производить с помощью жидкости или газа. В частности, описан способ контроля внутренних полостей турбинных лопаток путем дозированного пропускания через них горячей (холодной) воды. Односторонний нагрев возможен с помощью потока горячего воздуха, направляемого на изделие с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

В ряде случаев, например, при обнаружении скрытых в грунте противопехотных мин, диагностике фасадных покрытий строительных сооружений и т.п., возможно использовать солнечное излучение, плотность мощности которого в средних широтах может достигать приблизительно 1 кВт/м<sup>2</sup> в безоблачный день.

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



Один из способов нагрева для определения поверхностных трещин в образце, представлен на **Рис. 1.6**. Способ основан на анализе прохождения теплового фронта вдоль поверхности исследуемого образца [7]. Стимуляция достигается соприкосновением образца с массивной подложкой, нагретой до определенной температуры (тепловая масса). Поверхностные трещины изменяют форму теплового фронта, что регистрируется с помощью тепловизора. Аналогичная тепловая стимуляция может быть достигнута погружением части образца в емкость с холодной или горячей водой.



*Рис. 1.6. Обнаружение поверхностных трещин*

### **Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева**

Один из видов классификаций моделей активного ТК связан с типами и сочетанием, нагревателя и регистратора (см. **Рис. 1.7**) [5]. При поточечном сканировании изделие нагревают в малой зоне, а температуру регистрируют с некоторым запаздыванием, величина которого зависит от глубины залегания дефектов. Поточечное сканирование обеспечивает максимальные температурные контрасты над внутренними дефектами, если речь идет о внешнем нагреве, и пригодно для обнаружения трещин, расположенных перпендикулярно поверхности изделия. Основным недостатком данного способа является низкая производительность испытаний. Компромиссным вариантом между поточечным сканированием и тепловизионным способом ТК является строчное сканирование: изделие нагревают в узкой длинной полосе, а температуру регистрируют с помощью строчно-сканирующего пирометра. Проблема равномерности нагрева здесь решается проще, чем при площадочном нагреве, а производительность испытаний выше, чем при поточечном сканировании, в  $N$  раз, где  $N$  – число элементов строки. Ввиду того, что и в этом случае зона нагрева перемещается по поверхности изделия, строчное сканирование пригодно для обнаружения трещин, расположенных параллельно полосе нагрева. Тепловизионный способ ТК предусматривает распределенный нагрев изделия (от одной зоны к другой) при регистрации температуры с помощью тепловизора. В последние годы этот способ является наиболее популярным благодаря появлению на рынке нового поколения тепловизоров и мощных нагревателей, а также созданию эффективных алгоритмов обработки тепловых изображений.



**Рис. 1.7. Процедуры ТК в зависимости от вида зоны контроля и нагрева:**  
 а – поточечное сканирование,  
 б – строчное сканирование,  
 в – тепловизионный способ

### **Типы дефектов, обнаруживаемых в тепловом контроле**

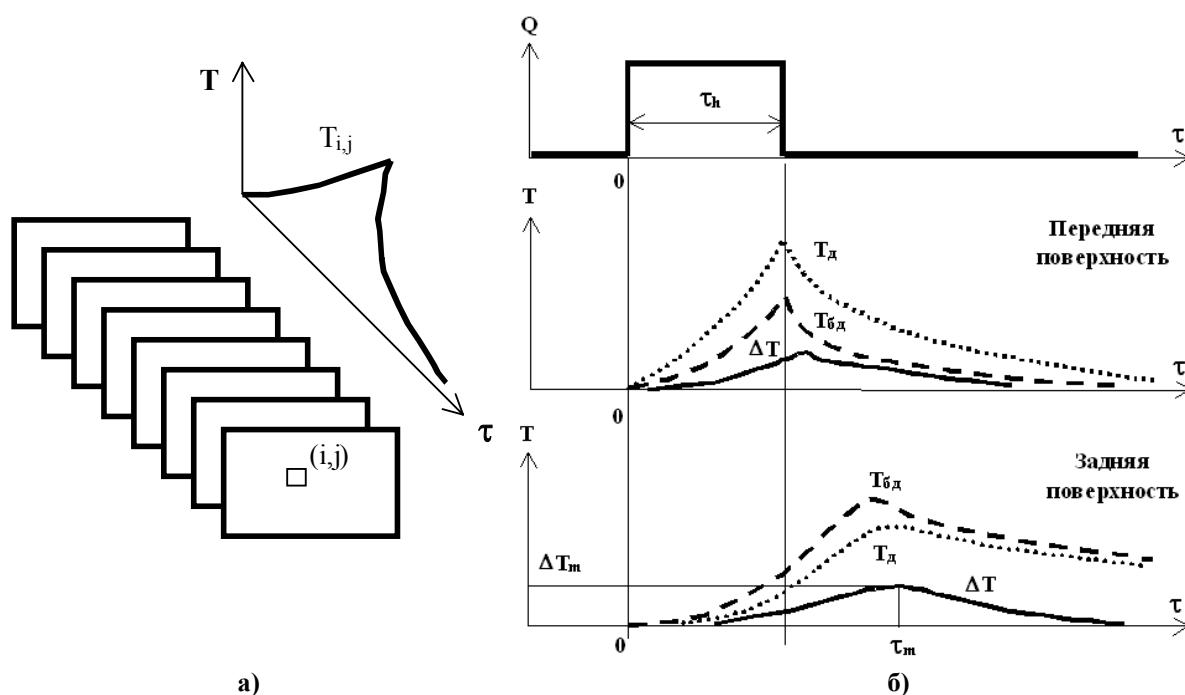
В зависимости от типа конструкции и материала изделия можно выделить несколько типов дефектов, которые обнаруживаются с помощью ТК [7]:

- расслоения между отдельными структурными частями образца;
- непрочности;
- плохой тепловой контакт между слоями («целующиеся» дефекты) ;
- пустоты, трещины, поры, инородные включения;
- коррозионный унос материала;
- нарушения матрицы в композитах;
- влага;
- локальные изменения теплофизических и других (связанных с теплофизическими) характеристик материала;
- изменения геометрии изделия;
- примеси.

При сравнении металлов и неметаллов, следует заметить, что структурные дефекты в металлах создают значительные температурные сигналы, которые существуют в течение коротких интервалов времени. Соответственно, в неметаллах, скрытые дефекты характеризуются небольшими амплитудами сигналов, но время наблюдения достаточно велико. Кроме того, металлические поверхности вносят существенные поверхностные помехи (например, в виде отраженного излучения), и контроль таких поверхностей требует применения специальных покрытий, наносимых на поверхность для увеличения излучательной способности поверхности. В общем случае неметаллические поверхности можно рассматривать как более пригодными для ТК, однако прогресс компьютерной техники, развитие методов численного моделирования и цифровой обработки результатов измерений, а также улучшение технических характеристик ИК техники делают ТК целесообразным и при испытаниях металлов.

## Базовые процедуры активного ТК

Большинство существующих процедур активного ТК могут быть классифицированы как разновидности импульсного ТК (pulsed thermal NDT), который предусматривает нагрев изделия импульсом тепловой энергии определенной длительности и регистрацию температуры на передней, задней или боковой поверхности изделия как во время действия импульса, т.е. на стадии нагрева, так и после его окончания, т.е. на стадии охлаждения. Отличия могут быть связаны либо с физической реализацией нагрева, либо с особенностями обработки температурной информации, причем наибольшее число процедур ТК связано с тем, как количественная или качественная информация о скрытых дефектах извлекается из *базовой температурной функции*  $T(x, y, \tau)$ , описывающей изменение избыточной температуры изделия во времени для каждой точки изделия  $(x, y)$ . В процедурах тепловизионного ТК эта функция определена для *последовательности записанных термограмм* (Рис. 1.8) и привязана к пикселям изображения:  $T(i, j, \tau)$  [5].



**Рисунок 1.8. Базовые температурные функции активного теплового контроля:**  
а-формирование последовательности термограмм и функции  $T(i, j, \tau)$  ;  
б-импульс нагрева и формирование температурного сигнала  $\Delta T$

Типичный вид функций  $T(i, j, \tau)$  показан на Рис. 1.8 для дефектной (д) и бездефектной (бд) области. На передней поверхности в ходе нагрева *избыточная* температура изделия  $T$  растет от нулевого значения и достигает максимума в конце теплового импульса длительностью  $\tau_h$ . На задней поверхности максимум избыточной температуры наблюдается со сдвигом относительно конца нагрева. Величина этого сдвига возрастает с увеличением толщины изделия и снижением его теплопроводности. На стадии охлаждения вследствие теплообмена с окружающей средой

температура спадает до температуры среды (или до нуля, если речь идет только об избыточных температурах нагрева).

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

В процессе динамического нагрева/охлаждения температурный сигнал от внутреннего дефекта достигает максимального значения  $\Delta T_m$  в момент времени  $\tau_m$ . Известно, что наибольшая статистическая достоверность НРК обеспечивается при максимально возможном отношении сигнал/шум. В динамических испытаниях это достигается в оптимальный момент наблюдения (optimum observation time). В первом приближении, можно считать, что  $\tau_m(\Delta T_m)$  и есть оптимальный момент наблюдения. 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 длительном нагреве оптимальный момент регистрации может наступить в ходе нагрева, что используется в методе «ИК радиометрии с временным разрешением» (Temperature-Resolved Infrared Radiometry, TRIR).

На первый взгляд парадоксально выглядит метод «раннего обнаружения сигнала» (early detection), согласно которому температурный сигнал регистрируют на ранних стадиях теплового процесса, т.е. при  $\tau < \tau_m$ . Очевидно, что при этом отношение сигнал/шум невелико и, следовательно, возможно обнаружить только относительно большие дефекты. Тем не менее, 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 ультразвуковом НРК.

Иногда используют *усреднение*  $N$  термограмм в течение отрезка 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) замещают или дополняют обработкой во временной (фазовой) области (time domain, phase domain), чем обеспечивают бóльшие значения отношения сигнал/шум. Разновидностями такого подхода являются метод *динамической тепловой томографии* (dynamic thermal tomography), основанный на использовании двух специфических параметров ( $\Delta T_m$  и  $\tau_m$ ), а также методы *импульсной фазовой термографии* (pulse phase thermography) с использованием преобразования Фурье (Fourier transformation) или вейвлет-функций (wavelet functions).

## Глава 2. Теплопередача и моделирование задач теплопроводности

### Механизмы теплопередачи

Различают три механизма теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение [5, 9, 10, 11].

**Теплопроводность (conduction):** процесс распространения тепла вследствие теплового движения структурных частиц вещества (молекул, атомов, свободных электронов). В чистом виде теплопроводность имеет место в твердых телах и в весьма тонких неподвижных слоях жидкости или газа. Данный тип теплопередачи может быть проиллюстрирован на примере того, как мы чувствуем тепло при прикосновении пальцем к радиатору отопления. Данный процесс теплопередачи медленнее, чем процессы конвекции и излучения.

Плотность теплового потока  $Q$  в твердом теле между точками с различной температурой  $T_1$  и  $T_2$  подчиняется закону Фурье:

$$\begin{aligned} Q &= -\lambda (T_2 - T_1) / \Delta x \quad (\text{в интегральном выражении}); \\ Q &= -\lambda (\partial T / \partial x) \quad (\text{в дифференциальном выражении}), \end{aligned} \quad (2.1)$$

из чего следует, что такая характеристика твердого тела как *коэффициент теплопроводности*  $\lambda$  [ $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$ ] определяет плотность теплового потока [ $\text{Вт м}^{-2}$ ] в твердом теле при градиенте температуры, равном  $1^\circ\text{C}$  и характеризует режим *стационарного* теплообмена, поскольку в размерности этой величины отсутствует время.

**Конвекция (convection):** Процесс распространения тепла в результате теплопроводности и непосредственного перемещения молярных (т.е. состоящих из большого количества молекул) частей среды из одной области пространства в другую. Означает перемешивание теплых и холодных слоев газа или жидкости, что происходит, например, при омывании поверхности тела движущимся газом или жидкостью. Конвективный перенос тепла имеет место в движущихся жидкостях, газах, сыпучих телах.

Охлаждение (отвод тепла) поверхности тела газом или жидкостью описывается законом Ньютона:

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

где  $\alpha_{cv}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи [ $\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$ ], называемый в общем случае коэффициентом теплообмена;  $T_s$  и  $T_{amb}$  – 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 (геометрию). Отсутствие такого взаимодействия ( $\alpha_{cv} = 0$ ) означает *адиабатические* граничные условия. В ТК адиабатические условия возникают при испытаниях металлов и тонких неметаллов, в особенности, при малых временах контроля.

**Излучение (radiation)** есть поток квантов электромагнитного излучения, которое испускается всеми физическими телами с температурой выше абсолютного нуля (0 К). Процесс передачи тепла от одного тела к другому происходит путем электромагнитных колебаний через промежуточную прозрачную для теплового излучения среду. В этом процессе часть внутренней энергии излучающего тела превращается в лучистую энергию, распространяющуюся через электромагнитное поле и вновь трансформирующуюся в энергию теплового движения структурных частиц при падении на второе (облучаемое) тело. Излучение – это процесс, который имеет место и в вакууме (например, таким способом земная поверхность получает солнечную энергию).

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

$$Q_{12} = \sigma F_g F_\varepsilon (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.3)$$

где  $Q_{12}$  – плотность результирующего теплового потока между телами [ $\text{Вт м}^{-2}$ ],  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^4$ ),  $F_g$  – геометрический фактор,  $F_\varepsilon$  – приведенный коэффициент излучения.

Теплообмен между теплым объектом ( $T_s$ ) и холодной окружающей средой ( $T_{amb}$ ) происходит как путем конвекции, так и излучения:  $Q = Q_{cv} + Q_{rd} = \alpha_{cv}(T_s - T_{amb}) + \sigma G(\varepsilon \cdot T_s^4 - \varepsilon_{amb} \cdot T_{amb}^4)$ . В ТК разница температур  $T_s - T_{amb}$  обычно мала, а объекты имеют высокий коэффициент излучения ( $\varepsilon \cong 1$ ). Поэтому вводят *комбинированный коэффициент теплообмена с окружающей средой*:

$$\alpha = \alpha_{cv} + \alpha_{rd}, \quad Q = \alpha(T_s - T_{amb}), \quad (2.4)$$

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

Таблица 2.1

Рекомендуемые значения комбинированного коэффициента теплообмена [5] ( $\varepsilon = 0.9; T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$T_s - T_a, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_{cv}, \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$	$\alpha_{rd}, \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$	$\alpha, \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$
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

## **Адиабатический и неадиабатический теплообмен**

В активных процедурах ТК мощность потока нагрева может значительно превышать мощность встречного потока теплоотдачи за счет конвекции и излучения (например при ТК металлических поверхностей). В этом случае теплообмен становится адиабатическим и соответствующие решения теории теплопроводности имеют наиболее простой вид.

Неадиабатический теплообмен включает все три механизма, описанные выше. Наиболее трудно поддается оценке конвективная компонента теплообмена со средой, поэтому решение обратных задач тепловизионной диагностики затруднительно при интерпретации данных, полученных путем съемки при трудноконтролируемых условиях внешней среды.

## **Теплопередача в тонких газовых промежутках**

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

$$Gr \cdot Pr < 1000. \quad (2.5)$$

Проверка данного условия для разницы температур  $T_1 - T_2 < 100$  °C приводит к следующему условию для максимальной толщины дефекта  $d$ :  $d < 6$  мм, что, как правило, выполняется в ТК.

Радиационный поток в тонких дефектах описывается приближенным выражением:

$$Q_{rd} \approx 4\sigma \cdot T^3 \cdot (T_1 - T_2), \quad T = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.6)$$

Отношение тепловых потоков, обусловленных конвекцией и излучением:

$$\frac{Q_{cv}}{Q_{rd}} \approx \frac{K}{4d\sigma T^3}. \quad (2.7)$$

Для воздушных дефектов ( $\lambda = 0.07$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $T = 330$  К (57 °C)),  $\frac{Q_{cv}}{Q_{rd}} > 17$  для  $d < 0.5$  мм. Таким образом, можно считать, что теплопередача в тонких газовых дефектах осуществляется путем чистой теплопроводности.

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

## **Дифференциальное уравнение теплопроводности**

Дифференциальное уравнение теплопроводности относится к дифференциальным уравнениям в частных производных параболического типа. Нестационарное распределение температуры в анизотропном твердом



теле с внутренними источниками тепла описывается дифференциальным уравнением *параболического* типа:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + w(x, y, z) = C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.8)$$

где  $w(x, y, z)$  – удельная мощность внутренних источников тепла ( $\text{Вт м}^{-3}$ ),  $C$  и  $\rho$  – соответственно *теплоемкость* ( $\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$ ) и *плотность* ( $\text{кг м}^{-3}$ ) материала. Уравнение (2.8) отражает принцип сохранения энергии в среде, где тепло генерируется и распространяется путем диффузии.

Анизотропный характер диффузии тепла в уравнении (2.8) выражен коэффициентами теплопроводности  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ . В случае изотропного материала:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.9)$$

где  $a = \lambda / (C\rho)$  – коэффициент температуропроводности ( $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$ ).

Для цилиндрической и сферической систем координат, когда температурное поле не зависит от углов  $\Theta$  и  $\varphi$ , уравнение теплопроводности с переменной теплопроводностью  $\lambda(r, \tau)$  и объемной плотностью теплового потока внутренних источников теплоты  $q_v(r, \tau)$  можно записать в виде [12]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^\nu} \frac{\partial}{\partial r} (r^\nu \lambda(r, \tau) \frac{\partial T}{\partial r}) + q_v(r, \tau), \quad \text{где } \nu = 0, 1, 2 \quad (2.10)$$

соответственно для задач в прямоугольных, цилиндрических и сферических координатах.

В большинстве задач активного ТК внутренние источники тепла отсутствуют ( $w=0$ ), что приводит к общеизвестной форме уравнения (2.9):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.11)$$

В стационарном режиме при наличии внутренних источников тепла:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w}{\lambda} = 0. \quad (2.12)$$

Стационарный режим без внутренних источников тепла описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2.13)$$

На поверхности адиабатического (абсолютно теплоизолированного) тела в стационарном режиме сигналы от скрытых дефектов полностью нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела. На практике эти сигналы сохраняются благодаря теплообмену тела с окружающей средой, но их амплитуда может быть в десятки раз меньше максимальной амплитуды соответствующих нестационарных сигналов, возникающих в *оптимальные моменты наблюдения*. Поэтому, для обнаружения скрытых дефектов в большинстве случаев используют процедуры активного (нестационарного, динамического) ТК. Соответственно, в теории ТК чаще всего анализируют уравнения типа (2.10 – 2.12).

## Теплофизические характеристики материалов

Основными ТФХ материалов являются коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкость  $C$  и плотность  $\rho$ . Как показано выше, коэффициент теплопроводности определяет величину теплового потока, распространяющегося в теле при стационарном теплообмене.

Динамическими ТФХ являются коэффициент температуропроводности  $a = \lambda / C\rho$ , выражаемый в  $\text{м}^2/\text{с}$ , и коэффициент тепловой активности, или тепловая инерция  $e = \sqrt{\lambda C\rho}$ , выражаемый в  $\text{Вт}\cdot\text{с}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Коэффициент температуропроводности является показателем диффузии внутренней энергии в материале; его величина пропорциональна скорости распространения изотермической поверхности [5]. Как правило, более теплопроводные материалы характеризуются большими значениями  $a$ . Тепловая инерция характеризует тепловое согласование двух сред (1 и 2) и определяет, например, коэффициент отражения тепловой волны  $\Gamma$  (рассматривается в теории тепловых волн) [13]:

$$\Gamma = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}, \quad (2.14)$$

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

Еще одной динамической характеристикой теплопроводности в твердом теле является длина тепловой диффузии  $\mu$  (м):

$$\mu = \sqrt{a / \pi f}, \quad (2.15)$$

которая связана с частотой гармонического потока нагрева  $f$  (Гц).

В Таблице 2.2 приведены ТФХ ряда материалов. Следует также учитывать то, что для некоторых материалов существует сильная зависимость ТФХ от температуры, поэтому основное уравнение теплопередачи становится нелинейным.

## ТФХ некоторых материалов

Материал	Плотность $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельная теплоемкость $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$	Теплопро- водность $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$	Температуро- проводность $* 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Тепловая инерция $\frac{\text{Вт с}^{\frac{1}{2}}}{\text{м}^2 \text{ К}}$
Вода	1000	4193	0,586	0,14	1570
Воздух (тонкие промежутки)	1,2	1005	0,07	58,0	9,19
Дюралюминий 2024 –Т6	19300	875	177	73,0	54673
Кирпич	1800	879	0,755	0,505	1093
Лед	900	2100	2,25	1,08	2062
Стеклопластик	1900	1200	0,3 $\perp$ 0,38 $\parallel$	0,13 0,17	827,0 930,8
Углепластик	1600	1200	0,8 $\perp$ 7 $\parallel$	0,42 3,7	1239,4 3666,1
Уран	18700	120	27	12	7783,8
Цемент	2400	800	1	0,53	1385,6
Эпоксидная смола	1300	1700	0,2	0,09	664,8

$\perp$  - перпендикулярно волокон

$\parallel$  - параллельно волокон

Низкие значения тепловой инерции приводят к значительным температурным сигналам на поверхности. Обычно материалы с высокой теплопроводностью имеют высокую тепловую инерцию, но существуют исключения из этого правила, например, воздух. Вода обладает наибольшей теплоемкостью и имеет достаточно низкое значение тепловой инерции, что приводит к значительным температурным сигналам над областями с водой. При рассмотрении процессов фазовых переходов следует учитывать высокую теплоту плавления льда ( $340000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ), которая обуславливает значительные задержки в развитии температуры над зонами с водой/льдом. Различия в теплопроводности и температуропроводности льда и воды также приводят к тому, что нагрев льда происходит значительно быстрее, чем нагрев воды. Для более точного рассмотрения процессов необходимо численное моделирование процессов теплопередачи, включая фазовые превращения.

## **Дополнительные условия для решения уравнения теплопередачи**

Дифференциальное уравнение теплопроводности в общем случае имеет бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выбрать решение, характеризующее конкретный рассматриваемый процесс, и дать полное математическое описание процесса, необходимо к основному дифференциальному уравнению присоединить дополнительные условия, включающие геометрические, физические и краевые условия [12].

**Геометрические условия** определяют форму и линейные размеры тела.

**Физические условия** определяют ТФХ:  $\lambda$  – теплопроводность,  $\rho$  – плотность тела,  $c$  – удельную теплоемкость тела,  $q_v$  – объемную плотность теплового потока.

**Краевыми условиями** называют совокупность начального и граничных условий. Начальные условия задаются при изучении нестационарных процессов и состоят в задании температуры внутри тела в момент времени, выбранный в качестве начального. Граничные условия отображают условия теплового взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела.

Граничные условия для изучаемой задачи могут быть заданы несколькими способами; в теории теплопроводности различают граничные условия 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и др. родов.

**Граничные условия 1-го рода** задают распределение температуры на поверхности  $S$  тела как функцию координат и времени:

$$T_s = \varphi(x, y, z, \tau), \quad x, y, z \in S. \quad (2.16)$$

К граничным условиям 1-го рода относят задачи разогрева и охлаждения системы при заданном изменении температуры на границе или при весьма интенсивном теплообмене на поверхности, когда температура поверхности близка к температуре среды. Для процессов стационарной теплопроводности функция  $\varphi$  не зависит от времени (условие Дирихле).

**Граничные условия 2-го рода** задают распределение плотности теплового потока на поверхности тела как функцию координат и времени:

$$q_s = \psi(x, y, z, \tau), \quad x, y, z \in S. \quad (2.17)$$

Согласно закону Фурье, данное условие записывают в виде:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \psi(x, y, z, \tau), \quad x, y, z \in S, \quad (2.18)$$

где  $\bar{n}$  – внутренняя нормаль к поверхности  $S$ . В процессах стационарной теплопроводности функция  $\psi$  не зависит от времени (условие Неймана).

**Граничные условия 3-го рода** задают на поверхности тела зависимость плотности теплового потока вследствие теплопроводности со стороны тела от температур поверхности тела  $T_s$  и окружающей среды  $T_c$ .

В случае охлаждения (нагрева) тела имеем

$$q_s = \pm \alpha (T_s - T_c), \quad (2.19)$$

где  $\alpha$ , [Вт/(м<sup>2</sup> К)] – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи (теплообмена) и характеризующий

интенсивность теплового взаимодействия среды заданной температуры  $T_c$  с поверхностью тела. В нестационарных процессах температура окружающей среды в общем случае изменяется во времени. Данное уравнение выражает закон Ньютона. Плотность потока, подводимая (отводимая) за счет теплопроводности к (от) поверхности тела, определяется по закону Фурье, тогда:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_S = \pm \alpha (T_S - T_c), \quad (2.20)$$

где  $\bar{n}$  – внутренняя нормаль к поверхности  $S$ .

В отличие от  $\lambda$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  не является физической постоянной, характерной для того или иного вещества. В общем случае этот параметр отражает совместное действие конвекции, теплопроводности и излучения и зависит от многих факторов.

**Граничные условия 4-го рода** соответствуют теплообмену поверхности тела с окружающей средой (конвективный теплообмен тела с жидкостью) или теплообмену соприкасающихся твердых тел, когда температура соприкасающихся поверхностей одинакова. При этом задают условия равенства температуры и плотностей теплового потока на поверхности соприкосновения двух сред (или тел):

$$T_{1S} = T_{2S}; \quad (2.21)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial n} \right|_S = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial n} \right|_S, \quad (2.22)$$

где  $\frac{\partial}{\partial n}$  – означает дифференцирование вдоль нормали к поверхности раздела.

Равенство (2.21) выражает условие непрерывности температурного поля, а равенство (2.22) – закон сохранения энергии на поверхности соприкосновения двух сред. Условия (2.21) и (2.22) называют также условиями идеального теплового контакта.

**Другие виды граничных условий.** Кроме граничных условий, рассмотренных выше, возможны другие условия, связанные со специфическими физическими феноменами. Например, при наличии фазовых превращений (промерзания или плавления) на поверхности соприкосновения условие (2.22) заменяется следующим [14]:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial n} \right|_S - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial n} \right|_S = \rho q \frac{\partial S}{\partial \tau}, \quad (2.23)$$

где  $S$  – движущаяся граница раздела фаз (1 – твердая, 2 – жидкая);  $q$  – удельная теплота фазовых превращений;  $n$  – нормаль к поверхности  $S$ .

Если неизвестна зависимость  $S(x, y, z, \tau)$ , то условие (2.23) относит решаемую задачу к классу нелинейных задач и требует особых методов решения.

Возможно также задание условий **равенства нулю** теплового потока на границе (условие **тепловой изоляции**), что встречается при моделировании массивных тел (например, некоторого объема грунта).

## **Прямые и обратные задачи ТК**

При известной математической модели процесса теплопроводности необходимо выяснить, какие величины и зависимости, входящие в описание, известны, а какие необходимо определить. В зависимости от этого возникающие задачи можно разделить на два вида [5].

**Прямая задача.** Требуется определить температурное поле, если известно дифференциальное уравнение исследуемого процесса, и заданы дополнительные условия, полностью определяющие соответствующую краевую задачу.

**Обратная задача.** Требуется определить граничные условия или коэффициенты, входящие в основное дифференциальное уравнение, если имеется математическое описание процесса и задано теоретически или экспериментально температурное поле, в частности, на поверхности исследуемого объекта.

Обычно решение обратных задач базируется на решении прямых задач, а для поиска оптимальных результатов используются методы минимизации ошибок (симплекс-метод и т.д.). Решение обратных задач сопряжено с большими трудностями, чем решение прямых задач.

Краевые задачи подразделяют на *линейные* и *нелинейные*. Уравнение называется линейным, если оно линейно относительно неизвестной функции (температура) и ее производных. Если в математическом описании задачи хотя бы одно уравнение нелинейно, то и вся краевая задача является нелинейной.

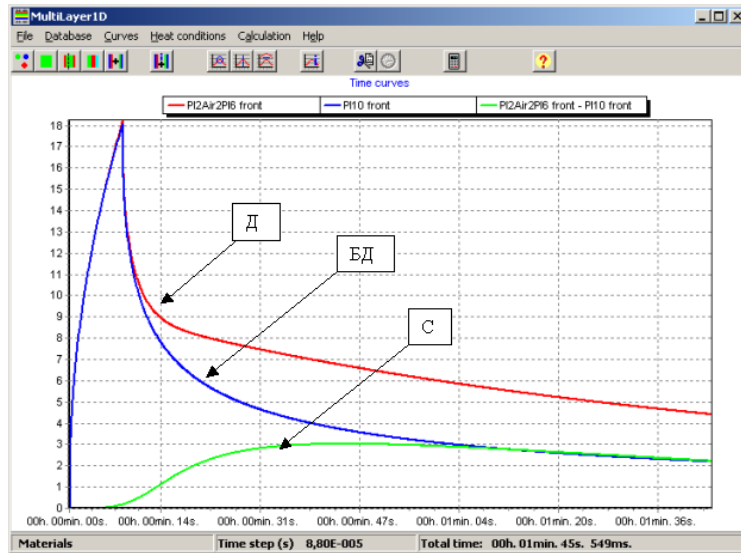
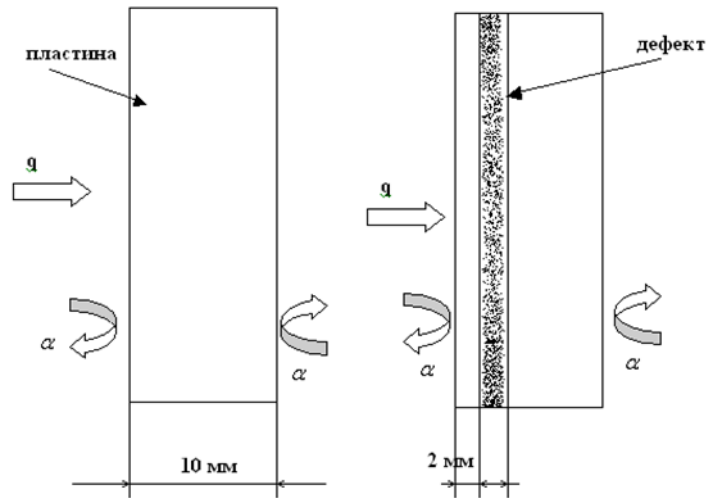
## **Моделирование задач теплопередачи**

**Одномерные системы** представляют собой наиболее простые случаи распространения теплового потока только в одном направлении. К этой категории относится ряд важных практических задач, например, теплопередача через пластину, через стенку трубы с изоляцией и многие другие. В ТК одномерные классические решения позволяют оценить глубину залегания и толщину дефектов, но не их поперечные размеры. Таким образом, с точки зрения ТК, основным отличием многомерных задач от одномерных является возможность учитывать диффузию тепла в материале объекта контроля вокруг дефектов конечных размеров.

Одномерные, в том числе многослойные, задачи решают аналитически с использованием *операционного метода*, *метода «термического четырехполюсника»* или *функций Грина*, а также и *численными* методами, тогда как для многомерных моделей наиболее пригодны исключительно численные методы.

В качестве примера использования одномерного моделирования приведем пример численного моделирования воздушного дефекта внутри пластины из пластика в программе MultiLayer1D. Представленный ниже **Рис. 2.1** иллюстрирует процесс получения температурного сигнала (С) из двух кривых – графика развития температуры для дефектной структуры (Д) и

графика развития температуры для бездефектной структуры (БД) для левой поверхности структуры при одномерном моделировании.



**Рис. 2.1. Результаты одномерного численного моделирования в программе MultiLayer1D**

(пластик:  $\lambda = 0.35 \text{ Вт/(м*К)}$ ,  $a = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , воздух:  $\lambda = 0.07 \text{ Вт/(м*К)}$ ,  $a = 5.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $q = 5000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ )

Основное уравнение теплопередачи в одномерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ для декартовой системы координат}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \text{ для цилиндрической системы координат}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \text{ для сферической системы координат}$$

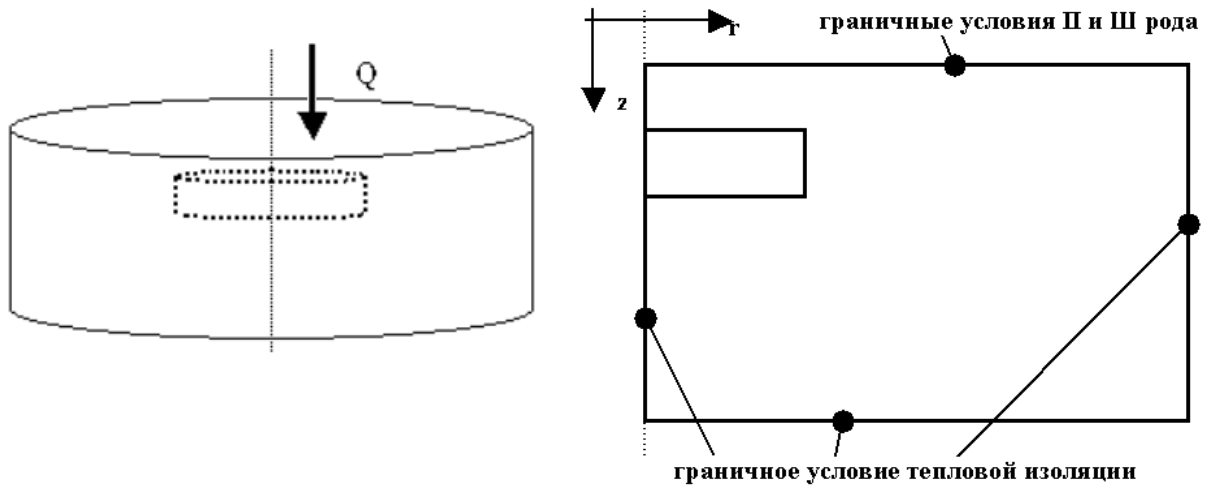
**Двухмерные системы.** В этих случаях температура и тепловой поток изменяются в двух направлениях.

Основное уравнение теплопередачи имеет вид:

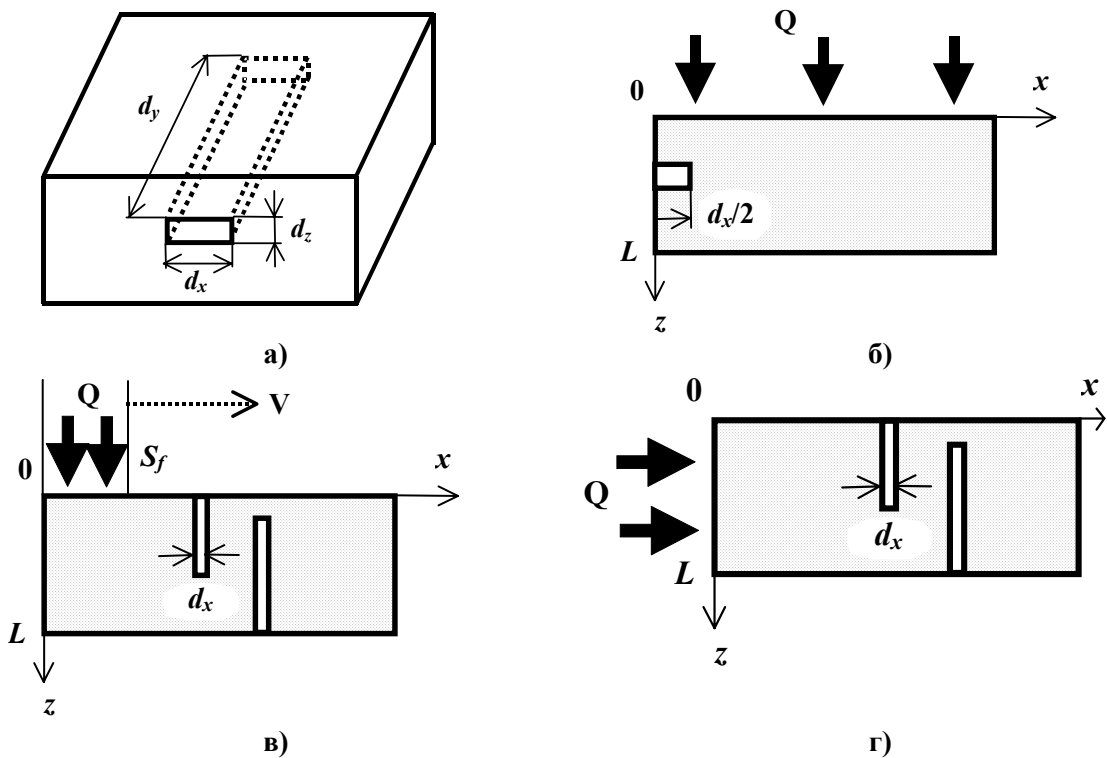
$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \text{ для декартовой системы координат}$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_r \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \text{ для цилиндрической системы координат}$$

Дефекты конечных размеров могут моделироваться в цилиндрической системе координат в виде дисков. На **Рис. 2.2** представлена модель обнаружения противопехотных мин при нагреве земной поверхности солнечным излучением. В двухмерной декартовой системе координат моделируются дефекты в виде каналов, пазов, проточек и т.п. (см. **Рис. 2.3**).



**Рис. 2.2.** Моделирование обнаружения противопехотных мин в двумерной цилиндрической системе координат



**Рис. 2.3.** Двухмерная декартова модель ТК:

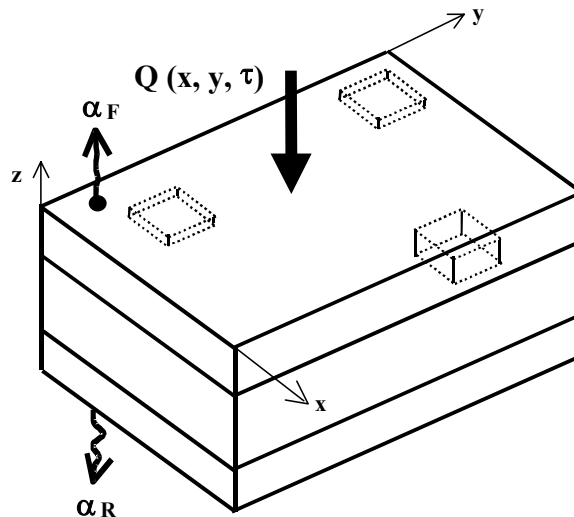
- а - изделие с дефектом типа «канал»;
- б - модель с равномерным поверхностным нагревом;
- в - модель с локализованным поверхностным нагревом;
- г - модель с боковым нагревом



При равномерном поверхностном нагреве изделия с одиночным дефектом (см. **Рис. 2.3. а**), в силу симметрии задачи по координате  $x$ , можно использовать только половину дефекта, причем на границе  $\{x = 0, z = 0 \div L\}$  будет иметь место условие симметрии (или тепловой изоляции)  $\partial T / \partial x = 0$  (см. **Рис. 2.3. б**).

Узкие подповерхностные трещины, расположенные перпендикулярно передней поверхности, практически не обнаруживаются при равномерном нагреве (поверхностные дефекты могут быть видны на мониторе тепловизора из-за чисто радиационного феномена: трещина выступает в качестве имитатора «черного тела» с повышенным коэффициентом излучения). Такие дефекты можно выявить, если в изделии создан тепловой поток, распространяющийся параллельно передней поверхности. Для этого изделие следует нагревать на поверхности в локальной зоне размером  $S_f$ , которая может быть неподвижной или перемещающейся со скоростью  $V$  (**Рис. 2.3. в**). В ряде случаев можно нагревать торец изделия и отслеживать динамику распространения температурной волны (**Рис. 2.3. г**).

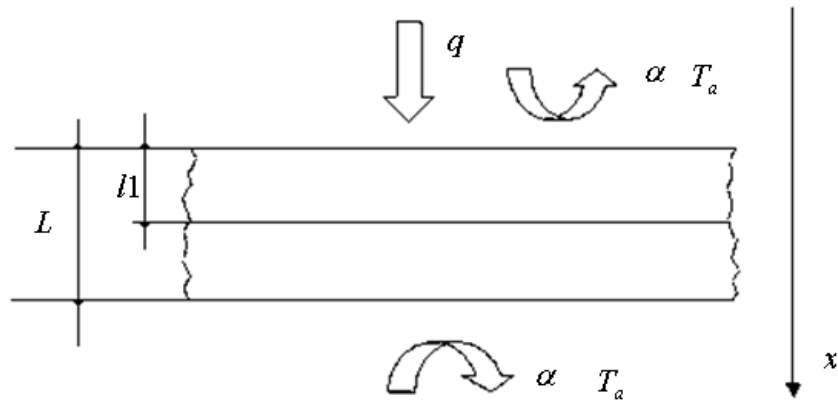
**Трехмерные системы** учитывают изменение температуры и тепловых потоков в 3-х направлениях. Дефекты любого типа в объектах произвольной геометрической формы целесообразно описывать в трехмерной декартовой системе координат. На практике приемлемой является модель, в которой в изделии, имеющем форму многослойного параллелепипеда, содержатся дефекты в форме параллелепипеда (**Рис. 2.4.**).



*Рис. 2.4. Трехмерная декартова модель ТК многослойного параллелепипеда*

### **Постановка задач теплопередачи**

Рассмотрим теплопроводность в двухслойной пластине (**Рис. 2.5**) в декартовой системе координат, нагреваемой с одной стороны тепловым потоком  $q$  и находящейся в среде с температурой  $T_a$ . При постановке задачи следует учитывать направления тепловых потоков, так как тепловой поток является величиной векторной [12].



**Рис. 2.5.** Двухслойная пластина в одномерной декартовой системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.24)$$

$$T(t=0, x) = T_0 \quad (2.25)$$

$$q - \alpha(T(t,0) - T_a) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.26)$$

$$\alpha(T(t,L) - T_a) = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.27)$$

$$T_1(x=l) = T_2(x=l) \quad (2.28)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} (x=l) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} (x=l) \quad (2.29)$$

Выражения (2.24) являются основными уравнениями теплопроводности для одномерной декартовой системы координат для 1 и 2 слоя соответственно;

Выражение (2.25) является начальным условием, характеризующим распределение температуры в пластине в начальный момент времени ( $t=0$ );

Выражение (2.26) отражает граничные условия 2-го и 3-го типов для верхней поверхности пластины (воздействие теплового потока  $q$  и внешней среды с температурой  $T_a$  и коэффициентом теплообмена  $\alpha$ );

Выражение (2.27) отражает граничные условия 3 типа для нижней поверхности пластины;

Выражения (2.28) и (2.29) отражает непрерывность температуры и теплового потока на границе между внутренними слоями пластины соответственно.

### **Классические решения теории теплопроводности**

В Таблице 2.3 и 2.4 приведены аналитические решения для нагрева полубесконечного тела и пластины [5, 8]. В таблицах также представлены выражения, которые могут быть использованы для вычисления функций

чувствительности. В представленных решениях используются следующие обозначения:  $h$  – коэффициент поверхностного теплообмена,  $L$  – толщина пластины,  $K$  – теплопроводность материала. Индексы «F» и «R» используется для обозначения передней (front) и задней (rear) сторон пластины относительно действия теплового возбуждения.

Используются 3 вида функций нагрева. Особенностью аналитических решений является то, что в них применяются следующие безразмерные комбинации теплофизических и геометрических параметров:

- критерий Био  $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$ , характеризующий обобщенную толщину изделия, а также являющийся мерой отношения молекулярного и конвективного переносов тепла в тепловом потоке;
- число подобия Фурье  $Fo = \frac{a \tau}{L^2}$ , характеризующее обобщенное время, а также связь между скоростью изменения температурного поля, физическими характеристиками и размерами тела.

Использование безразмерных критериев позволяет распространить конкретное решение на бесконечное множество комбинаций ТФХ, размеров объектов контроля и параметров нагрева.

В зависимости от характера взаимодействия с окружающей средой решения задачи теплопередачи подразделяют на адиабатические и неадиабатические. Как можно видеть, «адиабатические» решения существенно проще, чем «неадиабатические» (в последних присутствует критерий Био).

## Таблица 2.3

## Таблица 2.4

**Таблица 2.4 (продолжение)**

**Таблица 2.4 (продолжение)**

Виды функций нагрева представлены на Рис. 2.6.

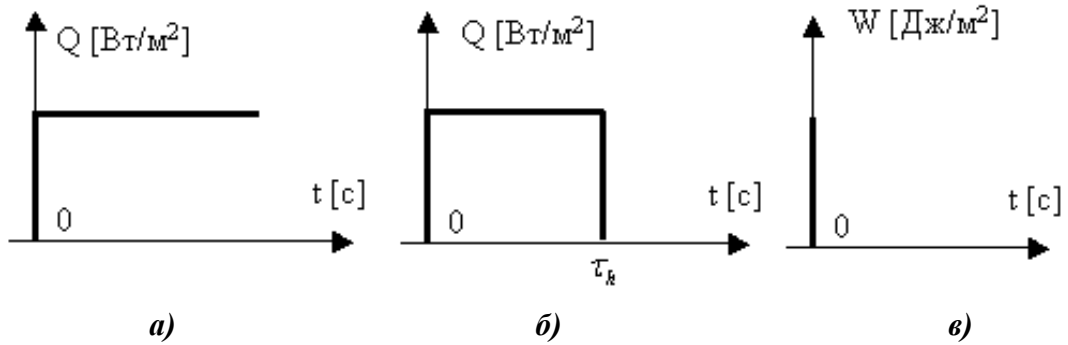


Рис. 2.6. Виды функций нагрева

- а) единичная функция
- б) импульс конечной длительности
- в) импульс бесконечно малой длительности

Решения для пластины содержат бесконечные ряды, однако на практике обычно используют от 3 до 50 членов ряда. Необходимое число членов ряда возрастает с уменьшением времени теплового процесса.

Неадиабатические» решения для пластины содержат корни  $\mu_n$  трансцендентного характеристического уравнения  $\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = Bi$ . Обычно для сходимости решения достаточно около 10-ти значений таких корней.

Решения для нагрева импульсом конечной длительности  $f_{pulse}$  получаются с использованием принципа суперпозиции в виде **разности** двух решений при нагреве единичной функцией  $f_{step}$  для моментов времени  $\tau \in [\tau_h, \infty)$ . На промежутке времени  $\tau \in [0, \tau_h]$  решение для нагрева импульсом конечной длительности соответствует решению при нагреве единичной функцией.

$$f_{pulse}(\tau) = f_{step}(\tau), \tau \in [0, \tau_h]$$

$$f_{pulse}(\tau) = f_{step}(\tau) - f_{step}(\tau - \tau_h), \tau \in [\tau_h, \infty)$$

На Рис. 2.7 представлены графики для адиабатического ( $\alpha = 0$ ) и неадиабатического ( $\alpha = 10$ ) нагрева пластины из резины, толщиной 0.01 м ( $Bi = 0.17$ ) для передней и задней поверхности потоком  $Q = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\tau_h = 10 \text{ с}$ .

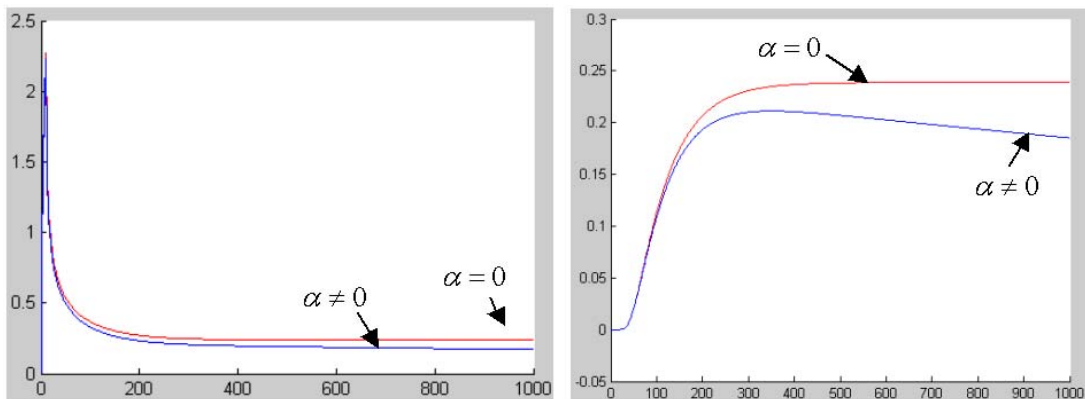


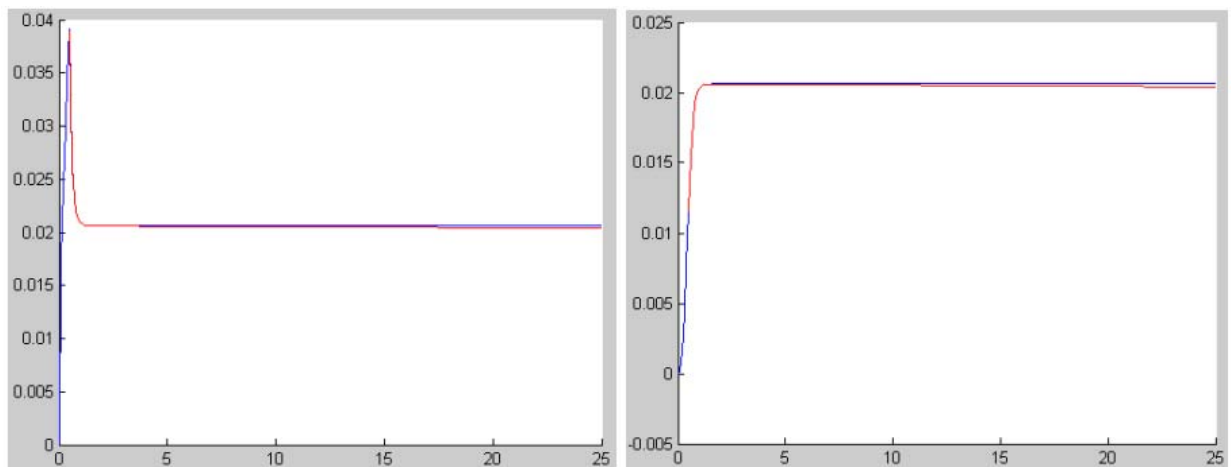
Рис. 2.7. Адиабатический и неадиабатический нагрев пластины

### Следствия из аналитических решений теории теплопроводности.

Для значений  $Bi < 0.1$  наблюдается следующая закономерность: нагрев пластины является адиабатическим и температура поверхности в течение



длительного времени сохраняет температуру близкую к адиабатическому стационарному значению (величина  $\frac{Qa\tau_h}{\lambda L}$  в случае нагрева импульсом конечной длительности и величина  $\frac{Wa}{\lambda L}$  в случае нагрева импульсом бесконечно малой длительности) [9]. Такие случаи характерны для высокотеплопроводных материалов и/или малых толщин пластины. На **Рис. 2.8** представлены графики адиабатического и неадиабатического нагрева для передней и задней поверхностей пластины из алюминия ( $a = 73 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $\lambda = 177 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ ,  $\alpha = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$ ,  $L = 0.01 \text{ м}$ ,  $Bi = 5.6 \cdot 10^{-4}$ ,  $\tau_h = 0.5 \text{ с}$ ,  $Q = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ).



**Рис. 2.8.** Адиабатический и неадиабатический нагрев пластины из алюминия (время нагрева 0,5 с)

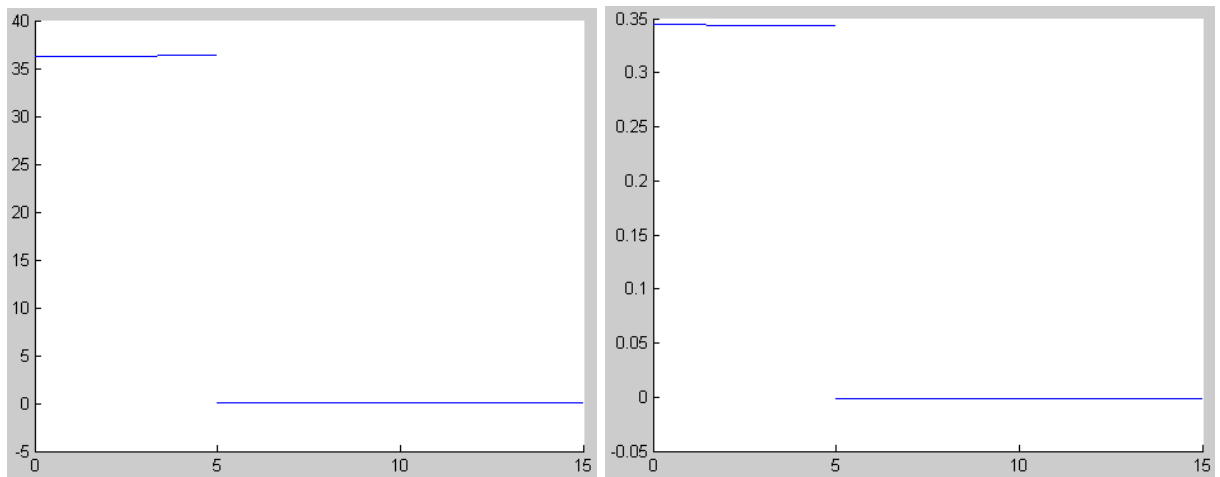
Увеличение времени нагрева до  $\tau_h = 2 \text{ с}$  в предыдущем случае приводит возрастанию различия между адиабатическими и неадиабатическими температурами, а также росту величины температуры.

Из аналитических решений также следует важный вывод о том, что температура тела любой формы прямо пропорциональна величине теплового потока, в результате чего возможен простой пересчет температурных значений для различных мощностей нагрева.

Для значений  $Bi > 100$  температура поверхности изделий практически равна температуре окружающей среды уже в начале теплового процесса [9].

На **Рис. 2.9** представлен случай нагрева пластины из резины ( $a = 5.88 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,

$\lambda = 0.13 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ ,  $\alpha = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$ ,  $L = 1.3 \text{ м}$ ,  $Bi = 100$ ,  $\tau_h = 5 \text{ с}$ ):



**Рис. 2.9. Неадиабатический нагрев пластины из резины ( $Bi = 100, \tau_h = 5$  с)**

Как можно видеть, графики развития температуры повторяют форму импульса нагрева, а значения температур можно легко посчитать используя закон охлаждения Ньютона (2.19).

**Избыточное значение температуры в конце нагрева.** Используя классические решения, нетрудно вычислить избыточную температуру в конце нагрева. Так при адиабатическом нагреве полубесконечного тела импульсом конечной длительности температура на поверхности пластины в конце нагрева определится из следующего соотношения:  $T = 2Q / \lambda \left(\frac{a \tau_h}{\pi}\right)^{1/2}$ .

### **Анализ классических решений теплопроводности**

**Определение тепловой инерции материала (передняя поверхность полуограниченного тела, нагреваемого импульсом Дирака).** Используя решение для полуограниченного тела, можно определить тепловую инерцию твердого тела как комплекс трех параметров ( $e = \sqrt{C\rho\lambda}$ ), при этом необходимо измерять *поглощенную* телом энергию, что на практике не всегда удается выполнить с необходимой точностью:  $e = \frac{W}{T(\tau) \sqrt{\pi\tau}}$ . Последнюю

трудность можно преодолеть, используя метод эталона:  $\frac{e}{e_{ref}} = \frac{T_{ref}(\tau)}{T(\tau)}$ , где

индекс *ref* относится к эталону.

**Определение температуропроводности (задняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемой импульсом Дирака).** В классической работе У. Паркера и соавторов [15] предложено измерять ТФХ, прежде всего, температуропроводность, используя решение для нестационарной температуры на задней поверхности адиабатической пластины, нагреваемой на передней поверхности коротким тепловым импульсом (импульсом Дирака):

$$\frac{T}{(Wa / \lambda L)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-n^2 \pi^2 Fo} \quad (2.30)$$

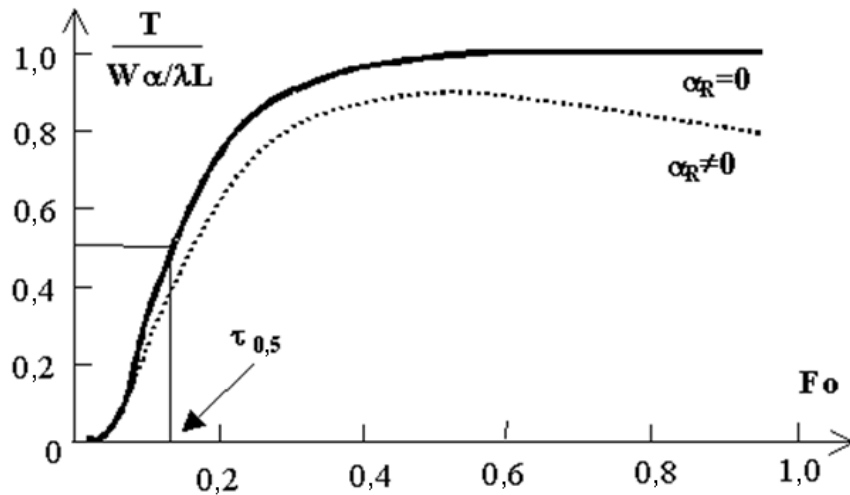


Рис. 2.10. Изменение температуры на задней поверхности пластины

График последней функции, показанный на Рис. 2.10, 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. 2.10). 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  $\tau_{m.d.}$ .

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

$a = Fo^* \frac{L^2}{\tau^*}$ , где коэффициент  $Fo^*$  легко определяется из уравнения (2.30). В частности,

$$Fo^* = 0.1388 \text{ для } \tau_{1/2};$$

$$Fo^* = 0.0918 \text{ для } \tau_{m.d.}.$$

Преимуществом использования характеристического времени  $\tau_{m.d.}$  является возможность определения температуропроводности в режиме реального времени, т.е. не дожидаясь времени наступления максимума температурной кривой, необходимого для вычисления  $\tau_{1/2}$ , а также 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 до сих пор наиболее применим метод Паркера с использованием характеристического времени  $\tau_{1/2}$ .

Метод Паркера, или импульсный метод (Parker's method, flash method), обладает высокой точностью, благодаря чему его используют в большинстве

исследований по анализу температуропроводности твердых тел. Существуют различные модификации метода, в которых точность измерений повышают за счет: 1) учета теплоотдачи на поверхностях объекта контроля, 2) более строгого обоснования выбора характеристического времени  $\tau^*$ , 3) учета конечных размеров объекта контроля и т.п.

Помимо коэффициента теплопроводности, 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:  $C = \lambda / (\rho a)$ .

Для определения температуропроводности в продольных направлениях предложен метод, основывающийся на применении пространственного преобразования Фурье и преобразования Лапласа к записанной последовательности термограмм [16].

**Определение толщины изделия (передняя поверхность адиабатической пластины, нагреваемая импульсом Дирака).** В последние годы проявился существенный интерес к определению остаточной толщины изделия, в частности, при оценке степени коррозии, путем анализа температурного отклика на передней поверхности. На практике, как правило, неизвестны как толщина  $L$ , так и температуропроводность изделия  $a$ , поэтому формула для адиабатического нагрева пластины неприменима. Базовая теория разработана для относительно тонких металлических пластин, нагрев которых в силу малых значений критерия Био ( $Bi < 0.1$ ) является адиабатическим [5]. Однородные области большой протяженности в течение длительного времени сохраняют температуру, близкую к адиабатическому стационарному значению  $T = Wa / \lambda L$ . Если принять, что в зонах коррозионного износа толщина пластины снижена до значения  $l \leq L$ , то на передней поверхности пластины в конце теплового процесса возникает температурный сигнал между «бездефектной» и «дефектной» областями:

$$\Delta T = T_d - T_{nd} = \frac{Wa}{\lambda l} - \frac{Wa}{\lambda L}, \quad (2.31)$$

откуда унос материала  $\Delta L = L - l$  можно оценить из простой формулы:

$$\frac{\Delta L}{L} = 1 - \frac{T_{nd}}{T_d}. \quad (2.32)$$

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

$$\frac{T}{Wa / \lambda z} = \frac{1}{\sqrt{\pi Fo_z}} e^{-1/(4Fo_z)}, \quad (2.33)$$

где  $Fo_z = a\tau / z^2$ . Феноменологически можно считать, что дефект в виде нарушения сплошности, расположенный на глубине  $z = l$ , будет обнаружен, если "пакет тепловой энергии", высвободившийся на поверхности, достигнет точки  $z$ , отразится от поверхности дефекта и вернется на поверхность. Анализируя производную  $\partial T / \partial \tau$  в формуле (2.33), можно показать, что

максимальная температура на глубине  $l$  имеет место при  $\tau_l = l^2 / 2a$ . Тогда простой оценкой оптимального времени обнаружения подповерхностного дефекта является:

$$\tau_m = 2\tau_l = l^2 / a. \quad (2.34)$$

**Стационарная теплопередача через плоскую стенку и определение термического сопротивления.** Предыдущий материал был преимущественно посвящен динамическому ТК, поэтому все рассмотренные выше задачи относятся к нестационарной теплопроводности. Рассмотрим стационарную теплопередачу через плоскую стенку, поскольку соответствующие задачи возникают при тепловизионной диагностике ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также дымовых труб. В особенности, это относится к определению термического сопротивления стенки.

Рассмотрим плоскую стенку, разделяющую две среды с различной температурой  $T_{in}^a$  и  $T_{out}^a$  (**Рис. 2.11**). Теплообмен на поверхностях пластины характеризуется коэффициентами  $\alpha_{in}$  и  $\alpha_{out}$ . Однослойная пластина обладает термическим сопротивлением  $R_t = L / \lambda$ , многослойная —  $R_t = \sum_{i=1}^N L_i / \lambda_i$ .

Тепловой поток через стенку равен:

$$Q = \frac{T_{in}^w - T_{out}^w}{R_t} \text{ или } Q = \frac{T_{in}^a - T_{out}^a}{R}, \quad (2.35)$$

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

Схеме **Рис. 2.11** соответствует тепловизионная диагностика качества теплоизоляции дымовых труб или ограждающих конструкций строительных сооружений. При этом с помощью тепловизора измеряют температурное поле на наружной поверхности ствола трубы (стены здания)  $T_{out}^w$  и по его амплитуде или текстуре судят о наличии скрытых дефектах и оценивают их параметры.

Выражение для поверхностной температуры, которое является результатом решения соответствующей прямой задачи теплопроводности, имеет вид:

$$T_{out}^w = \frac{T_{in}^a + \alpha_{out} T_{out}^a \left( \frac{1}{\alpha_{in}} + R_t \right)}{1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t}. \quad (2.36)$$

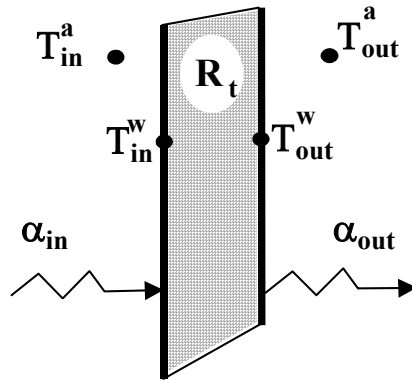


Рис. 2.11. Теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку

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. Ввиду наличия естественной нестационарности температурного поля ограждающей конструкции, измерения проводят в течение длительного времени (до нескольких суток), после чего выбирают квазистационарный период и рассчитывают термическое сопротивление стенки по формуле (2.35).

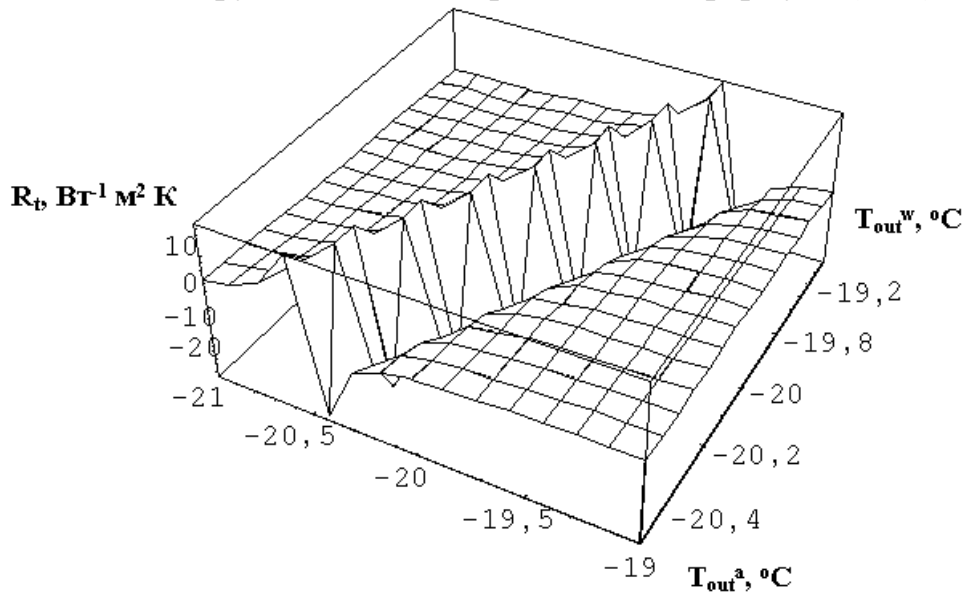
Второй подход требует использования расчетных значений коэффициентов теплообмена согласно следующей формуле:

$$R_t = \frac{T_{in}^a - \frac{\alpha_{out}}{h_{in}}(T_{out}^w - T_{out}^a) - T_{out}^w}{\alpha_{out}(T_{out}^w - T_{out}^a)}. \quad (2.37)$$

Проиллюстрируем на примере неустойчивость обратного решения по формуле (2.37) для типовой ограждающей конструкции. Пусть  $T_{out}^a = -20^\circ\text{C}$  и  $T_{in}^a = +20^\circ\text{C}$ . Примем рекомендуемые строительными нормами и правилами значения  $R_t = 2 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$ ;  $\alpha_{in} = 7.8 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ ;  $\alpha_{out} = 23 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ . Согласно "прямой" формуле (2.36), температуры наружной стены должна быть равной  $T_{out}^w = -19.19^\circ\text{C}$ . 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 факторам. Пусть измеряемые значения находятся в следующих интервалах:  $T_{out}^a = -19 \div -21^\circ\text{C}$  и  $T_{out}^w = -19.5 \div -20.5^\circ\text{C}$ . График функции  $R_t(T_{out}^a, T_{out}^w)$  изображены на Рис. 2.12 согласно формуле (2.37). Видно, что многим комбинациям входных параметров могут соответствовать нереальные, в том числе отрицательные, значения термического сопротивления, которое фактически равно  $R_t = 2 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$ . Провал на графике

**Рис. 2.12** является хорошей графической иллюстрацией неустойчивости решения обратной задачи в виде (2.37).

В строительной практике термическое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций всегда определяют по формуле (2.35).



**Рис. 2.12.** Иллюстрация к определению термического сопротивления ограждающей конструкции согласно формуле (2.37); истинное значение  $R_t = 2 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$  при  $T_{out}^a = -20 \text{ °С}$  и  $T_{out}^w = -19.19 \text{ °С}$

На примере тепловизионной диагностики дымовых труб показано, что ИК термография более пригодна для оценки локальных вариаций термического сопротивления стенок, нежели для определения ее 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:

$$\Delta R_t = \Delta T_{out}^w / \frac{\partial T_{out}^w}{\partial R_t} = \frac{(1 + \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{in}} + \alpha_{out} R_t)^2}{\alpha_{out} (T_{out}^a - T_{in}^a)} \Delta T_{out}^w. \quad (2.38)$$

Например, для типичной дымовой трубы ( $R_t = 1.37 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$ ), неточное определение входных параметров, входящих в формулу (2.37), приводит к основной погрешности определения термического сопротивления, равной  $\Delta R_t = 0.26 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$ , что составляет 19% от полного термического сопротивления. При этом совершенно 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 (2.38) может достигать  $\Delta R_t = 0.032 \text{ Вт}^{-1} \text{ м}^2 \text{ К}$ , или 2.3% от полного термического сопротивления.

## **Разностные соотношения**

Для приближенного решения краевых задач теплопроводности широко применяют метод конечных разностей (метод сеток) [12, 14]. Идея метода состоит в следующем. Область непрерывного изменения аргументов заменяется расчетной сеткой – дискретным множеством точек (узлов). Вместо функции непрерывных аргументов вводят функции дискретных аргументов – сеточные функции, определяемые в узлах сетки. Частные производные, входящие в дифференциальное уравнение, и граничные условия, заменяют (аппроксимируют) разностными соотношениями.

Если рассмотреть функцию целочисленного аргумента  $u(k)$ , где  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , то можно образовать разности в точке  $k$  первого порядка:  $\Delta u_k = u(k+1) - u(k)$  (правая),  $\nabla u_k = u(k) - u(k-1)$  (левая). Обозначив  $u_k = u(k)$ , получим:

$$\Delta u_k = u_{k+1} - u_k, \quad \nabla u_k = u_k - u_{k-1}.$$

Тогда для разности второго порядка имеем:

$$\Delta^2 u_k = \Delta(\Delta u_k) = \Delta u_{k+1} - \Delta u_k = u_{k+2} - 2u_{k+1} + u_k.$$

Выражение для разности второго порядка можно также построить на основе правой и левой разностей первого порядка:

$$\Delta u_k - \nabla u_k = u_{k+1} - 2u_k + u_{k-1}.$$

В результате такой замены краевая задача в частных производных сводится к системе разностных уравнений (алгебраических уравнений), называемых также разностной схемой.

Если решение системы разностных уравнений существует и при измельчении сетки стремится к решению поставленной задачи (т.е. сходится), то это решение и является искомым приближенным решением краевой задачи. Несмотря на то, что число неизвестных в этой системе алгебраических уравнений весьма значительно, решение ее с точки зрения математических трудностей более просто, чем решение исходной задачи.

При решении конкретной задачи необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- 1) Каким образом выбрать сетку?
- 2) Как построить разностную схему?
- 3) Определить, с какой точностью разностная схема аппроксимирует исходную задачу.
- 4) Проверить устойчивость разностной схемы.

Выяснить скорость сходимости решения разностной задачи к решению исходной краевой задачи.

## **Построение сетки**

Заменим область непрерывного изменения аргументов  $\Omega$  искомой функции  $T$  некоторым конечным множеством точек, лежащих в этой области. Это множество назовем разностной сеткой, а сами точки – узлами сетки [12].



В простейшем случае одномерной задачи  $\Omega = \{0 \leq x \leq l\}$  можно ввести равномерную сетку (Рис. 2.13). Для этого отрезок  $[0, l]$  разобьем на  $N$  равных частей точками  $x_k = kh$ ,  $k=0, 1, \dots, N$ . Расстояние между узлами  $x_{k+1} - x_k = h$  называется шагом сетки. Так как в рассматриваемом случае  $h = \frac{l}{N} = const$ , то множество узлов  $x_k$ ,  $k=0, 1, \dots, N$  представляет собой равномерную сетку. Если отрезок  $[0, l]$  разбит на  $N$  частей произвольными взятыми точками  $0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{N-1} < l$ , причем  $x_0 = 0$ ,  $x_N = l$ , то получим неравномерную сетку с переменным шагом.

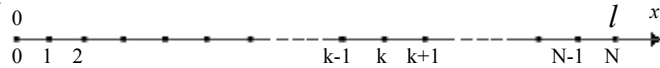


Рис. 2.13. Построение сетки

Аналогично можно построить сетку на плоскости. На Рис. 2.14 представлена прямоугольная сетка, множество точек  $(x_k, y_j)$  образуют сетку в прямоугольнике. Если  $h \neq p$ , то сетка называется прямоугольной, а в противном случае – квадратной. Если построить сетку неравномерной хотя бы по одной координате, то полученная сетка называется неравномерной.

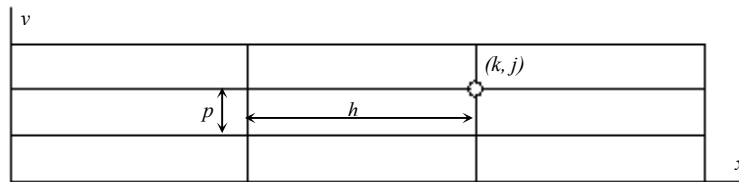


Рис. 2.14. Прямоугольная сетка

По аналогии с разностной сеткой для пространственных областей, вводится сетка по временной переменной  $\tau$ . В общем случае эта сетка может быть неравномерной и тогда  $\eta_i$  – шаг сетки – зависит от номера шага. Узлы сетки определяются точками  $\overline{\Omega}_n = (\tau_i, i=0, 1, 2, \dots, M; \eta_i = \tau_{i+1} - \tau_i)$ .

Для решения, например, одномерной по пространственным координатам нестационарной задачи используют произведение двух сеток: пространственной и временной, в результате получают пространственно-временную разностную сетку (Рис. 2.15). Совокупность узлов сетки, лежащих на линии  $\tau = \tau_i$  называют  $i$ -м временным слоем.

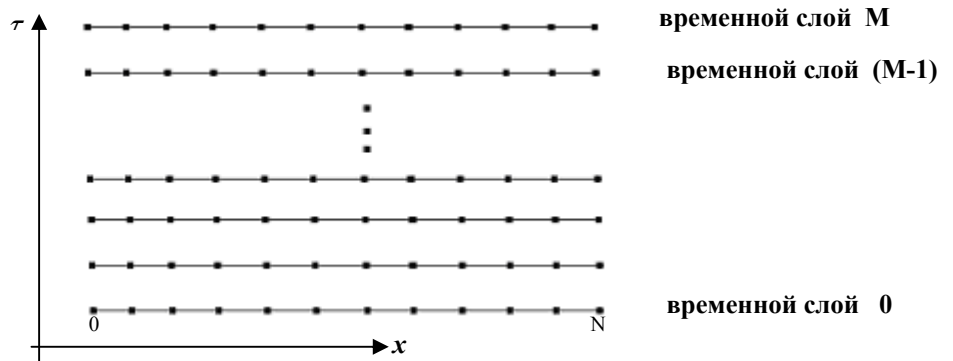


Рис. 2.15. Пространственно-временная сетка

Крайние узлы сетки называются граничными, остальные узлы – внутренними. Граничные условия задачи задаются в граничных узлах.

### **Построение разностных схем**

Разностный аналог, аппроксимирующий исходную краевую задачу, можно построить различными способами. Среди множества возможных подходов к построению разностных аналогов для дифференциальных операторов выделим основные:

- 1) метод формальной замены производных конечно-разностными выражениями;
- 2) метод интегральных тождеств (интегро-интерполяционный метод);
- 3) вариационные методы построения разностных схем;
- 4) метод неопределенных коэффициентов.

Метод конструирования разностных схем с помощью формальной замены производных конечно-разностными выражениями основан на использовании разложения в ряд Тейлора достаточно гладких функций, что, как правило, позволяет сохранить локальные свойства дифференциальных уравнений.

Для аппроксимации дифференциального оператора вида  $A[T] = dT / dx$  возможно использование следующих разностных отношений: правое разностное отношение:  $T_{x,k} = (T_{k+1} - T_k) / h$ ; левое разностное отношение:  $T_{\bar{x},k} = (T_k - T_{k-1}) / h$ , а также их линейную комбинацию:  $T_{\delta x,k} = \delta T_{x,k} + (1 - \delta) T_{\bar{x},k}$ . При  $\delta = 1/2$  получаем центральное разностное соотношение:  $T_{\delta x,k} = (T_{k+1} - T_{k-1}) / (2h)$ .

Для аппроксимации второй производной можно использовать следующий разностный оператор:  $A[T] = d^2T / dx^2$ ,  $A_k[T_k] = (T_{k+1} - 2T_k + T_{k-1}) / h^2$ .

Рассмотрим оператор одномерного уравнения теплопроводности  $A[T] = \partial T / \partial \tau - a \partial^2 T / \partial x^2$ . Аппроксимируем производную по времени правым разностным отношением:  $T_{\tau}^i = (T_k^{i+1} - T_k^i) / \eta$ , а для второй производной по переменной  $x$  можно записать разностное отношение на временном слое  $i$ :

$$T_{xx,k}^i = (T_{k+1}^i - 2T_k^i + T_{k-1}^i) / h^2$$

или на временном слое  $(i+1)$ :

$$T_{xx,k}^{i+1} = (T_{k+1}^{i+1} - 2T_k^{i+1} + T_{k-1}^{i+1}) / h^2.$$

В соответствии с этим можно рассмотреть две различные аппроксимации оператора (вторая форма соответствует случаю  $A_{h\eta}[T]=0$ ):

$$A_{h\eta}[T] = T_{\tau}^i - a T_{xx,k}^i, \text{ или } T_k^{i+1} = m T_{k-1}^i + T_k^i (1 - 2m) + m T_{k+1}^i; \quad (2.39)$$

$$A_{h\eta}[T] = T_{\tau}^i - a T_{xx,k}^{i+1}, \text{ или } m T_{k-1}^{i+1} - T_k^{i+1} (1 + 2m) + m T_{k+1}^{i+1} = -T_k^i; \quad (2.40)$$

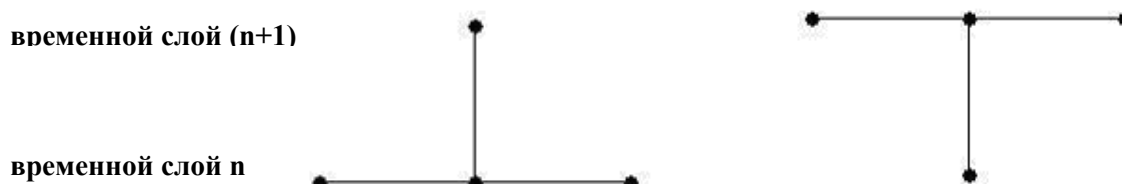
где  $m = \frac{al}{h^2}$ ,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $[m^2/c]$ ,  $l$  – шаг расчета по времени,  $[c]$ ,  $h$  – шаг расчета по пространству,  $[m]$ .

Шаблон, представленный для оператора (2.39), используется в явных схемах. Данный шаблон отличает то, что для нахождения температуры на  $(n+1)$ -м временном слое используются уже известные значения температур

на  $n$ -м временном слое, т.е. в этом случае вычислительный процесс достаточно прост.

При нахождении приближенных значений температур с использованием шаблона для оператора (2.40) (*неявная* схема), используются неизвестные значения температур на  $(n+1)$ -м временном слое, поэтому необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений (например, с использованием метода прогонки). Процесс решения по неявной схеме более сложен по сравнению с явной схемой.

Схемы данных шаблонов изображены на **Рис. 2.16**



**Рис. 2.16. Шаблоны для явной и неявной схем**

**Консервативные схемы.** При численном решении краевых задач естественно потребовать, чтобы для построенной разностной схемы выполнялись основные законы сохранения субстанции (теплоты, энергии, массы и т.д.). Разностные схемы, для которых удовлетворяется это требование, называются консервативными, соответственно, схемы, в которых нарушаются законы сохранения – неконсервативными [12].

### **Оценка погрешности аппроксимации**

Различные способы аппроксимации дают различную погрешность аппроксимации. Для оценки погрешности используют разложение в ряд Тейлора.

$$T(x_k \pm h) = T(x_k) \pm hT'(x_k) + \frac{h^2}{2!}T''(x_k) \pm \frac{h^3}{3!}T'''(x_k) + O(h^4).$$

Тогда в точке  $x_k$  получим следующие выражения для оценки погрешности аппроксимации первой производной:

$$T_{x,k} - T'(x_k) = \frac{h}{2!}T''(x_k) + O(h^2);$$

$$T_{\bar{x},k} - T'(x_k) = -\frac{h}{2!}T''(x_k) + O(h^2);$$

$$T_{o_{x,k}} - T'(x_k) = \frac{h^2}{6}T'''(x_k) + O(h^4).$$

Аналогично, погрешность аппроксимации для второй производной определяется как:

$$T_{xx,k} - T''(x_k) = \frac{h^2}{12}T^{IV}(x_k) + O(h^4) = O(h^2).$$

### **Устойчивость и сходимость разностных схем**

Важным ограничением, которое следует учитывать при использовании явной схемы, является необходимость выполнения соотношения:

$$m = \frac{al}{h^2} \leq 0,5, \quad (2.41)$$

Соотношение (2.41) является условием устойчивости явной схемы. Данное выражение накладывает ограничение на выбор шага по времени, при заданном шаге по пространству  $h$ . Например, при численном расчете для многослойной структуры, состоящей из различных материалов, необходимо определить временной шаг для каждого слоя, а затем выбрать наименьший шаг для всей структуры.

*Устойчивость схемы* характеризует то, что возникающие в процессе вычисления погрешности, избежать которые невозможно, хотя бы из-за округления чисел, имеют тенденцию убывать или, по крайней мере, не возрастать при переходе от одного временного слоя к другому.

Если факт устойчивости имеет место при любом соотношении шагов по различным переменным, при условии, что они достаточно малы, то схема называется безусловно устойчивой. Безусловно устойчивой является разностная схема, соответствующая оператору (2.40), т.е. неявная схема.

При решении разностной задачи необходимо, чтобы разностное решение стремилось к точному решению соответствующей краевой задачи при уменьшении числа шагов сетки. Свойство сходимости разностной схемы – основной критерий качества разностной схемы.

### **Примеры реализации численных расчетов для Matlab**

В качестве примера приводится m-функция «expScheme» для математического пакета MATLAB [17], предназначенной для расчета температуры вдоль стержня, концы которого находятся при температурах  $T1$  и  $T2$  соответственно (граничные условия 1 рода) с использованием **явной схемы**. Также приводится текст контрольной функции «expSchemeTest» для более удобного задания параметров и тестирования функции «expScheme».

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Res = expScheme( m, T, T1, T2)
%function Res = expScheme( m, T, T1, T2)
%расчет температуры вдоль стержня с использованием явной схемы
%m = a * dt / h^2 (a - температуропроводность, dt - шаг по времени, h - шаг по пространству)
%для устойчивости схемы: m <= 0.5
sz = size( T, 2);
T(1) = T1;
T(sz) = T2;
for i=2:sz-1
    Res(i) = T(i) + m*( T(i-1) - 2*T(i) + T(i+1));
end
Res(1) = T1;
Res(sz) = T2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function expSchemeTest

Len = 0.01;           %толщина стержня
diff = 1.4e-7;       %температуропроводность
cond = 0.586;        %теплопроводность

hNodeCnt = 100;      %число узлов по пространству
h = Len / (hNodeCnt - 1); %шаг по пространству

```

```

m = 0.5;
dt = m * h^2 / diff;           %рассчитываем шаг по времени исходя из условия устойчивости

T1 = 3;                        %граничные условия
T2 = -3;

T = zeros( 1, hNodeCnt);      %начальная температура вдоль стержня

for i=1:100
    T = expScheme( m, T, T1, T2);
    plot(T);
    pause(0.1);
end;

```

Рассмотрим реализацию численной схемы расчета температуры вдоль стержня при граничных условиях 3-го рода для  **неявной**  схемы. Считаем, что стержень разбит на  $N$  равных частей величиной  $h$ . Аппроксимируем граничные условия 3-го рода ( $T_{amb1}$ ,  $T_{amb2}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ):

$$-\alpha_1(T_0^{n+1} - T_{amb1}) = -\lambda \frac{T_1^{n+1} - T_0^{n+1}}{h} \quad \text{или} \quad T_0^{n+1} \left(1 + \frac{\lambda}{h\alpha_1}\right) - \frac{\lambda}{h\alpha_1} T_1^{n+1} = T_{amb1} \quad (\text{для левой}$$

границы),

$$\alpha_2(T_N^{n+1} - T_{amb2}) = -\lambda \frac{T_N^{n+1} - T_{N-1}^{n+1}}{h} \quad \text{или} \quad \frac{\lambda}{h\alpha_2} T_{N-1}^{n+1} - \left(1 + \frac{\lambda}{h\alpha_2}\right) T_N^{n+1} = -T_{amb2} \quad (\text{для правой}$$

границы). С учетом выражения (2.40) для внутренних узлов стержня:  $mT_{k-1}^{n+1} - T_k^{n+1} (1+2m) + mT_{k+1}^{n+1} = -T_k^n$ , для  $k=1..(N-1)$  получаем систему из  $(N+1)$  линейных уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix}
 \left(1 + \frac{\lambda}{h\alpha_1}\right) & -\frac{\lambda}{h\alpha_1} & & & & & 0 \\
 m & -(1+2m) & m & & & & 0 \\
 0 & m & -(1+2m) & m & & & 0 \\
 & & & & & & \\
 & & & & m & -(1+2m) & m \\
 & & & & & \frac{\lambda}{h\alpha_2} & -(1 + \frac{\lambda}{h\alpha_2}) \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & & 
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 T_0^{n+1} \\
 T_1^{n+1} \\
 \vdots \\
 T_{N-1}^{n+1} \\
 T_N^{n+1}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 T_{amb1} \\
 -T_1^n \\
 \vdots \\
 -T_{N-1}^n \\
 -T_{amb2}
 \end{pmatrix}$$

Для решения системы такого вида обычно используются методы Гаусса и прогонки. Ниже приведена *m*-функция «impScheme», реализующая неявную схему и использующая для решения системы линейных уравнений встроенные алгоритмы пакета MATLAB (для нахождения обратной матрицы), а также контрольная *m*-функция «impSchemeDemo» для более удобного задания параметров.

```

%%%%%%%%%%%%%%
function Res = impScheme( m, T, Tamb1, Tamb2, alf1, alf2, cond, h)
%function Res = impScheme( m, T, Tamb1, Tamb2, alf1, alf2, cond, h)
%расчет температуры вдоль стержня с использованием неявной схемы
%граничные условия 3 рода
% h - шаг по пространству

```

```

% dt - шаг по времени
% cond - теплопроводность
% diff - температуропроводность
% alf1 - коэффициент теплообмена
% alf2
% Tamb1 - температура окружающей среды
% Tamb2
% m = diff * dt / h^2;

sz = size( T, 2);
A = zeros( sz, sz);

A( 1, 1) = 1 + cond/h/alf1;
A( 1, 2) = -cond/h/alf1;
A( sz, sz-1) = cond/h/alf2;
A( sz, sz) = -(1 + cond/h/alf2);

C = zeros( sz, 1);
C( 1, 1) = Tamb1;
C( sz, 1) = -Tamb2;

for i=2:sz-1
    A( i, i-1) = m;
    A( i, i) = -(1 + 2*m);
    A( i, i+1) = m;
    C( i, 1) = -T( 1, i);
end
B = A^-1 * C;
Res = reshape( B, 1, sz);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function impSchemeDemo
h = 1e-3;
dt = 4.41;
cond = 0.586;
diff = 1.4e-7;

alf1 = 10;
alf2 = 10;
Tamb1 = 10;
Tamb2 = 10;

T = zeros(1, 11);

m = diff * dt / h^2;

for i=1:100
    T = impScheme( m, T, Tamb1, Tamb2, alf1, alf2, cond, h)
    plot(T);
    pause(0.1);
end;

```

## Глава 3. Основные закономерности активного ТК. Обработка результатов тепловизионных измерений

### Условия обнаружения сигналов от внутренних дефектов

Общим критерием сравнения различных процедур ТК является отношение сигнал/шум [5], которое определяют как

$$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}}, \quad (3.1)$$

где  $\bar{T}_d$  – средняя температура в дефектной зоне,  $\bar{T}_{nd}$  – средняя температура в бездефектной зоне,  $\sigma_{nd}$  – стандартное отклонение в бездефектной области (дисперсия шума), определяемое как

$$\sigma_{nd} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(T_{nd\ i} - \bar{T}_{nd})^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

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

$$s > 1. \quad (3.3)$$

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  $C = \Delta T(\tau) / T_{nd}(\tau)$ . 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.  $\sigma_{nd} = \Delta T_{res}$ ; 2) шумы ТК являются только мультипликативными и определяются излучательно-поглощательными свойствами изделия (флуктуации коэффициента поглощения); их можно характеризовать контрастом помехи  $C_{noise}$ , который не зависит от времени в силу линейности задач ТК. В первом случае оптимальное время наблюдения совпадает со временем наступления максимального сигнала  $\Delta T(\tau_m)$ , и *первое условие обнаружения дефекта* можно записать в виде:

$$\Delta T(\tau_m) > \Delta T_{res}. \quad (3.4)$$

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

$$C(\tau_m) > C_{noise}. \quad (3.5)$$

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

Принципиальное различие этих условий состоит в том, что условие (3.4) можно выполнить всегда путем увеличения поглощенной энергии  $W$  (мощности нагрева  $Q$ ). Условие (3.5) не зависит от  $W$  ( $Q$ ) и определяется свойствами изделия.

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

$$T_{abs}(\tau = \tau_h) < T_{destr}. \quad (3.6)$$

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 выполняется совокупность следующих трех условий:

$$\begin{aligned} \Delta T(\tau_m) &> \Delta T_{res}; \\ C(\tau_m) &> C_{noise}; \\ T_{abs}(\tau = \tau_h) &< T_{destr}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

В условиях (3.7) участвуют параметры: 1) аппаратуры ( $\Delta T_{res}$ ); 2) изделия ( $C_{noise}$ ); 3) нагрева ( $T_{abs}$ ); 4) дефекта ( $\Delta T$  или  $C$ ) [5].

Дополнительным условием является выбор оптимальной частоты регистрации термограмм, что, как правило, всегда можно выполнить, применяя современные тепловизионные системы с цифровой записью данных.

### **Информативные параметры ТК**

Под *информативными параметрами ТК* будем понимать *количественные характеристики динамической теплопередачи* в дефектных структурах, которые используются для принятия решения о качестве изделий. При анализе поверхностной температурной функции  $T(x, y, \tau)$  различают *амплитудные* и *временные* информативные характеристики. При использовании одномерного преобразования Фурье  $F[T(x, y, \tau)]$  по времени информативными параметрами служат *мощностные* и *фазовые* характеристики, которые являются функцией частоты. Соответствующие информативные параметры имеют место при других преобразованиях сигнала, например, при использовании вейвлет-функций (wavelet functions). *Оптимальные параметры обнаружения* соответствуют *максимальному отношению сигнал/шум*.

**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 возможно ввести в рассмотрение некоторое эталонное значение температуры, принятое за бездефектное значение  $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau) = T_{nd}(\tau)$ . В активном ТК, как правило, используют избыточные значения температуры,



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

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_d(x, y, \tau) - T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau). \quad (3.8)$$

При одностороннем ТК форма пространственного профиля сигнала  $\Delta T(x, y, \tau)$  над малыми слаботеплопроводными дефектами близка к гауссоиду (Рис. 3.1.а).

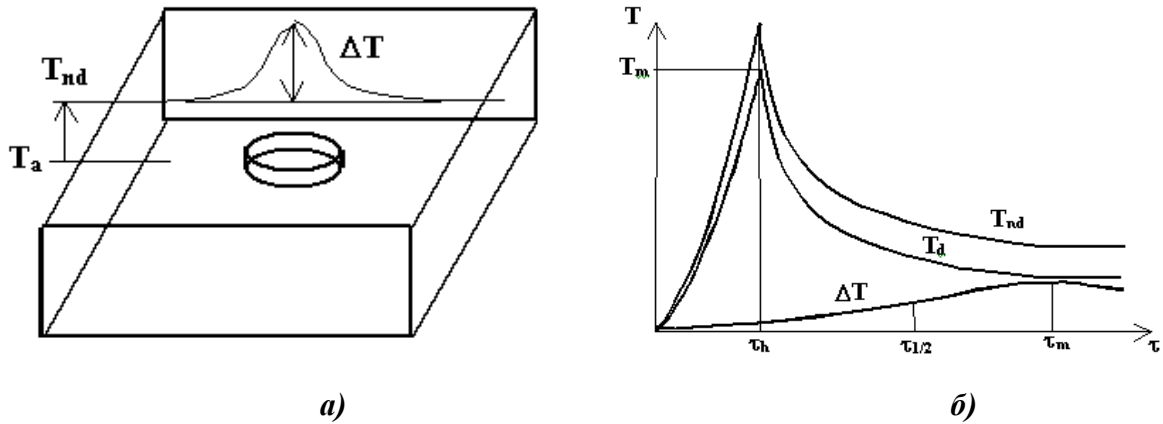


Рис. 3.1. Амплитудные и временные информативные параметры

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, то есть избыточные температуры  $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau)$ ,  $T_d(x, y, \tau)$  и сигнал  $\Delta T(x, y, \tau)$ , прямо пропорциональны поглощенной плотности мощности нагрева  $Q$  в силу линейного характера процесса теплопередачи. В качестве безразмерного информативного параметра, не зависящего от  $Q$ , вводят *текущий температурный контраст* (running temperature contrast)

$$C^{run}(x, y, \tau) = \Delta T(x, y, \tau) / T_{nd}(\tau), \quad (3.9)$$

который служит естественной характеристикой конкретной процедуры обнаружения данного типа дефекта в данном материале. Заметим, что нормировка на поглощенную энергию в виде (3.9) эффективна, если величина  $Q$  постоянна во всех точках.

Можно также сказать, что температурный сигнал определяется **абсолютной** разницей между температурами в дефектной и бездефектной областях, а текущий температурный контраст – **относительной** разницей.

Введение временных информативных критериев связано с тем фактом, что, при прочих равных условиях, во временной области можно обеспечить большее отношение сигнал/шум, чем в области амплитуд. Иными словами, используя график  $\Delta T(\tau)$  на Рис. 3.1.б, можно сказать, что измерить величину оптимального времени контроля  $\tau_m$  можно с большей точностью, нежели саму величину максимального температурного сигнала  $\Delta T_m$ . Величина  $\tau_m$  является временным информативным критерием; например, при

одностороннем ТК более глубокие дефекты характеризуются большими значениями  $\tau_m$ .

Помимо параметра  $\tau_m$ , в тепловом контроле используют время  $\tau_{1/2}$ , когда сигнал  $\Delta T(\tau)$  достигает половины своего максимального значения  $\Delta T_m/2$  (см. **Рис.3.1.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 параметров, в то время как разность температур для двух бездефектных точек может быть весьма существенной, достигая максимума в конце нагрева. Тем не менее, наличие шумов и теплоотдачи в окружающую среду приводит к разбросу и временных параметров, поэтому в ТК часто комбинируют амплитудные и временные критерии.

**Мощностные и фазовые информативные параметры.** Если к «нормальной» температурной функции  $T(\tau)$  применить некоторое интегральное преобразование, в частности, преобразование Фурье по времени, амплитудные информативные характеристики перейдут в мощностные, а временные – в частотные или фазовые [5].

### **Основные функциональные зависимости температурных сигналов от параметров изделия и дефекта при импульсном ТК**

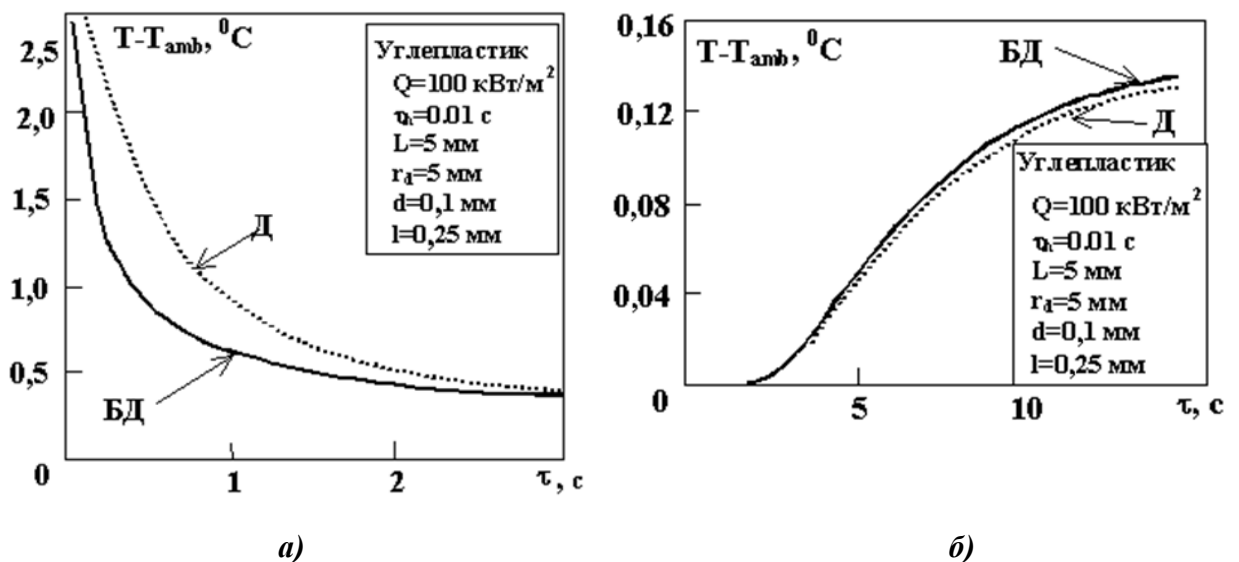
В классических моделях ТК, описанных выше, температурный сигнал над внутренним дефектом  $\Delta T$  и его производные, например, текущий температурный контраст  $C^{run} = \Delta T/T_{nd}$ , зависят от:

- времени  $\{\tau\}$ ;
- параметров нагрева  $\{Q, \tau_h\}$ ;
- интенсивности теплообмена объекта контроля с окружающей средой  $\{\alpha_F, \alpha_R\}$ ;
- толщины объекта контроля  $\{L\}$ ;
- теплофизических свойств объекта контроля  $\{\lambda, a\}$ ;
- геометрических размеров дефекта  $\{h_x, h_y, h_z = d\}$  и глубины его залегания  $\{l\}$ ;
- ТФХ дефекта  $\{\lambda_d, a_d\}$ .

Таким образом, на выявляемость дефектов тепловым методом влияют, по крайней мере, 14 параметров, часть из которых, а именно  $\{\alpha_F, \alpha_R, \lambda, a, a_d\}$ , можно условно отнести к разряду слабо-влияющих в обычных условиях испытаний [5].

**Изменение температурных сигналов во времени.** Тепловой НРК называют активным, или динамическим (transient, dynamic), поскольку выявляемость внутренних дефектов существенно зависит от времени наблюдения информативных параметров (observation time). Анализ изменений  $\Delta T$  и  $C^{run}$  во времени представляет также интерес с точки зрения разработки алгоритмов улучшения отношения сигнал/шум, которые широко распространены в современном ТК.

На **Рис. 3.2 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 компонента тензора теплопроводности  $\lambda_z$ , направленная в глубь изделия). При кратковременной тепловой стимуляции, т.е. когда длительность нагрева существенно меньше характерных времен теплопередачи в конкретном изделии ( $Fo_h = a \tau_h / L^2 \ll 0.1$ ), заметная разница между дефектной  $T_d$  и бездефектной  $T_{nd}$  температурой начинает сказываться на стадии охлаждения ( $\tau > \tau_h$ ).



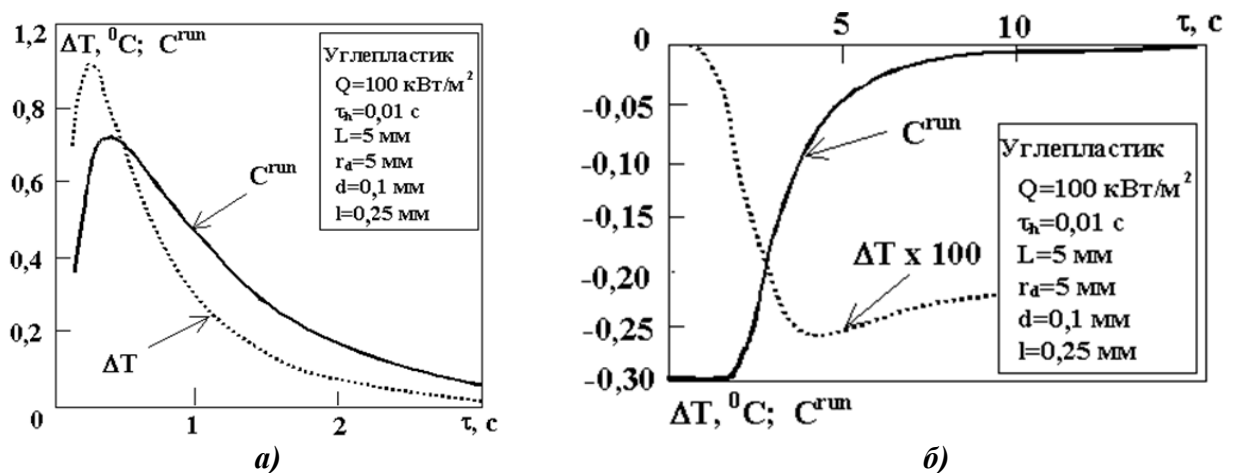
**Рис. 3.2. Изменение избыточной температуры во времени**

*а) передняя поверхность*

*б) задняя поверхность*

На **Рис. 3.3 а,б** 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 информативные параметры  $\Delta T$  и  $C$  обнаруживают специфические максимумы, которые наступают при различных оптимальных временах наблюдения  $\tau_m$ . На передней поверхности (**Рис. 3.3 а**), 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 максимальный контраст  $C_m$  опережает максимальный перепад  $\Delta T_m$ . 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 (**Рис. 3.3. б**) максимальный контраст обычно наступает при очень коротких временах, когда избыточная температура  $T$  и температурный сигнал  $\Delta T$  малы. Поэтому в двусторонних процедурах ТК, оптимальным временем контроля является такое, при котором сигнал  $\Delta T$  начинает превышать уровень шумов. Отметим еще раз, что  $\Delta T > 0$  на нагреваемой поверхности и  $\Delta T < 0$  задней поверхности для дефектов, чья теплопроводность ниже, чем теплопроводность основного материала. Для более теплопроводных включений знак дифференциального температурного сигнала изменяется на обратный.

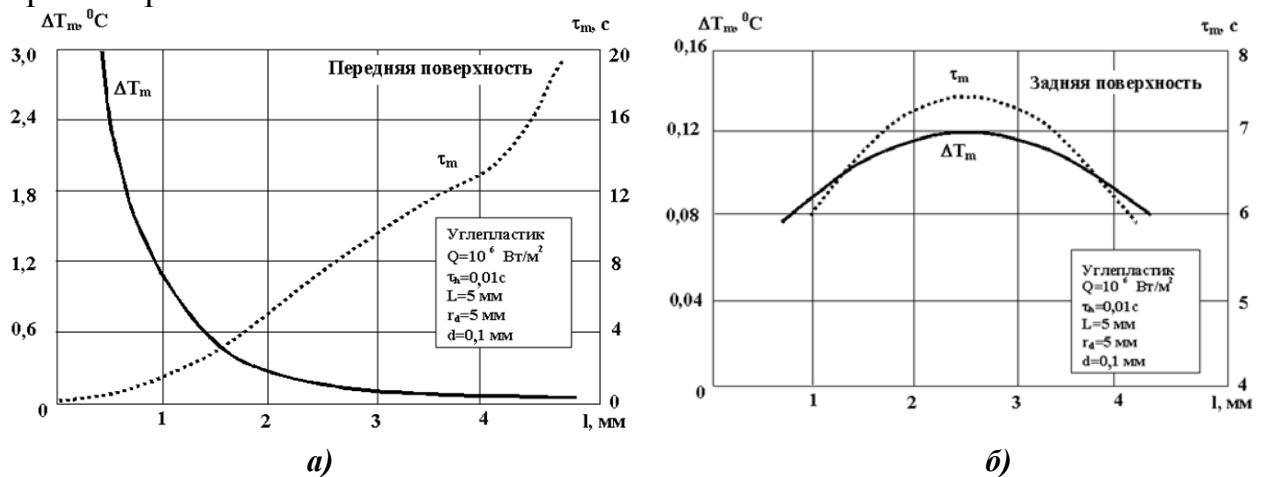


**Рис. 3.3. Изменение температурного сигнала и температурного контраста во времени**

- а) передняя поверхность  
б) задняя поверхность

**Влияние глубины залегания дефекта  $l$  на оптимальные параметры ТК.** На передней поверхности температурный сигнал резко спадает с ростом  $l$  (**Рис. 3.4 а**). Если принять типичное температурное разрешение ИК прибора равным  $0,1^\circ\text{C}$ , предельная глубина обнаружения составит около 3 мм. Этот вывод справедлив для мощности нагрева  $Q=10^6 \text{ Вт/м}^2$ , что соответствует избыточной температуре поверхности в конце нагрева  $\sim 110^\circ\text{C}$ . Дальнейшее увеличение мощности нагрева способно повысить  $\Delta T$  и соответственно увеличить предельное значение  $l$ , однако при этом изделие может разрушиться вследствие перегрева. Таким образом, предельно допустимая температура материала ограничивает стремление повышать мощность нагрева для обнаружения более глубоких дефектов. Более того, в случае строго 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  $l$ , достигая  $\tau_m \sim 10 \text{ с}$  при  $l \sim 3 \text{ мм}$ . Отметим, что с учетом данных на **Рис. 3.4 а**, рекомендуемое в литературе соотношение  $\tau_m = l^2 / a$ , которое не учитывает

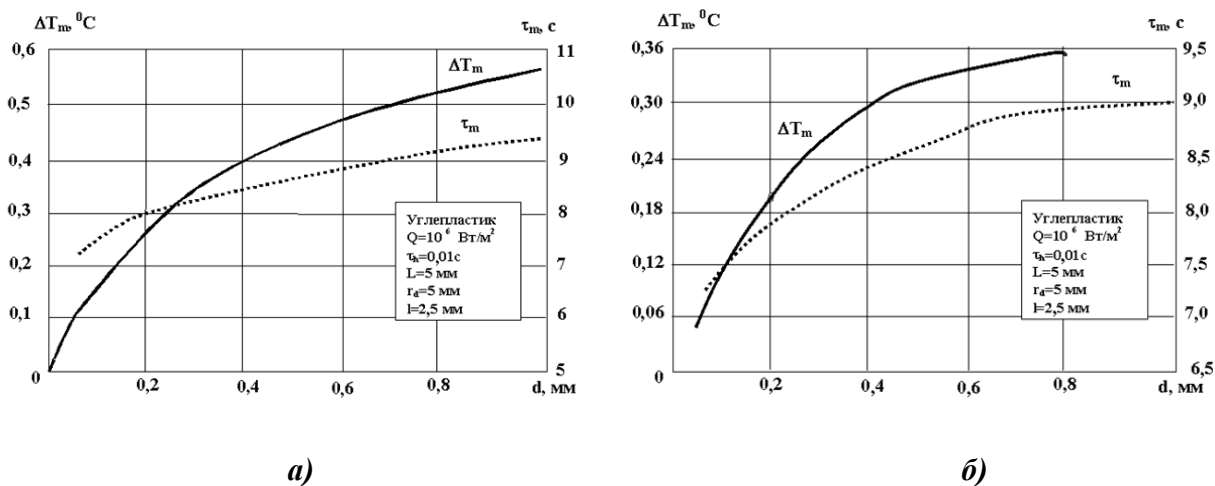
конечных размеров дефектов, может рассматриваться только в качестве первого приближения.



**Рис. 3.4. Влияние глубины залегания дефекта на оптимальные параметры**  
 а) передняя поверхность  
 б) задняя поверхность

На задней поверхности, как отмечалось ранее, графики обеих функций  $\Delta T(l)$  и  $\tau_m(l)$  являются симметричными относительно середины изделия  $l=2.5$  мм (Рис. 3.4 б). Иными словами, при двусторонней процедуре ТК, максимальные сигналы  $\Delta T$  создают дефекты, находящиеся в центре изделия.

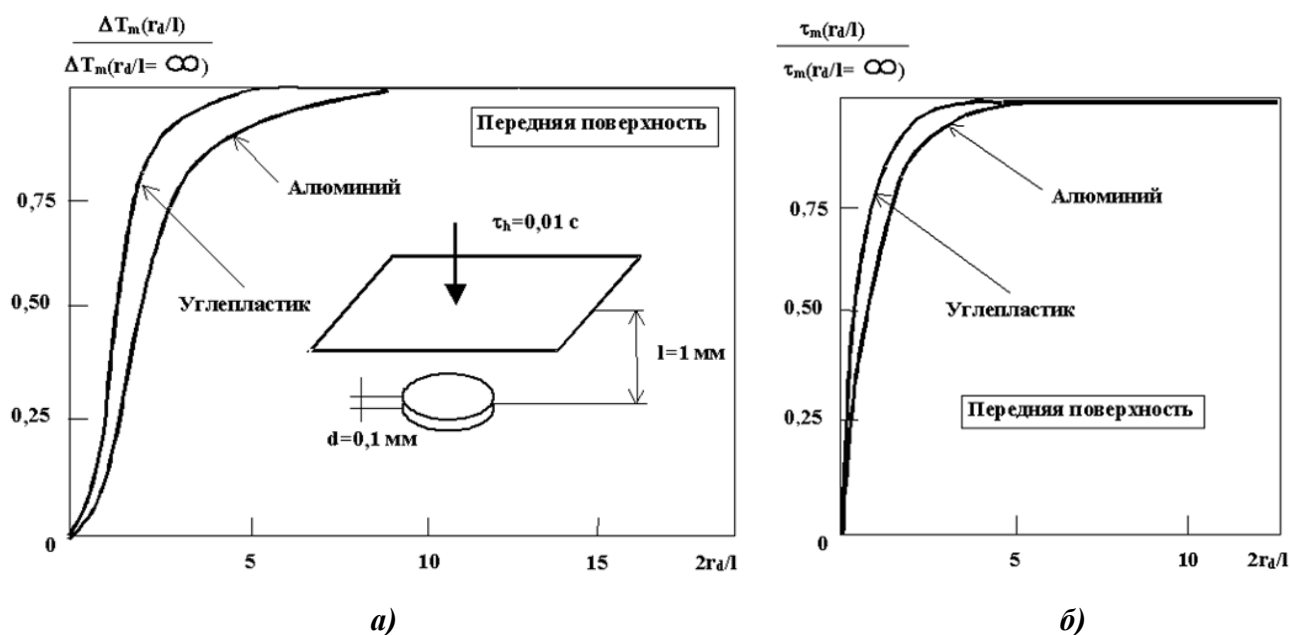
**Толщина дефекта.** В принципе толщина дефекта  $d$  в направлении распространения основного теплового потока является всего лишь одним из размеров дефекта, которые в целом существенно влияют на  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$ . Рассмотрение параметра  $d$  отдельно от поперечных размеров дефектов  $h$  целесообразно при сравнении многомерных и одномерных задач ТК. Как следует из Рис. 3.5, с ростом  $d$ , увеличивается амплитуда сигнала  $\Delta T$  и возрастает время  $\tau_m$ . Для случая расположения дефекта в середине изделия, т.е. на глубине  $l=2.5$  мм, соответствующие зависимости подобны как для передней, так и для задней поверхностей. Наиболее сильно параметры  $\Delta T$  и  $\tau_m$  изменяются при малых значениях  $d$ , в частности, для тонких дефектов можно считать, что  $\Delta T \sim d$ . Поскольку моделирование очень тонких дефектов численным методом не всегда удобно, соответствующие значения  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  можно определить путем пропорционального пересчета. При значительных толщинах дефектов соответствующие зависимости проявляют эффект насыщения.



**Рис. 3.5. Влияние толщины дефекта на оптимальные параметры**  
 а) передняя поверхность  
 б) задняя поверхность

Следует отметить, что при разработке алгоритмов тепловой дефектометрии дефектов решающим параметром является не толщина, а *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  $h_y$ , которые больше связаны с чисто геометрической функцией  $\Delta T(x, y, \tau)$  на поверхности изделия.

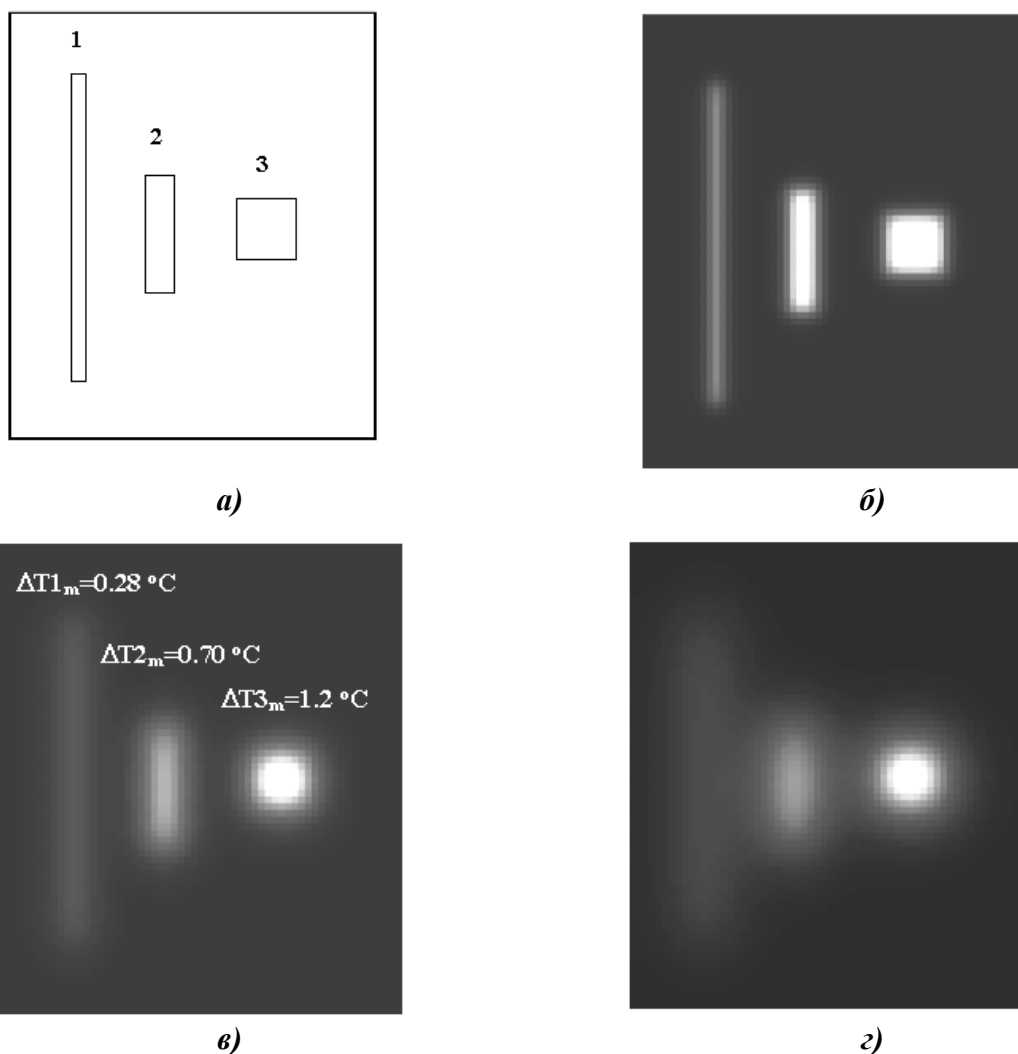
**Поперечные размеры и конфигурация дефекта.** Дефекты достаточно больших поперечных размеров могут приводить к одномерному течению тепла через дефект. Это положение проиллюстрировано на **Рис. 3.6** зависимостью  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  от  $r_d/l$ . Видно, что в углепластике поперечным тепловым потоком можно пренебречь, если  $2r_d/l > 5$ . Для более теплопроводного алюминия это условие становится более жестким:  $2r_d/l > 10$ . В литературе по ТК известно приближенное правило, согласно которому с помощью теплового метода можно обнаружить дефекты, поперечный размер которых по крайней мере вдвое превышает глубину их залегания, т.е.  $2r_d/l > 2$ . Данные **Рис. 3.6.а.** иллюстрируют 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 (**Рис. 3.6.б.**), что подтверждает предпочтительность их использования для оценки параметров дефектов.



**Рис. 3.6. Влияние поперечных размеров и конфигурации дефекта на оптимальные параметры**

- а) максимальное значение температурного сигнала  
 б) оптимальное время обнаружения

Другой аспект анализа диффузии тепла в поперечном направлении относится к влиянию на  $\Delta T_m$  и  $\tau_m$  конфигурации дефектов при их неизменной площади, а также влиянию дефектов друг на друга. На **Рис. 3.7.** приведены термограммы, полученные при трех моментах времени, для 50 %-го коррозионного уноса материала в стальной пластине толщиной 2 мм. Площадь поперечного сечения всех дефектов равна  $25 \text{ mm}^2$ . Форма дефектов воспроизводится наилучшим образом при малых временах наблюдения (**Рис. 3.7.б**), когда поперечный тепловой поток незначителен; при этом влияние близкорасположенных дефектов друг на друга минимально. При оптимальном времени наблюдения (**Рис. 3.7.в**) температурный сигнал достигает максимума  $\Delta T_m$ , однако при этом сильнее сказывается диффузия тепла в поперечном направлении. 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 *Дефекта 1* и *3*). При больших временах наблюдения диффузия тепла может существенно искажать поверхностные температурные «отпечатки» скрытых дефектов. Например, в анизотропных материалах форма таких отпечатков может искажаться из-за различий в теплопроводности материала вдоль различных координат (**Рис. 3.7.г**).



**Рис. 3.7. Влияние конфигурации дефектов на распределение поверхностной температуры (обнаружение 50%-го коррозионного уноса материала в стали толщиной 2 мм;  $Q = 10^6 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ;  $\tau_h = 0.01 \text{ с}$ ):**

*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*

**Мощность нагрева и интенсивность поверхностного теплообмена.** Вследствие линейности исследуемых задач теплопроводности как избыточная температура нагрева, так и температурный сигнал над дефектом, прямо пропорциональны поглощенной энергии  $W$ , или мощности  $Q$ , в то время как температурные контрасты (текущий и нормализованный) не зависят от  $W$  ( $Q$ ). Во многих случаях, более интенсивный нагрев обеспечивает более качественные изображения дефектов за счет большего отношения сигнал/шум  $s = \Delta T / \Delta T_{res}$ , или, в более общем случае, 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  $\Delta T_{res}$ . Шум  $\Delta T_{res}$  является *аддитивным*, в то время как поверхностные шумы объектов контроля могут в первом приближении

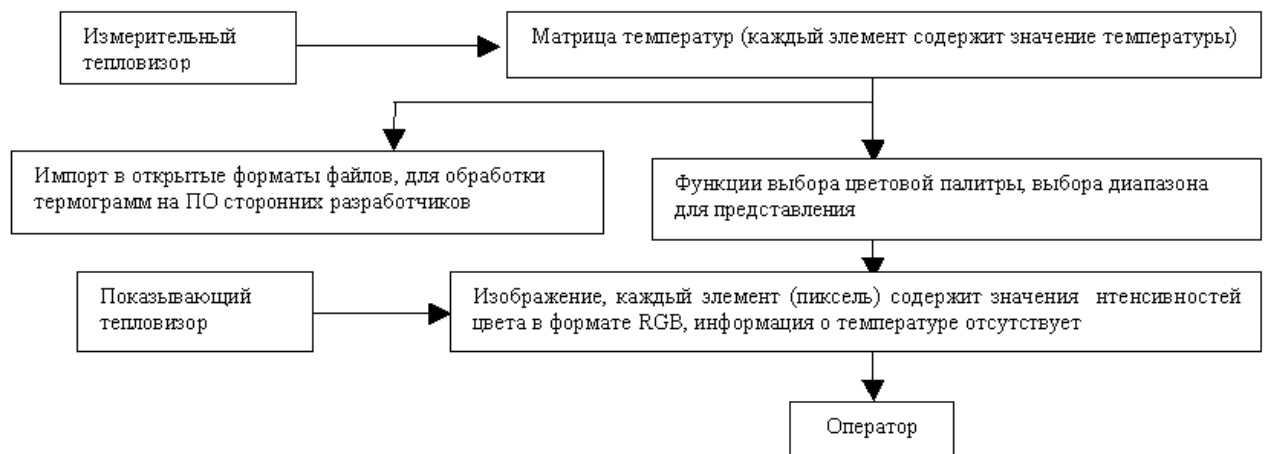


считаться *мультипликативными*. Такими являются шумы, вызванные флуктуациями коэффициента излучения  $\varepsilon$ , который выступает в качестве сомножителя в соответствующем выражении для выходного сигнала теплового дефектоскопа. В случае строго мультипликативных помех, контраст помехи во времени не изменяется, поэтому он может служить хорошей характеристикой конкретного материала. Однако, в общем случае, уровень помехи изменяется в ходе нагрева, в частности, из-за наличия отраженного излучения и других нелинейных эффектов.

Интенсивность поверхностного теплообмена описывается коэффициентами  $\alpha^F$  на передней и  $\alpha^R$  на задней поверхностях. Для тонких и/или высокотеплопроводных материалов, удовлетворяющих соотношению  $Bi = \alpha L / \lambda < 0.1$ , что соответствует приблизительно адиабатическим условиям, температурные контрасты слабо зависят от интенсивности теплоотдачи в широком диапазоне значений  $\alpha$ . При ТК толстых и/или низкотеплопроводных материалов более интенсивная теплоотдача на передней поверхности снижает температурные контрасты на этой поверхности. В двухсторонних процедурах сигналы от дефектов слабо зависят от  $\alpha$ .

### **Стандартная обработка тепловизионных изображений**

**Тепловизионные изображения.** Одной из основных функций тепловизора является визуализация распределения температуры, осуществляемая с помощью термограмм (тепловых изображений). Термограмма представляет собой изображения, каждый пиксель которого окрашивается определенным цветом (в зависимости от выбранной палитры и диапазона представления тепловизора или ПО для обработки тепловизионных данных). Тепловизоры подразделяются на измерительные и показывающие. В измерительных тепловизорах пиксельные амплитуды выражены в «радиационных» температурах, тогда как в показывающих (неизмерительных) тепловизорах оператор имеет дело с «условными» пиксельными амплитудами (**Рис. 3.8**).



**Рис. 3.8. Представление термограмм**

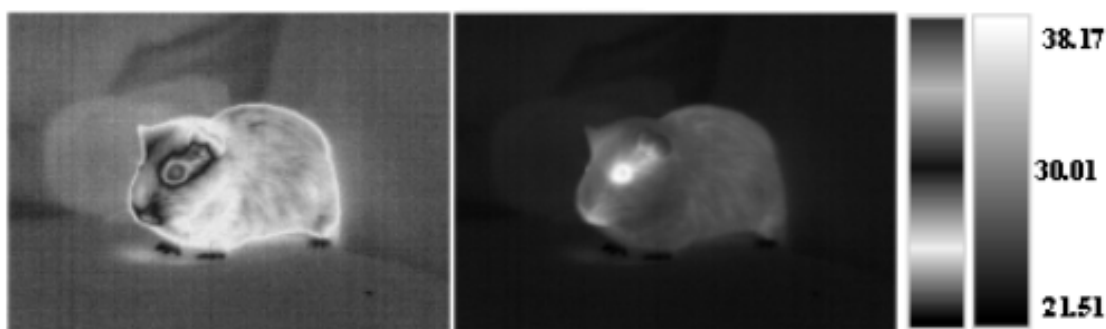
Амплитудные значения, соответствующие различным цветам, представляются числами в формате RGB. Число в таком формате (обычно целое 4-х байтовое число) содержит значения (числа от 0 до 255) трех интенсивностей: красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) цвета. В таком формате, число 0 соответствует черному цвету (все интенсивности равны нулю), а число – 0xFFFFFFFF (в шестнадцатеричной системе) – соответствует белому цвету, число 0xFF0000 – красному цвету.

Численные значения температуры представляются в формате чисел с плавающей запятой.

**Выбор цветовой палитры.** Тепловые изображения являются псевдоцветовыми, т.е. связь палитры цветов с температурой задается оператором. Существует множество палитр, входящих в программное обеспечение тепловизионных комплексов. На практике часто используют палитры «Радуга» (Rainbow) и «Цвета калия железа» (Iron). При правильном подборе палитры зоны с близкими температурами можно представить с помощью контрастных цветов (см. **Рис. 3.9**), однако не следует преувеличивать значение палитры для повышения достоверности обнаружения скрытых дефектов.

Число цветов для представления температурной матрицы изменяется от 1 до 256, что связано с особенностями формирования изображений в операционной системе. Иными словами, каждый цвет имеет свой индекс и, исходя из пропорции, ему сопоставляется определенный интервал температур в выбранном динамическом диапазоне термограммы.

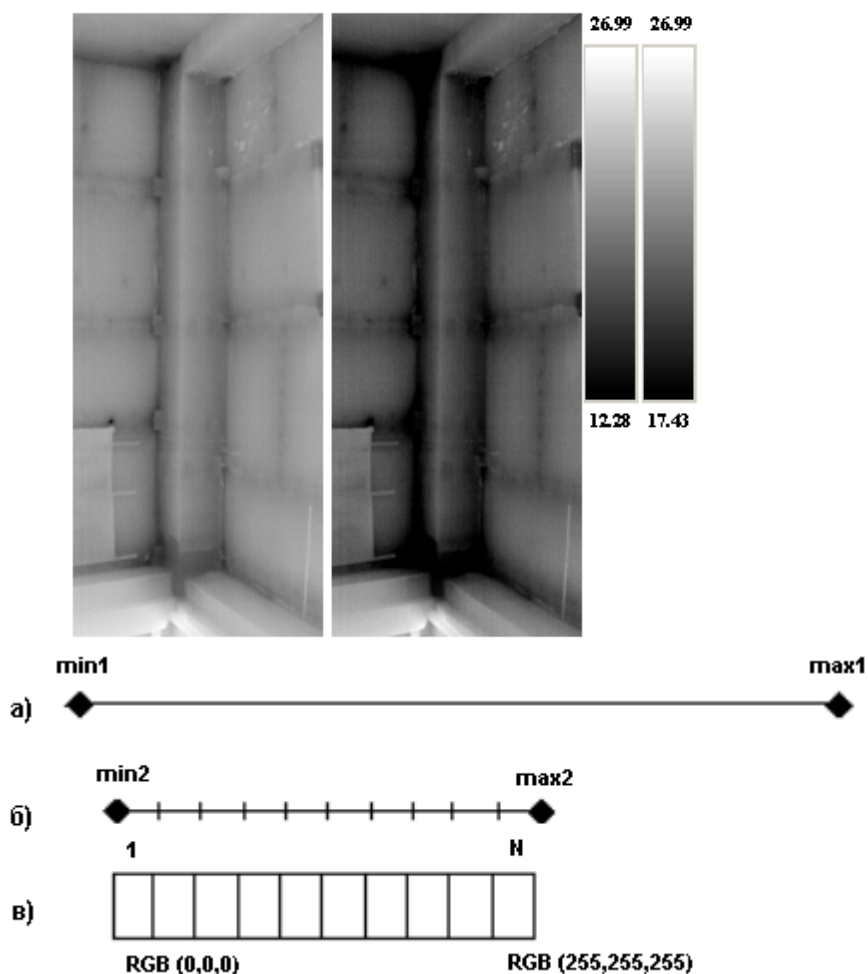
Псевдоцветовые изображения широко используются не только в тепловом контроле, поэтому возможности для работы с изображениями такого рода включены в математические редакторы MATLAB и MathCad.



*Рис. 3.9. Изображения для различных цветowych палитр (многоцветная палитра и серая полутоновая палитра)*

**Изменение динамического диапазона при представлении термограмм.** В современных тепловизорах глубина оцифровки сигнала достигает 14 бит, что позволяет с минимальной погрешностью дискретизации оцифровывать весь возможный диапазон изменений температур (задается оператором при работе с тепловизором). Получаемая температурная матрица зачастую содержит зоны аномально высоких (выбросов) или аномально низких сигналов (фона), которые не несут полезной информации, поэтому для просмотра слабоконтрастных деталей

температурной матрица она может быть представлена оператору в определенном диапазоне амплитуд (амплитудном окне) (см. **Рис. 3.10.**).



**Рис. 3.10.** Изменение динамического диапазона при представлении термограмм

- а) динамический диапазон температурной матрицы
- б) динамический диапазон для представления теплового изображения (делится на  $N$  частей)
- в) таблица цветов ( $N$  частей) для сопоставления значения температуры цвету

### **Хранение тепловизионных изображений**

Тепловизоры сохраняют термограммы в собственном формате файлов, обычно неизвестном пользователю. Для работы с термограммами вместе с тепловизором поставляется дополнительное ПО, которое позволяет оператору просматривать термограммы, составлять отчеты по результатам обследования, предоставляет ряд «инструментов» (точка, линия, эллипс, прямоугольник и т.д.) для измерения температуры в заданных пользователем областях. Более развитое программное обеспечение позволяет конвертировать термограммы в открытые форматы файлов, например формат файлов данных программы MATLAB (файлы с расширением «mat»), так чтобы пользователь мог использовать обширные возможности цифровой обработки данных. Размерность тепловизионных изображений (температурных матриц) может быть различна, используются следующие форматы: 320x240, 640x480, 128x128, 512x512. Современные модели

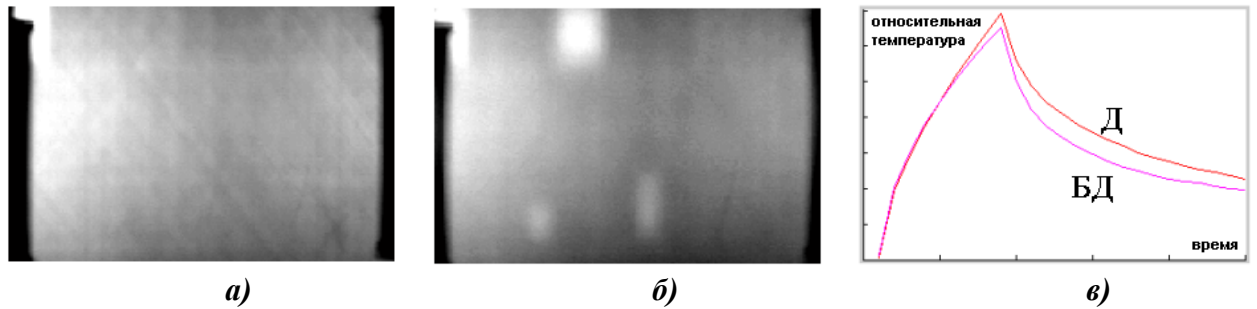
тепловизоров могут сразу сохранять изображения в виде файлов специального графического формата JPEG (радиометрический JPEG), которые кроме графической информации (теплового изображения) могут содержать данные о температуре, однако для этого необходимо открывать термограммы с помощью специализированного программного обеспечения.

Многие модели тепловизоров позволяют сохранять файлы термограмм на флеш-карту, которая вставляется в соответствующий разъем прибора. Сохранение изображений осуществляется при нажатии кнопки оператором (обычно используется при тепловизионных обследованиях, когда оператор сохраняет тепловое поле интересующего его объекта) или с помощью таймера, который можно настроить на определенный интервал записи (может использоваться при активном тепловом контроле, когда регистрируют температуры для поверхности объекта контроля). Некоторые тепловизоры позволяют сохранять термограммы непосредственно на жесткий диск компьютера с использованием интерфейса РСМСА с относительно низкой частотой записи (~6 Гц). Поскольку такая скорость может быть недостаточной для наблюдения быстроизменяющихся процессов, то большинство тепловизоров имеют стандартные видеовыходы. В этом случае частота смены изображений может составлять 30-50 Гц и выше, но теряется информация о температуре. В последние годы получила распространение цифровая запись термограмм в реальном времени через USB порт компьютеров или FireWire.

### ***Развитая обработка тепловизионных изображений***

Основными целями развитой обработки является повышение отношения сигнал-шум, т.е. так называемой «видности» дефектов. В ряде случаев алгоритмы развитой обработки позволяют представить всю последовательность развития температуры на поверхности одним изображением, с более высоким отношением сигнал-шум.

Обычно, работу алгоритмов развитой обработки проверяют на экспериментальных последовательностях, полученных для образцов с известными параметрами и конфигурацией дефектов. Рассмотрим применение некоторых алгоритмов для последовательности отражающей нагрев образца из углепластика, который содержит 5 дефектов (**Рис. 3.11**). Нагрев образца производился 2 лампами, расположенными справа и слева от образца.



**Рис. 3.11.** Две термограммы исходной последовательности (термограмма внутри импульса нагрева и на стадии охлаждения изделия из композиционного материала)

- а) термограмма внутри импульса нагрева
- б) на стадии охлаждения изделия из композиционного материала
- в) развитие температур для дефектной (Д) и бездефектной (БД) областей

**Нормализация на одно изображение.** В ТК термин «нормализация» означает деление динамических термограмм с целью подавить эффект неравномерного нагрева. Различают два типа нормализации: 1) нормализация 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 [5].

Рассмотрим последовательность ИК изображений  $T(i, j, \tau)$ , зарегистрированных 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:

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

где  $C_{norm}(i, j, \tau)$  – нормализованный контраст;  $T_{amb}(i, j)$  – температура окружающей среды, которая в общем случае может изменяться от точки к точке;  $T_{norm}(i, j, \tau_{norm})$  – нормализующее изображение. Видно, что нормализованный контраст фактически представляет собой отношение между двумя избыточными температурами, при этом подавляются так называемые «мультипликативные» шумы, амплитуда которых пропорциональна избыточной температуре нагрева. 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 импульсном ТК в качестве нормализующей часто выбирают термограмму в конце нагрева. Схема нормализации на одно изображение показана на **Рис. 3.12**.

Пример нормализации последовательности термограмм, полученной при импульсном ТК углепластикового композита, представлен на **Рис. 3.13**. В

конце нагрева исходная термограмма отчетливо показывает неравномерный нагрев двумя лампами, из которых более мощный поток создавался левой лампой (Рис. 3.13.а). 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 за счет снижения помехи, обусловленной неравномерным нагревом.

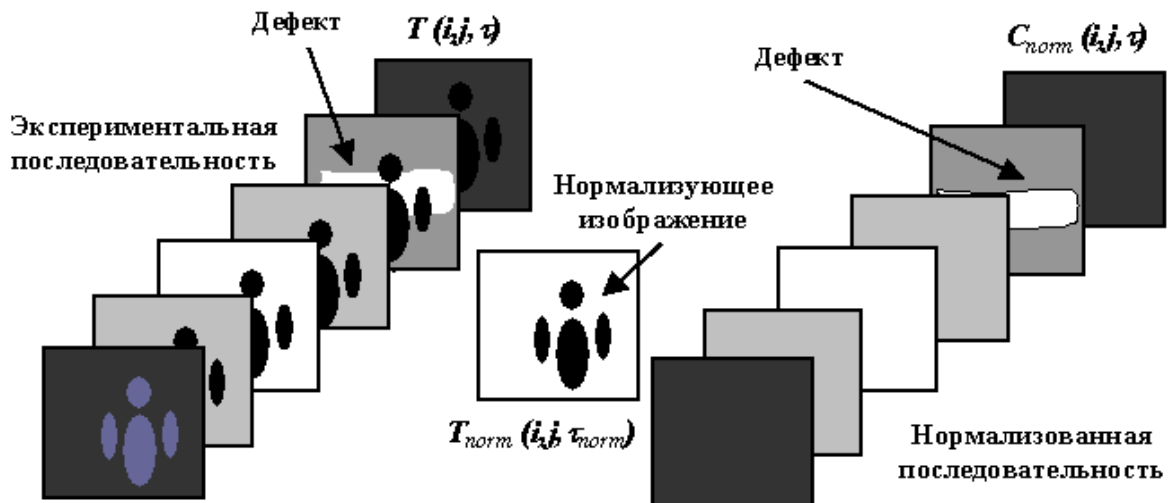


Рис. 3.12. Нормализация динамической последовательности на одно изображение

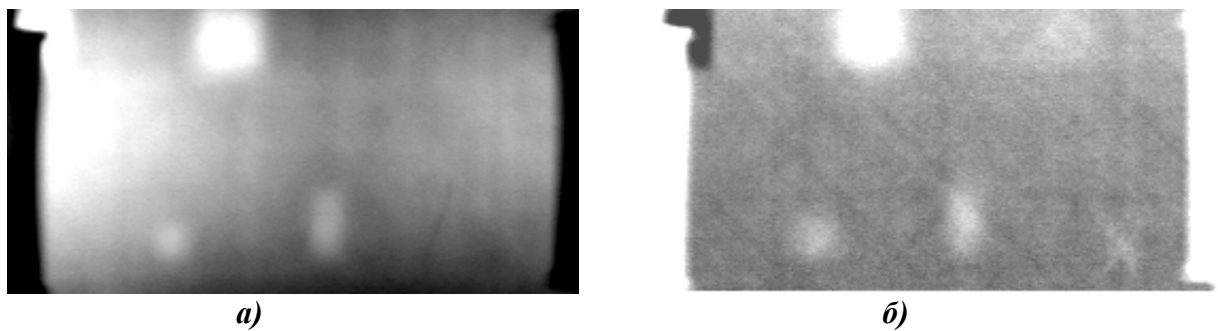


Рис. 3.13. Нормализация термограмм

- а) исходная термограмма в конце нагрева
- б) одна из нормализованных термограмм

**Фурье-анализ.** Метод *импульсной фазовой термографии* (pulse phase thermography), предложенный в ТК Малдагом, Маринетти и Кутюрье основан на применении преобразования Фурье к функции изменения температуры во времени  $T_{ij}(\tau)$  [5, 18].

Импульсная фазовая термография есть воплощение идеи учета *тотальных* различий в процессах временного развития температуры в бездефектных и дефектных зонах. Известно, что поглощенный поверхностью твердого тела импульс тепловой энергии любой формы (предпочтительнее иметь дело с прямоугольными импульсами или импульсами Дирака)

характеризуется спектром частот, которые проникают вглубь тела, претерпевая рассеяние по энергии (амплитуде) и запаздывание во времени (сдвиг по фазе). Отдельные частотные компоненты конкурируют сложным образом, участвуя в создании колоколообразного сигнала в зоне дефекта. Этот процесс можно трактовать как распространение тепловых пакетов, перемещающихся между поверхностями изделия и дефекта. С ростом глубины проникновения теплового пакета количество высокочастотных компонент в спектре динамической температуры уменьшается. Таким образом, слои изделия выполняют роль своеобразных частотных фильтров. Качественно это означает, что приповерхностная область изделия может зондироваться относительно высокочастотными волнами, что используется в методе тепловых волн, а глубинные дефекты предпочтительно выявлять низкочастотными волнами. При этом специфическую информацию несет также сдвиг фазы между возбуждающей и регистрирующей волной.

Феноменологически предпочтительность использования импульсной термографии на фронтальной поверхности можно проиллюстрировать следующим рассуждением. Известно, что: 1) более глубокие дефекты характеризуются более слабыми температурными сигналами; 2) в спектре Фурье прямоугольных или им подобных импульсов низкочастотные компоненты несут больше мощности, чем высокочастотные. С учетом того, что обнаружение глубоких дефектов требуют волн более низких частот, вышесказанное означает, что стимуляция изделия прямоугольным импульсом (или импульсом Дирака) является оптимальной для обнаружения скрытых дефектов по всей глубине изделия. Очевидно, что на практике возможны ограничения, связанные с технологически доступной мощностью нагрева, спектральным составом потока нагрева, допустимым перегревом образца, шумами и т.п.

Основное отличие Фурье-анализа, используемого в ТК, от стандартных процедур обработки двумерных изображений заключается в его «одномерности», поскольку оно применяется к временному развитию сигналов.

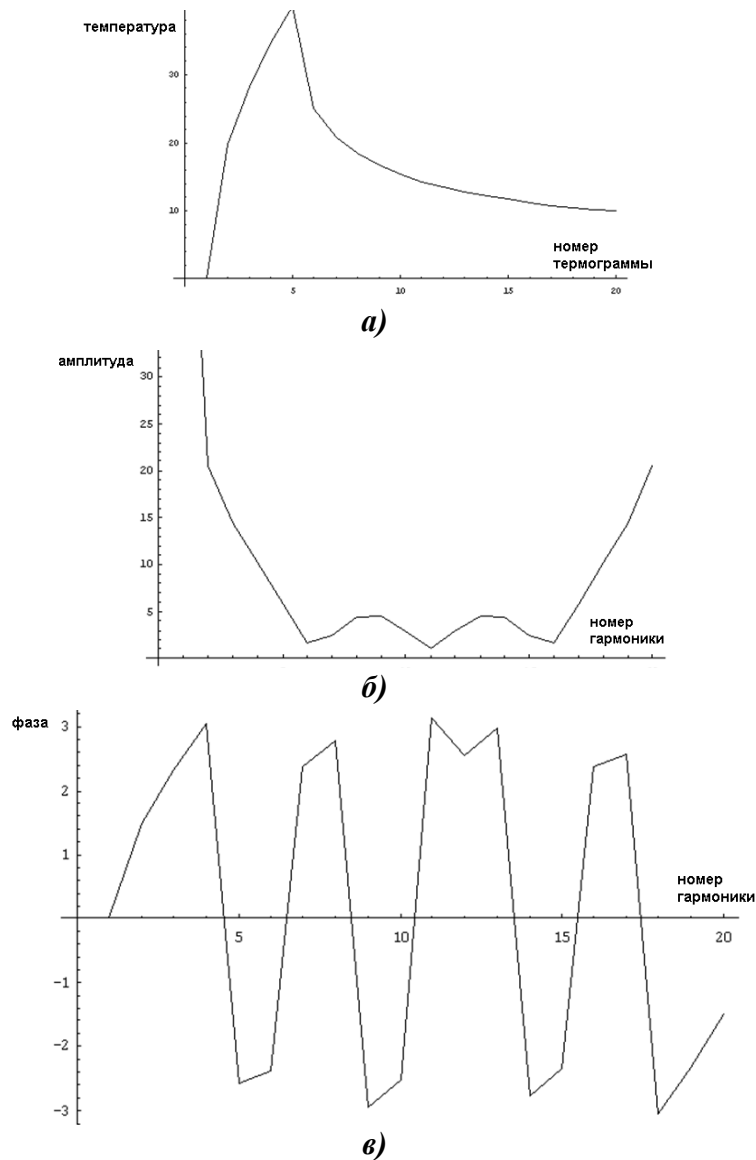
Таким образом, Фурье-анализ в ТК используют для исследования динамических последовательностей ИК изображений. Определенная трудность в интерпретации изображений фазы (*фазограммы*) и амплитуды (*модулограммы*) в Фурье-пространстве состоит в том, что результаты преобразования Фурье зависят как от величины интервала оцифровки температурных данных, так и от числа этих интервалов. Тем самым подвергается сомнению возможность получения обобщенных калибровочных зависимостей, которые позволили бы, например, осуществлять тепловую томографию путем анализа сдвига фаз.

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

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

где  $f_n$  – дискретная исходная функция, содержащая  $N$  отсчетов ( $N$  термограмм в последовательности),  $s$  – частота,  $j$  – мнимая единица,  $n$  – номер отсчета.

Последовательность  $T$  изображена на **Рис. 3.14а**. Модуль  $M$  и аргумент (фаза)  $\Phi$  преобразования Фурье для данной последовательности приведены на **Рис. 3.14б,в**.



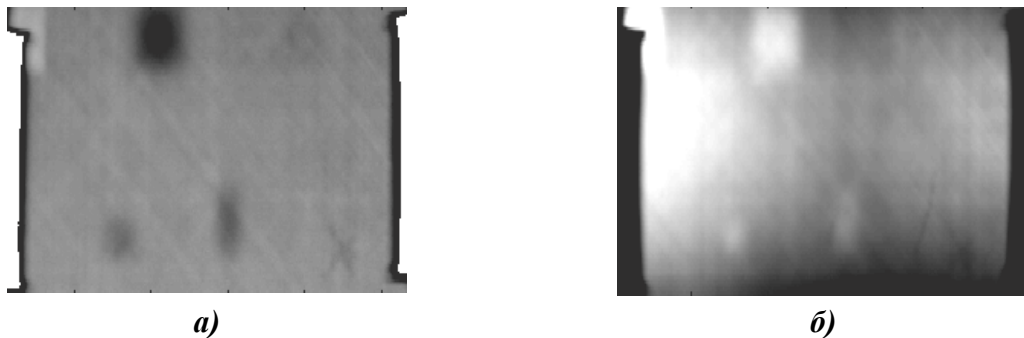
**Рис. 3.14. Типичная функция изменения поверхностной температуры во времени (а) и параметры ее Фурье образа: модуль (б) и фаза (в)**

Подобно исходной последовательности, графики модуля и фазы преобразования Фурье содержат 20 отсчетов, причем *Точка 1* соответствует нулевой частоте. Вследствие эффекта отражения (aliasing), полезную информацию несут частоты, соответствующие отсчетам от 1 до 10 (информация в *Точках* от 11 до 20 являются зеркальным отражением первых 10-ти точек).



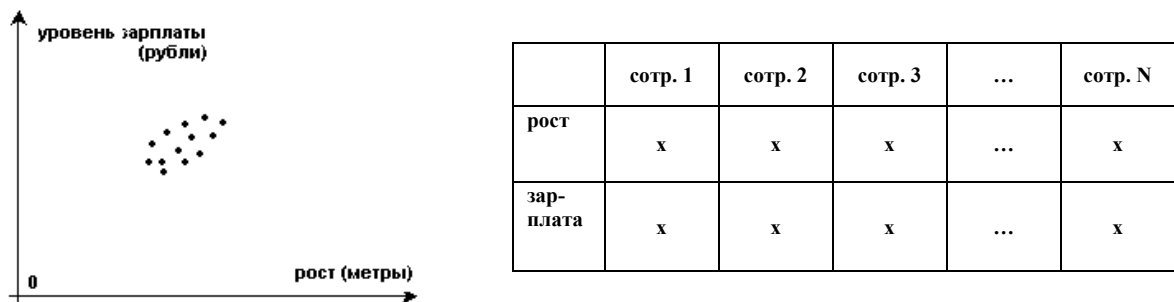
Важно подчеркнуть, что, в отличие от ряда других алгоритмов ТК, например, метода оптимального наблюдения или динамической тепловой томографии, импульсная фазовая термография требует накопления информации в течение длительного времени, что позволяет анализировать низкие частоты, необходимые для обнаружения глубоколежащих дефектов. С другой стороны, интервал времени между соседними термограммами должен быть мал, чтобы обеспечить высокие частоты в Фурье-спектре, необходимые для обнаружения приповерхностных дефектов (при выполнении этого условия, центральная часть спектра на **Рис. 3.14б** спадает почти до нуля). Поэтому импульсная фазовая термография обычно имеет дело с последовательностями, состоящими из нескольких сотен изображений.

К настоящему времени, преимущества импульсной фазовой термографии были продемонстрированы в основном на качественном уровне, однако чувствительность метода к структурным дефектам настолько высока, что его используют в качестве тестового при проверке других алгоритмов.



**Рис. 3.15. Применение Фурье-анализа к исходной последовательности**  
 а) изображение фазы на 3 частоте  
 б) изображение модуля амплитуды для нулевой частоты

**Анализ главных компонент.** PCA (Principal Component Analysis) – метод, широко применяющийся при обработке многомерных данных (**Рис. 3.16.**) [19]. В качестве таких данных может служить, например информация по сотрудникам фирмы (уровень зарплаты, возраст, рост и т.д.). В этом случае число данных (или количество точек в многомерном пространстве) определяется количеством опрашиваемых сотрудников, а размерность данных определяется количеством пунктов, по которым опрашиваются сотрудники.



**Рис. 3.16. Представление многомерных данных (графически и таблично)**

В общем случае мы можем иметь размерность данных  $M$  и количество измерений  $N$  (соответственно матрица для обработки имеет размерность  $M \times N$ ). Поскольку обычно некоторые измерения связаны друг с другом (т.е. имеется избыточность в данных), то имеется возможность уменьшить размерность данных (число  $M$ ), вводя  $K < M$  новых осей, на которые проецируются исходные данные.

В качестве примера избыточности можно привести информацию о стоимости различных товаров в рублях и долларах (исходя из фиксированного курса). Ясно, что в этом случае от двумерного пространства можно перейти к одномерному.

Полученные новые оси называются главными компонентами. Главная компонента определяется координатой новой оси в старой системе координат. Причем соблюдается ортогональность для новой системы координат (взаимная перпендикулярность главных компонент), т.е. должно выполняться свойство  $V * V^T = E$ , где  $E$  – единичная матрица, а  $V$ , матрица, состоящая из векторов, которые являются главными компонентами. Основное свойство главных компонент состоит в том, что при сохранении свойства ортогональности для них они расположены в пространстве так, что соответствуют направлениям максимальной вариации первоначальных данных.

Если принять, что исходная таблица данных представляется с помощью матрицы  $A$  (размерность  $M \times N$ ), то порядок вычисления главных компонент следующий: 1) вычисляется «рассеивающая» или корреляционная матрица  $S$  (размерностью  $M \times M$ ):  $S = (A - A_{mean})(A - A_{mean})^T$ , где  $A_{mean}$  матрица состоящая из  $N$  раз вектора средних значений каждой строки матрицы  $A$ , знак  $T$  означает транспонирование; 2) для матрицы  $S$  вычисляются собственные вектора и собственные значения. Каждому собственному значению матрицы  $S$  соответствует один собственный вектор. Полученные собственные вектора и являются главными компонентами для новой системы координат. Чем больше величина собственного значения, тем больше стандартное отклонение исходных данных вдоль соответствующей главной оси.

Расставляя собственные вектора в порядке убывания собственных значений получаем матрицу  $U$ , размерность которой  $M \times N$  может быть уменьшена до размерности  $M \times K$ , если исключить собственные вектора, отвечающие минимальным собственным значениям (при исключении можно руководствоваться принципом Парето – оставлять только первые 20% собственных векторов). Новый набор данных, соответствующий проекции исходного набора данных на полученные собственные вектора получаем умножением  $A' = U^T A$ .

**Особенности применения метода главных компонент для обработки тепловизионных данных в динамической термографии.** Если рассматривать последовательность термограмм размерностью  $nr * nc * nt$ , где  $nr$  – число рядов в термограмме,  $nc$  – число столбцов,  $nt$  – число термограмм, то с точки зрения применения PCA возможно два подхода:

1) анализ временных компонент: в этом случае анализируем  $nt$  переменных (размерность исходных данных совпадает с числом термограмм  $nt$ ), для каждой из которых было проведено  $nr*nc$  измерений. Вектор столбец средних, из которого строится матрица  $A_{mean}$ , в этом случае представляет собой средний временной профиль. Размерность ковариационной матрицы в этом случае является  $nt*nt$ . После применения PCA и уменьшения размерности остаются несколько переменных отражающих связь исходных переменных между собой во времени. В этом случае при проецировании исходной переменной  $X$  на новые факторы размер термограммы остается неизменным, т.е.  $nr*nc$  элементов, но число переменных (число термограмм и размерность исходных данных) может быть уменьшено.

2) анализ пространственных компонент: в этом случае анализируем  $nr*nc$  переменных для каждой из которых проводится  $nt$  измерений. Вектор столбец средних, из которого строится матрица  $M$ , в этом случае представляет собой усредненное изображение. Размерность ковариационной матрицы в этом случае определяется как  $ne*ne$ , где  $ne = nr*nc$ . После применения PCA и уменьшения размерности остаются несколько переменных, отражающих особенности развития температуры в пространстве. При проецировании исходной переменной  $X$  на уменьшенное число главных факторов изменяются геометрические размеры термограммы (числа  $nr$  и  $nc$ ), что приводит к искажению размеров термограммы, а также к сложности интерпретации полученных результатов. С вычислительной точки зрения анализ пространственных компонент также трудно выполним. Если принять  $nr = 240$ ,  $nc = 320$ ,  $nt = 150$ , что может характеризовать типичную последовательность термограмм, то при анализе временных компонент размер ковариационной матрицы составляет  $150*150$  элементов, а при анализе пространственных компонент размер ковариационной матрицы составляет  $76800 * 76800$  элементов, что трудно выполнимо даже при современных доступных объемах оперативной памяти компьютеров.

Имеется возможность использования этого метода в задачах дефектометрии. При этом главные компоненты следует рассчитывать для тестовой последовательности, причем каждая компонента сопоставляется с определенным видом дефекта. Далее экспериментальная последовательность проецируется на полученные главные компоненты, выделяя, таким образом, из экспериментальной последовательности изображения дефектов определенного класса.

Ниже приводится m-функция «Pca» для пакета MATLAB, предназначенная для вычисления главных компонент двухмерной матрицы и проекции исходного набора данных на найденные компоненты.

```

%%%%%%%%%%
function [ newData, pcs, vals] = Pca( data, cType)
%function [ newData, pcs, vals] = Pca( data, cType)
%data - матрица данных размерностью m * n
%m - число переменных, n - число наблюдений
%cType - тип матрицы для вычисления главных компонент
%newData - проекция исходных данных на главные компоненты
%(формат такой как у data)

```

```

%pcs - главные компоненты (вектора-столбцы)
%vals - собственные значения

%вычитать среднее значение не требуется, т.к. при расчете
%корреляционной или ковариационной матрицы это делается автоматически
% [nr, nc] = size( data);
% mn = mean( data, 2);
% data = data - repmat( mn, 1, nc);

%расчитываем ковариационную или корреляционную матрицу
if( cType == 'cov')
    cMat = cov( data');
else
    if( cType == 'cor')
        cMat = corrcoef( data');
    else
        error('cType must be: cor or cov');
    end
end;

[eVect, eVals] = eig( cMat);
eVals = diag( eVals);

[temp, inds] = sort( -1*eVals);
eVect = eVect( :, inds);

pcs = eVect;
newData = pcs' * data;
vals = eVals( inds);

```

Для прямого и обратного преобразования исходной трехмерной последовательности термограмм в двумерную матрицу можно использовать m-функции «SeqForTimePca» и «TimePcaForSeq»:

```

function Res = SeqForTimePca( Seq)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%function Res = SeqForTimePca( Seq)
%преобразование 3 мерной последовательности [nr, nc, nt]
%в последовательность [nt, nr*nc]

[nr, nc, nt] = size( Seq);
Res = reshape( Seq, nr*nc, nt);
Res = Res';

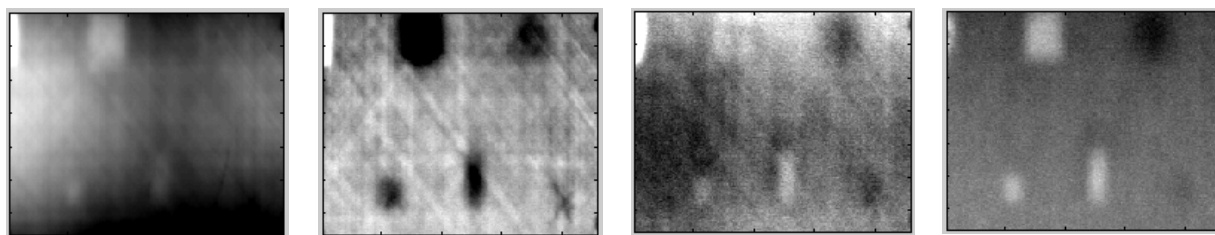
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Res = TimePcaForSeq( M, nr, nc)
%function Res = TimePcaForSeq( M, nr, nc)
%преобразование 2 мерной последовательности [nt, nr*nc]
%в последовательность [nr, nc, nt]

nt = size( M, 1);

M = M';
Res = reshape( M, nr, nc, nt);

```

На **Рис. 3.17.** приведены результаты применения метода анализа главных компонент к тестовой последовательности. Как можно видеть, в ряде случаев метод анализа главных компонент обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум по сравнению с исходными термограммами.



*Рис. 3.17. Проекция исходного набора данных на 1, 2, 3 и 4-ю главные компоненты*

Помимо вышеописанных процедур в ТК в последние годы разрабатываются и другие алгоритмы обработки данных, в частности, полиномиальная аппроксимация, преобразования вейвлет, Лапласа, Хью, Радома и т.п., а также нейронные сети (см. [7, 19, 20]). Их описание выходит за рамки данного пособия.

## **Глава 4. Основы ИК термографии. Современные ИК тепловизоры и пирометры.**

### ***Историческая справка***

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 видимого спектра. Ученый проводил серию опытов, чтобы выяснить, какой нагревательной способностью обладают различные участки солнечного спектра. Исследуя оптический спектр, спроецированный на стол с помощью призмы, Гершель подносил к ним чувствительный ртутный термометр. Разные участки спектра по-разному нагревали термометр. Гершель был весьма удивлен, когда нагрев термометра стал возрастать при перемещении термометра за красную границу оптического диапазона спектра. Ученый пришел к выводу, что существует инфракрасное, или тепловое, излучение, не видимое глазом, но регистрируемое термометром (**Рис. 4.1. а**) [5, 21, 22].

Прообразом первых тепловизоров явилось устройство Джорджа Гершеля (сына Уильяма Гершеля), который регистрировал тепловое излучение объектов по неравномерному испарению спирта на тонкой фильтровальной бумаге (эта идея затем была использована в эвапорографах). Примечательно, что в своих опытах, датированных 1840 г., Д.Гершель применял распространенный сейчас термин «термограмма».

В 1900 г. произошло второе рождение ИК методов исследований в качестве строгой научной дисциплины, что было обусловлено, с одной стороны, фундаментальными исследованиями Планка, Эйнштейна, Кирхгофа, Голицына, Вина в области теории теплового излучения, а с другой стороны – прогрессом в технологии детекторов ИК излучения.

Мощный толчок развитию тепловидения дало развитие полупроводниковой электроники в 60-70х годах прошлого века. В настоящее время тепловизионные системы с оптико-механическим сканированием заменены матричными, появились неохлаждаемые болометрические матрицы, улучшены метрологические характеристики тепловизоров. Создан класс доступных по цене коммерческих тепловизоров, пригодных для применения в тепловизионных службах предприятий.

### ***Спектр электромагнитных колебаний***

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 электромагнитного спектра с длинами волн от 0.75 мкм до 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами

(Рис. 4.1. б). В тепловидении терминами "коротковолновой" и "длинноволновой" участки спектра, как правило, обозначают диапазоны 3-5.5 мкм и 7-14 мкм, что связано со спектральными диапазонами работы популярных ИК детекторов на основе антимонида индия (InSb) и тройных соединений (CdHgTe).

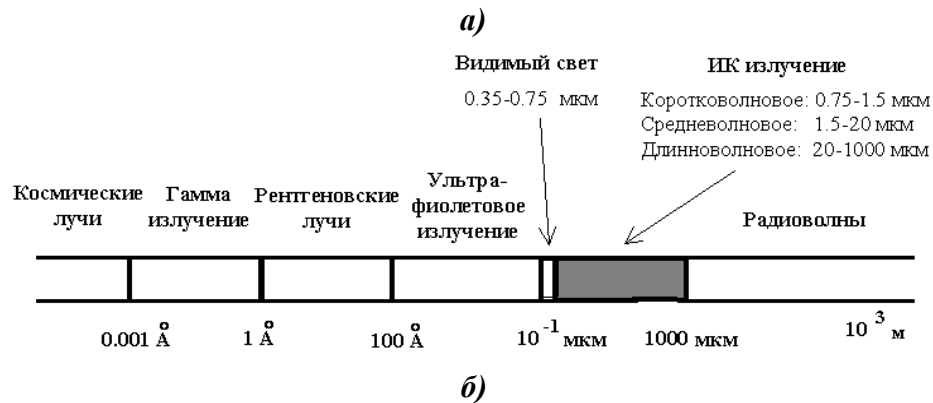
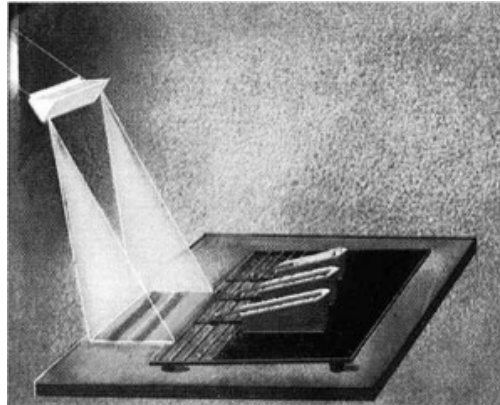


Рис. 4.1. Опыт Гершеля с термометром и электромагнитный спектр

### Законы теплового излучения

Согласно закону Планка, спектральная поверхностная плотность мощности потока излучения физического объекта определяется его температурой  $T$  и спектральной излучательной способностью (коэффициентом излучения)  $\varepsilon_\lambda$ :

$$R_\lambda(T, \varepsilon_\lambda) = \frac{\varepsilon_\lambda C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \text{ [Вт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1}\text{]};$$

$$C_1 = 3.7418 \cdot 10^8 \text{ [Вт м}^{-2} \text{ мкм}^4\text{]}; C_2 = 1.4388 \cdot 10^4 \text{ [мкм К]}.$$

Закон Планка первоначально был получен для абсолютно черного тела – АЧТ (ВВ – Black Body), испускающего максимум возможной при данной температуре энергии, что имеет место при  $\varepsilon_\lambda^{BB} = 1$ .

Графики функции Планка  $R_\lambda^{BB}$  для различных температур АЧТ согласно формуле (6.2) показаны на Рис. 4.2, откуда следует, что: 1) для каждой температуры максимум мощности излучения имеет место на определенной длине волны, которая возрастает с уменьшением температуры; 2) мощность излучения резко спадает с уменьшением температуры. Эти две особенности

теплового излучения тел выражаются соответственно законами Вина и Стефана-Больцмана.

$$R_{\lambda}(T), \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$$

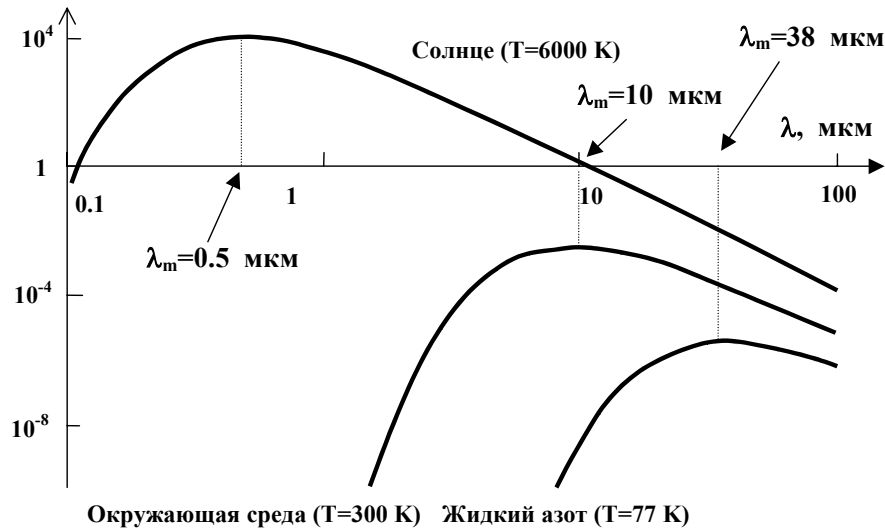


Рис. 4.2. Закон Планка для АЧТ

Закон Вина для длины волны  $\lambda_m$ , характеризующейся максимальным значением функции Планка, выражается в следующем виде:

$$\lambda_m [\text{мкм}] = \frac{2898}{T [K]} \approx \frac{3000}{T}. \quad (4.1)$$

Максимум спектральной плотности мощности излучения при температуре объектов от 0 до 100°C приходится на интервал длин волн от 8 до 10 мкм.

В диапазоне длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_2$  поверхностную плотность мощности излучения определяют по формуле:

$$R(T, \varepsilon_{\lambda}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}(T, \varepsilon_{\lambda}) d\lambda [\text{Вт м}^{-2}]. \quad (4.2)$$

Спектральный ход коэффициента излучения  $\varepsilon_{\lambda}$  может быть весьма причудливым, в особенности у газов, которые характеризуются линейчатым спектром излучения.

Если поверхность поглощает все лучи, кроме видимого света, она не кажется черной, хотя по лучистым свойствам она может быть близка к абсолютно черному телу, поскольку имеет высокую поглощательную способность (например, лед и снег  $\alpha = 0.95 \div 0.98$ ).

**Серое тело** — это идеальное тело, у которого спектральный коэффициент излучения  $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon \leq 1$  для всех длин волн является постоянной величиной. Таким образом, серые тела поглощают не всю падающую на них лучистую энергию.

В ИК термографии преимущественно используют коротковолновый (2-5 мкм) и длинноволновый (7-14 мкм) спектральный диапазоны, что соответствует, с одной стороны, окнам преимущественной прозрачности



атмосферы, а с другой стороны подкреплено наличием коммерчески доступных приемников излучения, в частности, на основе InSb и CdHgTe.

В диапазоне всех длин волн от 0 до  $\infty$  поверхностная плотность потока излучения для серого тела выражается *законом Стефана-Больцмана*:

$$R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \div \infty) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (4.3)$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Например, если в помещении с температурой  $20^\circ\text{C}$  находится человек с температурой на поверхности одежды  $27^\circ\text{C}$ , то собственное излучение человека составляет  $460 \text{ Вт м}^{-2}$ , однако вследствие обратного излучения среды результирующий поток будет всего лишь около  $40 \text{ Вт м}^{-2}$ , что при площади поверхности тела около  $2 \text{ м}^2$  эквивалентно радиационным тепловым потерям всего лишь  $80 \text{ Вт}$  (приблизительно столько же теряется за счет конвекции).

В радиационной пирометрии удобно использовать следующее монохроматическое представление функции Планка:

$$R_\lambda(T) = K(\lambda) T^n, \quad (4.4)$$

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 (4.4) следует:  $n = \frac{\partial R_\lambda(T)/R_\lambda(T)}{\partial T/T}$ .

### **Закон Ламберта**

Интенсивность излучения  $J$  [ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ ср})$ ] – удельная лучистая энергия, испускаемая с единицы площади поверхности за единицу времени в единичный телесный угол.

Существует различные виды поверхностей (**диффузные поверхности**), для которых выполняется закон Ламберта:

$$J_\beta = J_0 \cos \beta, \quad (4.5)$$

где  $J_0$  – интенсивность излучения вдоль нормали к поверхности, а  $J_\beta$  – интенсивность излучения под углом  $\beta$  к нормали.

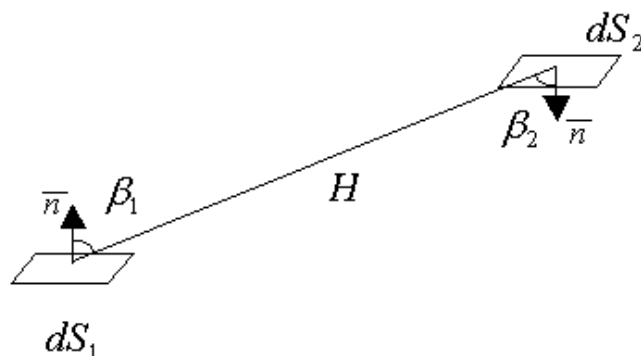
Важными следствиями из закона Ламберта является то что плотность потока излучения  $R$  (удельная лучистая энергия испускаемая в телесный угол  $\pi$  стерадиан или полупространство) или лучеиспускающая способность в  $\pi$  раз больше интенсивности излучения вдоль нормали  $J_0$ :

$$R = \pi J_0 = \sigma T^4 \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Важно отметить, что для диффузных поверхностей коэффициент излучения  $\varepsilon$  не зависит от направления  $\beta$  к нормали к поверхности.

Закон Ламберта позволяет рассчитать энергетическую освещенность (облученность), создаваемую излучателем площадью  $dS_1$  на участке площадью  $dS_2$ , расположенном на расстоянии  $H$  от  $dS_1$  (**Рис. 4.3**). Поток излучения, исходящий от участка  $dS_1$  под телесным углом  $d\Omega_1$ :

$$d\Phi = J_0 \cos \beta_1 dS_1 d\Omega_1, \text{ где } d\Omega_1 = dS_2 \cos \beta_2 / H^2 \text{ [8].}$$



**Рис. 4.3. Расчет энергетической освещенности**

Тогда освещенность определится как  $R_2 = d\Phi / dS_2 = R_1 \cos \beta_1 dS_1 \cos \beta_2 / (\pi H^2)$ . Обычно ИК системы работают при углах  $\beta_1$  и  $\beta_2 \approx 0$ , следовательно  $R_2 = R_1 dS_1 / (\pi H^2)$ .

Закон Ламберта справедлив для черных тел и тел с диффузным характером излучения. Однако многие поверхности не подчиняются этому закону. Так, для полированных металлов (полированная алюминиевая бронза, полированный висмут) коэффициент излучения при  $\beta = 60 \div 80^\circ$ , превышает коэффициент излучения в направлении нормали к поверхности. Для корунда, окисленной меди коэффициент излучения в направлении нормали больше чем в других направлениях.

### **Закон Кирхгофа**

При падении излучения на тело (**Рис. 4.4**) имеют место следующие оптические феномены: 1) поглощение с коэффициентом  $\alpha_\lambda$ ; 2) отражение с коэффициентом  $\rho_\lambda$ , и 3) пропускание с коэффициентом  $\tau_\lambda$ . Очевидно, что на любой длине волны

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \tag{4.6}$$

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:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda. \tag{4.7}$$

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).

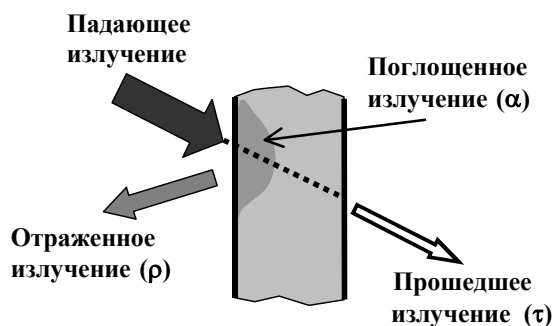


Рис. 4.4. Взаимодействие излучения с телом

### Схема и уравнение 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 (4.6) приобретает вид:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad \text{или} \quad \varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1. \quad (4.8)$$

Выходной электрический сигнал ИК тепловизора пропорционален полному поглощенному потоку:  $U \sim \Phi_{tot}$ . Полный поток включает три компоненты: собственный поток объекта термографирования, поток от других (окружающих) объектов, отраженный от исследуемого объекта и поток, генерируемый атмосферой [5]:

$$\Phi_{tot} = \varepsilon_{ob} \tau_{atm} \Phi_{ob} + (1 - \varepsilon_{ob}) \tau_{atm} \Phi_{amb} + (1 - \tau_{atm}) \Phi_{atm} \quad (4.9)$$

где  $\varepsilon_{ob}$  – коэффициент излучения исследуемого объекта;  $\tau_{atm}$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $\Phi_{ob}$  – собственный поток исследуемого объекта (в предположении АЧТ);  $\Phi_{amb}$  – поток от других объектов (в предположении АЧТ);  $\Phi_{atm}$  – поток, генерируемый атмосферой: (в предположении АЧТ).

Аналогичное уравнение справедливо для электрических сигналов, считая, что  $U \sim \Phi$ :

$$U_{tot} = \varepsilon_{ob} \tau_{atm} U_{ob} + (1 - \varepsilon_{ob}) \tau_{atm} U_{amb} + (1 - \tau_{atm}) U_{atm} \quad (4.10)$$

Это уравнение можно решить относительно  $U_{ob}$ :

$$U_{ob} = \frac{1}{\varepsilon_{ob} \tau_{atm}} U_{tot} - \frac{1 - \varepsilon_{ob}}{\varepsilon_{ob}} U_{amb} - \frac{1 - \tau_{atm}}{\varepsilon_{ob} \tau_{atm}} U_{atm} \quad (4.11)$$

Уравнение (4.11) используется в современных тепловизорах для определения истинных температур. При этом термографист должен ввести следующие необходимые для расчета истинной температуры параметры: коэффициент излучения объекта контроля, эффективная температура окружающих объектов (этот параметр не всегда просто оценить),

температуру атмосферы и расстояние между тепловизором и объектом (для расчета пропускания атмосферы).

В технической диагностике на расстояниях менее 30-50 м поглощением в атмосфере можно пренебречь, т.е.  $\tau_{atm} = 1$ , тогда уравнение (4.9) может быть упрощено (Рис. 4.5):

$$\Phi_{tot} = \varepsilon_{ob} \Phi_{ob} + (1 - \varepsilon_{ob}) \Phi_{amb} \quad (4.12)$$

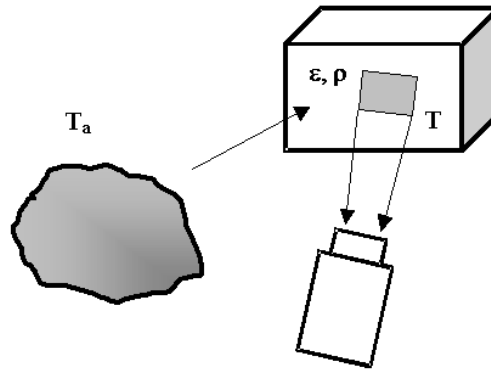


Рис. 4.5. Схема ИК термографирования объекта

Ранее указывалось, что тепловой поток в любом спектральном интервале может быть выражен через температуру следующим образом:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}^{AQT}(T) d\lambda = T^n, \text{ где } n - \text{ параметр, зависящий от длины волны. Тогда}$$

последнее уравнение может быть представлено в виде:

$$T_{ap}^n = \varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_{amb}^n, \quad (4.13)$$

где  $T_{ap}$  – кажущаяся (apparent), или радиационная температура.

### Проблема коэффициента излучения

Для двух наиболее используемых спектральных интервалов 3-5.5 и 7-14 мкм параметр  $n$  в формуле (4.13) соответственно равен:  $n = 10.11 \approx 10$  и  $n = 4.83 \approx 5$ . Уравнение (4.13) наглядно показывает связь между истинной температурой  $T$  исследуемого объекта и радиационной температурой  $T_{ap}$ .

Последнее выражение позволяет получить связь изменений  $\Delta T$  и  $\Delta \varepsilon$  в условиях реального термографирования [5]:

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{n} \left[ 1 - \left( \frac{T_{amb}}{T} \right)^n \right] \left| \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right|. \quad (4.14)$$

Отсюда видно, что при  $T = T_{amb}$  флуктуации коэффициента излучения полностью компенсируются. Такая ситуация, например, может иметь место в строительной ИК термографии (см. пример ниже [5]).

**Пример.** Пусть стена здания находится при температуре  $T = 263$  К ( $-10^{\circ}\text{C}$ ). Температура окружающей среды и облачного неба  $T_{amb} = 258$  К ( $-15^{\circ}\text{C}$ ). 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 Таблицы 4.1 следует, что при переходе от кирпичной

кладки к штукатурке  $\Delta\varepsilon = 0,94 - 0,91 = 0,03$ . Тогда из формулы (4.14)  $\Delta T \approx 0,15^\circ\text{C}$  для обоих диапазонов 3-5,5 мкм и 7-14 мкм. В данном случае окружающая среда является источником компенсирующего излучения, обуславливающего снижение влияния флуктуаций коэффициента излучения на тепловизионные измерения.

**Таблица 4.1**

**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
Лак 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 не гладкий	0,97
Пенополиуретан гладкий	0,98

Если не учитывать излучение окружающих объектов, то связь приращений  $\Delta T$  и  $\Delta\varepsilon$  для серых тел может быть получена из закона Стефана-Больцмана:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}. \quad (4.15)$$

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 ( $T = 300\text{ K}$ ) эквивалентные шумовые флуктуации температуры будут  $\Delta T = \pm 1.7^\circ\text{C}$ , что, например, значительно превышает объявленную паспортную чувствительность современных тепловизоров (до  $0.03^\circ\text{C}$ ).

Для анализа связи  $\Delta T$  и спектрального значения  $\Delta\varepsilon_\lambda$  удобна формула (4.4), включающая  $\varepsilon_\lambda$  в качестве сомножителя. Нетрудно получить следующее выражение:

$$\frac{\Delta R_\lambda(T)}{R_\lambda(T)} = n\varepsilon_\lambda \frac{\Delta T}{T}, \quad (4.16)$$

которая по форме аналогична (4.15). Для более коротких длин волн величина  $n$  возрастает, и, соответственно, повышается чувствительность ИК системы к изменениям температуры.

Следует еще раз подчеркнуть, что в условиях реального термографирования влияние коэффициента излучения следует учитывать по формуле (4.14).

Важный для ТК вывод можно получить из выражений (4.4) и (4.16), если проанализировать отношение сигнал/шум  $S$  как отношение изменений сигналов  $\Delta R_\lambda(T)$ , вызванных изменениями  $\Delta T$  и  $\Delta\varepsilon$ :

$$S = \frac{(\partial R_\lambda(T)/\partial T) \Delta T}{(\partial R_\lambda(\varepsilon)/\partial T) \Delta\varepsilon} = n \frac{\Delta T/T}{\Delta\varepsilon/\varepsilon}. \quad (4.17)$$

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  $T_h$  (напомним, что в предыдущих главах температура нагрева обозначена  $T$ ). Тогда формулу (4.17) можно записать в виде:

$$S = 5 \frac{\lambda_m}{\lambda} \frac{1}{1 + T_{init}/T_h} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (4.18)$$

или, используя закон Вина  $\lambda_m \approx 3000/(T_{init} + T_h)$ , в окончательном виде:

$$S = 5 \frac{3000}{\lambda} \frac{T_h}{(T_{init} + T_h)^2} \frac{\Delta T/T_h}{\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda}, \quad (4.19)$$

где  $\Delta T/T_h = C^{run}$  есть текущий контраст температуры над дефектом. Из (4.19) 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  $100^\circ\text{C}$  ( $T_{init} = 300\text{ K}$ ) величина  $S$  возрастает в шесть раз. Строгая оптимизация температуры нагрева, то есть подводимой к объекту контроля энергии, связана с анализом спектрального поведения  $\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda$ .

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. На таких поверхностях

возникает множество ложных сигналов, обусловленных 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. Истинную температуры металлов следует измерять после нанесения на их поверхность хорошо излучающих покрытий.

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 масло, воду и другие материалы, которые обладают высокой излучательной способностью в ИК диапазоне, легко и равномерно наносятся на поверхность и удаляются с нее. При использовании подобных покрытий могут возникать дополнительные помехи, вызванные мелкими включениями, воздушными пузырьками и неравномерной толщиной покрытий. Тонкие покрытия достаточно прозрачны как для регистрируемого излучения, в результате чего основной материал может "просвечивать" 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 успешные исследования по ТК авиационных конструкций были выполнены в США на военных самолетах, панели которых окрашены защитной краской зеленого цвета. Испытания неокрашенных панелей самолетов гражданской авиации представляют серьезную проблему. При ТК стальных корпусов химических реакторов и алюминиевых кожухов истинные температуры лучше всего определяются в зонах, покрытых ржавчиной, пылью и т.п. Поставщики тепловизоров в таких случаях рекомендуют наклеивать на контролируемую поверхность полоски липкой ленты, принимая, что для них  $\varepsilon \sim 0.9 - 0.96$ ; в дальнейшем возможно переустановка значений  $\varepsilon$  для натуральных поверхностей.

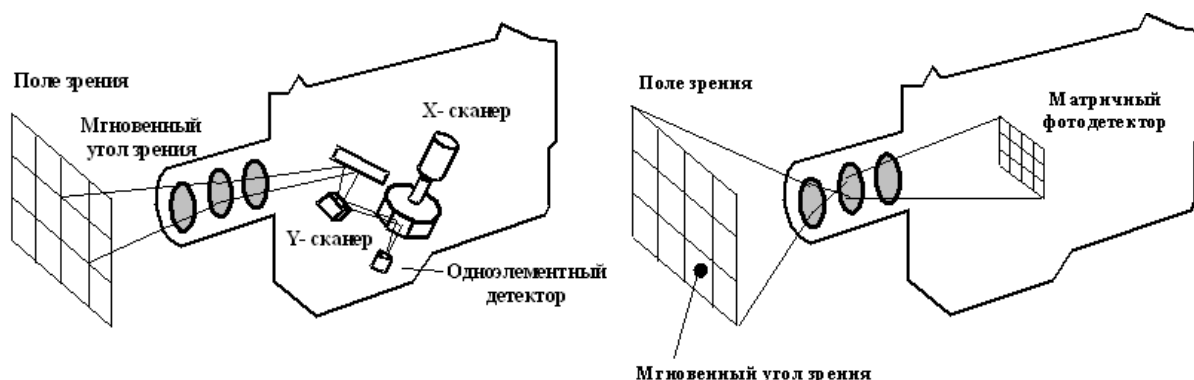
Возможна также оценка коэффициента излучения поверхности с помощью контактного измерения температуры, например с помощью термопары или термосопротивления. Некоторые модели пирометров поставляются в комплекте с дополнительным датчиком температуры. Метод состоит в измерении температуры поверхности с помощью контактного датчика и подстройки коэффициента излучения для пирометра таким образом, чтобы показания температуры для контактного датчика и пирометра совпали.

## **Системы построения изображения в ИК диапазоне (тепловизоры)**

Исследование пространственных распределений температуры по одной или двум координатам требует сканирования поверхности объекта, которое осуществляют либо механически (оптико-механически), либо электронным способом (Рис. 4.6).

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.

Принцип электронного сканирования был реализован в разработанных в конце XX-го века матричных фотодетекторах нового поколения. В англоязычной литературе этот тип фотоприемников называют матрицами, размещаемыми в фокальной плоскости объектива (Focal Plane Array – FPA). Основные преимущества матричных систем тепловидения 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, то есть уменьшить шумы и обеспечить одновременное наблюдение быстроменяющихся тепловых событий (например, при ТК коррозии тонких алюминиевых листов).



**Рис. 4.6. Оптико-механическое и электронное сканирование**

Тепловизоры являются оптико-электронными приборами, в состав которых входит [5]:

- ИК приемник (детектора излучения);
- объектив;
- сканер (кроме матричных тепловизоров);
- устройство охлаждения ИК приемника;
- встроенный эталон температуры;
- электронный блок;
- монитор;
- программный продукт.

В коммерческие тепловизионные системы также включается:

- система записи и твердого копирования термограмм;



- система транспортировки прибора;
- блок питания и/или аккумулятора.

### **Приемники оптического излучения**

Приемники, или детекторы излучения, принимающие и преобразующие энергию оптического излучения в энергию других видов, подразделяют на *биологические* и *физические*. Среди биологических приемников излучения (ПИ) отметим человеческий глаз, который регистрирует видимый свет в диапазоне длин волн от 0.38 до 0.78 мкм и диапазоне яркостей, перекрывающем 11 порядков [5].

Физические ПИ генерируют электрический сигнал, пропорциональный мощности оптического излучения, поглощенного их чувствительными площадками. Приемники ИК излучения включают:

- чувствительный элемент (элементы);
- входное окно, отделяющее внешнюю среду от замкнутого объема вокруг чувствительного элемента;
- апертуру, ограничивающую поле зрения (возможно охлаждение и/или термостабилизация апертуры);
- сосуд Дьюара с хладоагентом (возможна система охлаждения на базе термоэлектрических холодильников или машины Стирлинга; некоторые детекторы работают при температуре окружающей среды).

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.

**Тепловые приемники.** В коммерческих количествах продолжительное время выпускали боллометрические и пироэлектрические детекторы.

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 болометров. В конце XX века появились малоинерционные микроболометрические (ферроэлектрические) матрицы, на основе которых были созданы неохлаждаемые матричные тепловизоры, получившие в настоящее время большое распространение.

Тепловые детекторы имеют плоский характер спектрального хода обнаружительной способности  $D^*$  (см. определение  $D^*$  ниже), то есть являются неселективными, и не требуют охлаждения, но сама величина  $D^*$  при этом значительно меньше, чем у фотонных приемников (Рис. 4.7).

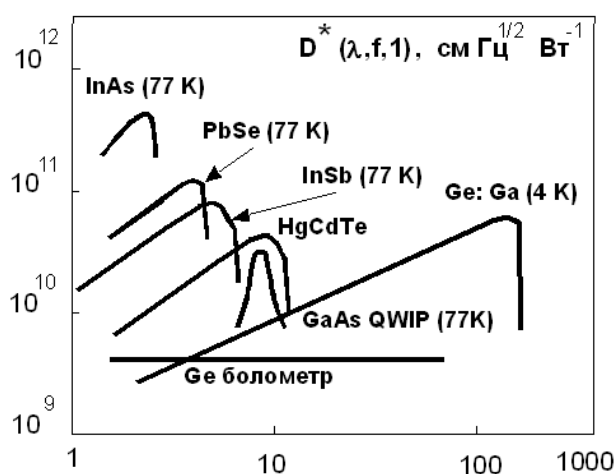


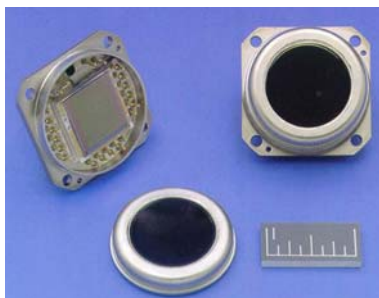
Рис. 4.6. Обнаружительная способность для приемников ИК излучения различных типов

**Фотонные детекторы.** Фотонные детекторы реализуют явление *внутреннего фотоэффекта*, при котором носители заряда не покидают материал детектора, а переходят в зону проводимости либо с примесного уровня, либо из валентной зоны.

Длинноволновые фотонные приемники оптического излучения, 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 приемники устанавливали внутри сосуда Дьюара, заполняемого жидким азотом с температурой 77 К. В зависимости от размеров и конструкции дьюаров жидкий азот требовалось доливать каждые 2-8 часов (были предложены также схемы непрерывной подпитки хладагентом). С целью избежать проблем, связанных с жидким азотом, были разработаны микрохолодильники на основе эффекта Джоуля-Томсона (микрохолодильник Стирлинга), в которых, в частности, использовалась замкнутая циркуляция жидкого гелия.

**Матричные фотоприемники.** Матричные фотоприемники (FPA), устанавливаемые в фокальной плоскости объектива, состоят из множества

чувствительных элементов, расположенных по рядам и столбцам прямоугольной матрицы. К данному типу приемников относятся неохлаждаемые микроболометрические матрицы, фотонные матрицы, матрицы на основе барьера, матрицы на суперрешетках, или «квип»-детекторы (QWIP-Quantum Well Infrared Photodetectors).



Неохлаждаемая болометрическая матрица U3000  
 Формат: 320 x 240  
 Частота смены изображений: 60 Гц  
 Размер пикселя: 51x51 мкм  
 Фактор заполнения: 60%  
 Спектральный диапазон: 8-14 мкм



640x512 квип-матрица  
 Рабочая температура: 70К (холодильник Стирлинга)  
 Температурное разрешение: 30 мК  
 Спектральный диапазон: 8-10 мкм

*Рис. 4.7. матричные приемники ИК излучения*

**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)  $D^*$ , [ $\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$ ];
- область спектральной чувствительности;
- интегральная, или вольтовая, чувствительность, определяющая амплитуду электрического сигнала на выходе фотоприемника, [ $\text{В/Вт}$ ];
- площадь чувствительного элемента  $A_d$ , [ $\text{см}^2$ ];
- инерционность, или постоянная времени, [с].

**Удельная обнаружительная способность** является спектральной функцией и служит важнейшим критерием качества фотоприемников. Ее определяют следующим образом:

$$D^* = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{NEP}, \quad (4.20)$$

где NEP – мощность (поток), эквивалентная шуму (Noise Equivalent Power-NEP);  $\Delta f$ , [Вт] – полоса частот. Согласно ГОСТ 21934-83 величину NEP называют порогом чувствительности приемника излучения, выражая ее в [Вт]; в англоязычной литературе эту величину часто выражают в [ $\text{Вт Гц}^{-1/2}$ ]). При правильной записи  $D^*$  следует указывать значение длины волны, частоту модуляции и полосы частот (единичной):  $D^*(\lambda, f_m, 1) = D_\lambda^*(f_m, 1)$ .

## 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 ИК стекол [5, 22].

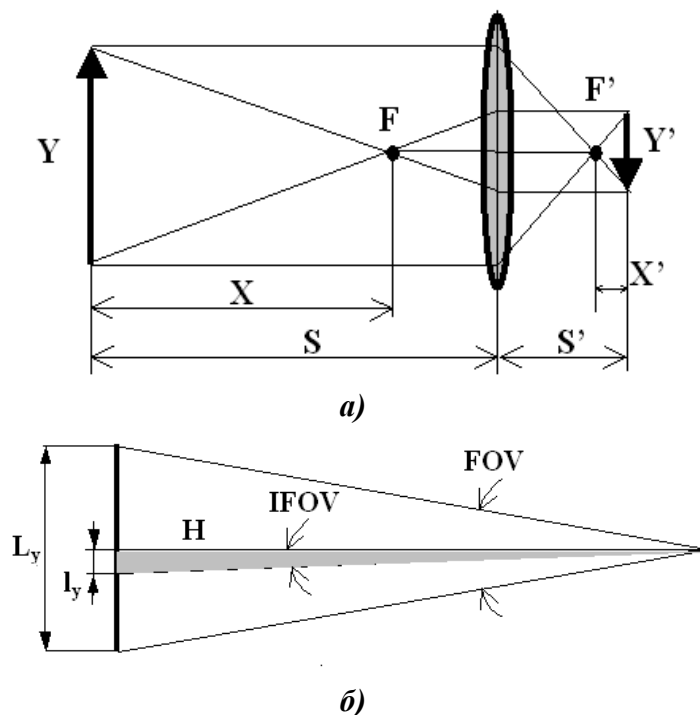
**Фокусное расстояние оптической системы и коэффициент увеличения.** Сложная оптическая система может быть сведена к одиночной линзе, которая характеризуется фокусным расстоянием  $F = F'$ . Такая линза создает изображение  $Y'$  объекта  $Y$  (см. **Рис. 4.8 а**). Смещения  $Y$  и  $Y'$  от фокусных точек  $F$  и  $F'$  равны соответственно  $X$  и  $X'$ . Уравнение тонкой линзы имеет вид:

$$XX' = F^2$$

Коэффициент усиления равен:

$$Y/Y' = S/S'$$

где  $S$  – расстояние между объектом и линзой;  $S'$  – расстояние между изображением объекта и линзой.



**Рис. 4.8. Оптика тепловизоров**

- а) фокусное расстояние и коэффициент увеличения оптической системы  
б) поле зрения и мгновенный угол зрения

**Мгновенный угол зрения и поле зрения.** Если  $Y'$  есть размер чувствительной площадки фотоприемника, то величину  $IFOV = Y'/S' = Y/S$  называют *мгновенным углом зрения* (Instantaneous Field Of View, IFOV), который определяет пространственное разрешение системы (**Рис. 4.8 б**).

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 (размер площадки можно определить как  $\sqrt{A_d}$ , где  $A_d$  – площадь чувствительного элемента).

Угол (поле) зрения (Field Of View – FOV) оптической системы схематично изображен на **Рис. 4.8 б**. Для наблюдения удаленных предметов необходим длиннофокусный узкоугольный объектив (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 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 двенадцатиградусный объектив, который обеспечивает приемлемое геометрическое разрешение в большинстве практических задач. В тепловизорах фирмы FLIR Systems часто используют пять объективов: 2,5°; 7°; 12°; 20° и 40°.

Геометрически оба параметра могут быть определены по обеим координатам сканирования:

$$FOV = 2 \operatorname{ArcTg} \frac{L_y}{2H}, \quad (4.21)$$

$$IFOV = 2 \operatorname{ArcTg} \frac{l_y}{2H} \approx \frac{l_y}{H},$$

где  $L_y$  – размер контролируемой зоны по координате Y, определяемый полем зрения тепловизора;  $l_y$  – размер зоны, визируемой в пределах мгновенного угла зрения (по координате Y); как правило,  $L_x \neq L_y$  и  $l_x = l_y$ .

Для матричных тепловизоров выполняется соотношение:

$$IFOV = \frac{FOV}{N},$$

где  $N$  – число пикселей в матрице по горизонтали или вертикали.

В Таблице 4.2. приведены размеры зоны контроля для объективов с различными углами зрения:

**Табл. 4.2**

**Размер зоны контроля для объективов с различным углом зрения**

Объектив	Размер поля зрения в [м] на расстоянии 10 м
7°	1,2
12°	2,1
20°	3,5
40°	8,2

### **Основные характеристики тепловизоров**

**Формат и частота смены изображений.** Формат изображения в матричных тепловизорах при правильно подобранной оптике соответствует

числу отдельных элементов в матрице. Например, если распространенный формат микроболометрических матриц 320x240 соответствует полю зрения  $24 \times 18^\circ$ , то мгновенный угол зрения будет одним и тем же по обеим координатам:  $IFOV = \frac{24^\circ}{320} = \frac{18^\circ}{240} = 4.5' = 1.3$  мрад. Пространственное разрешение в горизонтальном направлении составит 320 элементов на каждую из 240 строк.

**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, формируя полный кадр. Например, если поле зрения, состоящее из 70 линий, сканируется за  $1/50$  с, то полный кадр будет состоять из 140 линий, сканируемых за  $1/25$  с, то есть  $f_{fr} = 25$  Гц.

Последовательности ИК изображений (термограмм) накапливают в аналоговой или цифровой форме. Аналоговую запись чаще всего выполняют в видео (телевизионном) формате с использованием стандартных видеоманитонов, 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.

**Эквивалентная шуму разность температур** (Noise Equivalent Temperature Difference – NETD, следует отметить, что во многих спецификациях данный показатель называется чувствительностью) 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  $\sqrt{\Delta T^2}$ . Величину NETD определяют как изменение температуры  $\Delta T_{NETD}$ , которому соответствует отношение сигнал/шум  $S$ , равное единице:  $S = \Delta T_{NETD} / \sqrt{\Delta T^2} = 1$  (иногда  $\Delta T_{NETD}$  принимают равным двум или трем стандартным отклонениям).

Величина NETD является паспортной характеристикой тепловизоров, приводимой в следующем виде:  $\Delta T_{NETD} = 0.07^\circ\text{C}$  при температуре эталонного излучателя  $T_{ref} = 30^\circ\text{C}$ .

В некоторых проспектах фирмы-производители тепловизоров указывают данный параметр при выполнении условия усреднения  $N$  термограмм, что приводит к улучшению реальной чувствительности в  $\sqrt{N}$  раз (эту особенность определения NETD следует учитывать при выборе тепловизора).

**Динамический диапазон**  $ДД$  электронного устройства характеризует диапазон сигналов между максимальным  $U_{max}$  и минимальным  $U_{min}$  значением, которые передаются (анализируются) без искажений. Обычно  $ДД$  выражают в децибелах (дБ):

$$ДД = 10 \text{ Log } \frac{U_{max}}{U_{min}}. \quad (4.22)$$

Например, если фотоприемник регистрирует тепловой поток в интервале от  $10^{-6}$  до  $10^{-1}$  Вт, его  $ДД = 10 \text{ Log } \frac{10^{-1}}{10^{-6}} = 10 \cdot 5 = 50$  дБ, то есть составляет 5 порядков.

В тепловизорах используют 8-, 12-, 14- или 16-битовое представление сигнала, что соответствует разбиению динамического диапазона на  $2^8$ ,  $2^{12}$ ,  $2^{14}$ ,  $2^{16}$  уровней и определяет минимальный различаемый температурный сигнал.

Важными характеристиками тепловизора являются параметры оптики: поле зрения, минимальное фокусное расстояние, коэффициент увеличения.

### **Классификация тепловизоров**

Согласно классификации по техническим признакам тепловизионные системы подразделяются на [5]:

- 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).

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

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

- температурное разрешение (NETD):  $0.08^{\circ}\text{C}$  при  $30^{\circ}\text{C}$ ;
- спектральный диапазон: 7.5-13 мкм;
- пространственное разрешение 1.3 мрад;
- формат изображения: 320x240 (микроболометрический FPA приемник);
- частота смены изображений: 50/60 Гц (в зависимости от частоты промышленной сети).

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

- температурное разрешение (NETD):  $0.07^{\circ}\text{C}$  при  $30^{\circ}\text{C}$ ;
- спектральный диапазон: 3.4-5 мкм;
- пространственное разрешение: 1.2 мрад;
- формат изображения: 256x256 (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 ThermaCam SC 3000 фирмы FLIR Systems (США), обладающий следующими основными параметрами:

- температурное разрешение (NETD):  $0.02^{\circ}\text{C}$  при  $30^{\circ}\text{C}$ ;
- спектральный диапазон: 8-9 мкм;
- пространственное разрешение: 1.1 мрад;
- формат изображения: 320x240 (GaAs QWIP FPA приемник);
- частота смены изображений: от 50/60 Гц до 750/900 Гц.

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

**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 и функциональность 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 ThermaCAM 545 фирмы FLIR Systems, в то же время наилучшим прибором в данной области применения будет тепловизор ThermaCAM 1000 той же фирмы, который, помимо всего прочего, может быть установлен на гироплатформе летательного аппарата. В военных областях рекомендуется применять показывающие тепловизоры фирм Raytheon, FLIR Systems и др.

Для ИК диагностики в строительстве и энергетике оптимальным прибором может быть приборы ThermaCAM E2, ThermaCAM P65, ThermaCAM P640. 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, в промышленной сфере зачастую 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.

Во многих моделях, например FLUKE Ti50/55 (Германия) (одна из самых доступных моделей относящаяся к 1-ой категории коммерческих тепловизоров) используются технологии смешения видимого и тепловизионного изображения, а также функция «картинка в картинке», что позволяет представлять часть изображения в видимом диапазоне, а часть в ИК диапазоне (что возможно благодаря параллельному использованию цифровой видеокамеры, встроенной в тепловизор). Наличие таких опций упрощает работу с прибором, особенно, в условиях производства.

Наконец, для научных исследований оптимальной является модель ThermaCAM SC 3000, а также целый ряд приборов фирмы CEDIP (в настоящий момент – FLIR Systems), которые обеспечивают запись длинных последовательностей ИК изображений в реальном времени [5].

### ***ИК термометры (пирометры)***

Инфракрасные термометры (оптические пирометры) предназначены для бесконтактного измерения температуры в локальных зонах, выбираемых на поверхности объекта. В НПК 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 температуры 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 Ростехрегулирования (бывшим Госстандартом) РФ и проходить поверку (каждые 1-2 года).

Основными параметрами ИК термометров являются:

- диапазон измеряемых температур (стандартный диапазон  $-20 \div +900^{\circ}\text{C}$ , однако возможно его расширение в обе стороны, в частности, до  $+3000^{\circ}\text{C}$ );
- 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;
- постоянная времени (в зависимости от типа используемого фотоприемника может составлять от микросекунд до сотен миллисекунд).

В большинстве западных и ряде российских портативных пирометров «пистолетного» типа наводку на объект осуществляется с помощью лазерного целеуказателя. Луч лазера указывает либо центр визируемого пятна (одиночный лазер), либо действительные размеры пятна (круговой лазер). На открытом воздухе и на больших расстояниях лазерный луч не виден, поэтому применяется оптическая наводка. Портативные пирометры высокого уровня, например, приборы серии Zi фирмы Raytek (Thermopoint-90), имеют встроенную цифровую память измеренных значений, интерфейс ввода в компьютер и программное обеспечение.

Стоимость большинства ИК пирометров составляет от 100 до 1000 долларов США. Среди западных производителей этих приборов следует выделить фирму Raytek, выпускающую широкую номенклатуру бесконтактных ИК термометров (в настоящее время эта фирма разделилась на несколько фирм, в т.ч. Optris, часть Fluke и собственно Raytek). Данный сектор рынка успешно осваивается и рядом российских фирм.



*MiniTemp FS (Raytek, США)*

*Диапазон измерений: -30 ÷ +200°С*

*Показатель визирования: 4:1*

*Одиночный лазер*

*MX4+ (Raytek, США)*

*Диапазон измерений: -30 ÷ +900°С*

*Показатель визирования: 60:1*

*Круговой лазер*

*Цифровой выход и компьютерная обработка*

*3i (Raytek, США)*

*Диапазон измерений: -30 ÷ +3000°С*

*Показатель визирования: 180:1*

*Круговой лазер*

*Цифровой выход и компьютерная обработка*

**Рис. 4.9. Портативные ИК термометры фирмы Raytek (США)**

При использовании пирометров следует помнить, что при длительном измерении температуры объектов, сильно отличающейся от температуры окружающей среды, происходит нагрев/остывание датчика ИК излучения. В этом случае, при переходе к измерениям температуры близкой к температуре окружающей среды необходимо выдерживать некоторый интервал времени (обычно 20-30 минут) для того, чтобы приемник ИК излучения принял температуру окружающей среды, в противном случае имеют место существенные измерительные погрешности.

Некоторые модели пирометров поставляются с ПО для подключения прибора к компьютеру через USB порт, а также с контактным датчиком температуры (термопара или термосопротивление) для определения коэффициента излучения.

# Контрольные вопросы

## Глава 1

- 1) Назовите основные отличия пассивной и активной процедур ТК.
- 2) Чем отличаются адиабатический и неадиабатический процессы теплообмена?
- 3) В чем различие между стационарными и нестационарными тепловыми процессами?
- 4) Что такое дифференциальный температурный сигнал в тепловом контроле?
- 5) Объемный нагрев металлических изделий возможен с помощью: а) электрического тока; б) лазера; в) импульсной ксеноновой лампы; г) галогенной лампы накаливания (выбрать правильный ответ)?

## Глава 2

- 1) Каким способом осуществляется передача тепла в космическом пространстве?
- 2) Тепловой поток – это величина векторная или скалярная?
- 3) По какому механизму преимущественно осуществляется теплопередача в тонких газовых промежутках?
- 4) Назовите основные ТФХ. Какие из характеристик могут зависеть от пространственной координаты?
- 5) Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладает: а) алюминий; б) углепластик; в) сталь; г) титан (выбрать правильный ответ)?
- 6) Поставьте задачу теплопередачи для нагрева цилиндра при граничных условиях 3 рода.
- 7) К какому виду теплообмена (адиабатическому или неадиабатическому) можно отнести нагрев при граничных условиях 2 рода?
- 8) Можно ли моделировать объекты с дефектами конечных размеров в двумерной системе координат?
- 9) Подтвердите или опровергните: максимум поверхностной температуры на нагреваемой поверхности соответствует времени окончания импульса.
- 10) Как физически можно объяснить то, что нагрев высокотеплопроводных материалов близок к адиабатическому. При каких условиях это должно выполняться?
- 11) Как физически можно объяснить высокие избыточные температуры при активном ТК изделий из углепластика (по сравнению, например, с металлами и при одной и той же поглощенной энергии и толщине изделия)?
- 12) Как физически объяснить то, что при адиабатическом нагреве пластины импульсом конечной длительности избыточная температура в установившемся режиме не равна нулю?
- 13) Как можно определить максимальную избыточную температуру в активном ТК?
- 14) Что такое избыточная температура изделия в тепловом контроле?
- 15) Что такое коэффициент поверхностного теплообмена? Что отражает комбинированный коэффициент теплообмена?
- 16) Как избыточная температура изделия зависит от мощности нагрева?
- 17) Как дифференциальный температурный сигнал зависит от мощности нагрева?
- 18) На чем основан тепловизионный контроль коррозии в тонких алюминиевых изделиях?
- 19) Что такое консервативность разностных схем?
- 20) Механизм теплопередачи описывается законами: а) Фурье; б) Ньютона; в) Стефана-Больцмана; г) «а», «б» и «в» (выбрать правильный ответ)?

## Глава 3

- 1) Назовите различия между мультипликативными и аддитивными шумами в тепловом контроле.

- 2) К какому типу шумов относятся флуктуации коэффициента излучения на поверхности объекта контроля?
- 3) Если дефект проводит тепло хуже, чем основной материал, то зона, 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».
- 4) К какому типу шумов можно отнести тепловой шум матрицы тепловизора?
- 5) Как относительный температурный контраст зависит от мощности нагрева?
- 6) Какие требования можно предъявить к тепловизору и источнику нагрева при ТК высокотеплопроводных материалов?
- 7) Что такое оптимальное время обнаружения дефектов?
- 8) Приведите формулу для оценки оптимального времени обнаружения.
- 9) Сравните математические редакторы MATLAB и MathCad.
- 10) 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 (выбрать правильный ответ)?

#### Глава 4

- 1) Приведите схему опыта Гершеля по обнаружению инфракрасного излучения.
- 2) В какой области оптического спектра (ИК или видимой) нагрев изделий предпочтительней?
- 3) Назовите основное свойство диффузных поверхностей в части отражения падающего излучения.
- 4) Каким образом можно рассчитать энергетическую освещенность плоской площадки?
- 5) В полевых условиях тепловизор для защиты от солнечного излучения должен иметь спектральную чувствительность с коротковолновой границей не менее: а) 0,5 мкм; б) 3 мкм; в) 7 мкм; г) «а» и «в» ?
- 6) Как будут изменяться показания пирометра при изменении (увеличении и уменьшении) подстраиваемого значения коэффициента излучения?
- 7) На каком эффекте основана работа эваторографов?
- 9) Максимум спектральной плотности излучения для тел с температурой окружающей среды приблизительно соответствует длине волны: а) 0.5 мкм; б) 10 мкм; в) 100 мкм?
- 10) Что такое серое тело?
- 11) Что такое интегральный коэффициент излучения?
- 12) Какова связь между коэффициентами поглощения, излучения, отражения и пропускания?
- 13) Приведите схему и уравнение энергетических потоков для тепловизора.
- 14) Назовите материалы, для которых коэффициент излучения близок к единице.
- 15) Назовите материалы, для которых коэффициент излучения меньше 0.5.
- 16) Приведите уравнения, отражающие связь вариации коэффициента излучения и температуры.
- 17) Рассчитать погрешность цифровой дискретизации при работе тепловизора в диапазоне температур  $-20 +140$  °С и глубиной оцифровки 8 бит и 14 бит (принять линейную связь температуры и выходного электрического сигнала).
- 18) Какой характер имеет отражение от плоской полированной поверхности: а) зеркальное, направленное; б) диффузное; в) диффузное, направленное; г) «б» и «в» (выбрать правильный ответ)?
- 19) При визировании окон жилого дома тепловизор измеряет: а) истинную температуру наружной поверхности стекла; б) истинную температуру стен внутри помещения; в) комбинацию истинной температуры наружной поверхности стекла и температуры окружающей среды; г) температуру окружающей среды (выбрать правильный ответ)?

- 20) Рабочим веществом термометров, использующих шкалу Цельсия, служит: а) вода; б) спирт; в) ртуть; г) «б» и «в» (выбрать правильный ответ)?
- 21) Для тепловизионного контроля удаленных и малоразмерных объектов целесообразно применять: а) широкоугольные объективы; б) телеобъективы с узким полем зрения; в) микрообъективы; г) «б» и «в» (выбрать правильный ответ)?
- 22) 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 (выбрать правильный ответ)?
- 23) Размерность удельной теплоемкости равна: а) Вт/(мК); б) м<sup>2</sup>/с; в) Дж./(кгК); г) Вт/м<sup>2</sup> (выбрать правильный ответ)?
- 24) 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» (выбрать правильный ответ)?
- 25) 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» (выбрать правильный ответ)?
- 26) Почему при смене линзы тепловизора необходима его перекалибровка?
- 27) Можно ли с тепловизором работать в полной темноте?
- 28) Какова дальность действия тепловизора и снижается ли его температурная чувствительность с расстоянием?
- 29) Насколько безопасна работа с тепловизором для персонала?
- 30) Чем обусловлена высокая стоимость тепловизоров и почему так мало фирм их выпускают?
- 31) Множество фирм в России предлагают приборы ночного видения по доступным ценам. Чем эти приборы отличаются от тепловизоров?
- 32) Для чего в комплект поставки пирометров иногда включается контактный датчик для измерения температуры?
- 33) Для повышения чувствительности фотонные детекторы ИК излучения обычно охлаждают с помощью: а) жидкого азота; б) термоэлектрических холодильников; в) холодильников Стирлинга; г) «а» или «б», или «в» (выбрать правильный ответ)?
- 34) Для устранения помех от высокотемпературных источников (Солнца, пламен и т.п.) в тепловидении применяют: а) отсекающие спектральные фильтры с коротковолновой границей 2...2,5 мкм; б) монохроматические ИК фильтры; в) ИК поляризаторы; г) модуляцию потока излучения (выбрать правильный ответ)?
- 35) Увеличение шероховатости поверхности объекта контроля изменяет ее коэффициент излучения следующим образом: а) увеличивает; б) уменьшает; в) никак не влияет; г) все вышперечисленное (выбрать правильный ответ)?
- 36) Мгновенный угол зрения тепловизоров, как правило, ... угла зрения ИК термометров: а) равен; б) больше; в) или «а», или «б»; г) меньше (выбрать правильный ответ)?
- 37) 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 (выбрать правильный ответ)?

## Список литературы

1. Вавилов В.П., Климов А.Г., Тепловизоры и их применения, М.:Интел универсал. 2002. – 88с.
2. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве. – Библиотечка электротехника, Прилож. к журн. «Энергетик». М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 76с.
3. Дроздов В.А., Сухарев В.И. Термография в строительстве. М.:Стройиздат, 1987. – 238 с.
4. Вавилов В.П., Гринцато Э., Бизон П., Маринетти С. Тепловой контроль воздушных расслоений под фресками. – Дефектоскопия, 1994, № 7, с.73–83.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль./В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
6. Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах Кн. 1. Пер. с франц. – М. : Мир, 1992. – 480 с., ил.
7. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 2001.– 684.
8. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. – 264 с.
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
10. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975, 484 с.
11. Г.Карслоу, Д.Егер Теплопроводность твердых тел, М., Изд. «Наука», 1964 г., 488 стр. с илл.
12. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – Учеб. Пособие для вузов. В 2-х частях. – М.: Высш. школа, 1982. – 631 с.
13. Almond D., Patel P. Photothermal science and techniques.– Chapman & Hall, London, 1996.–242 p.

14. Никитенко Н.И. Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток. – Киев: Наукова думка, 1978. – 213 с.
15. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. – J. Appl. Physics, Sept. 1961, Vol. 32, pp.1679 – 1684
16. J.-C. Krapez, L. Spagnolo, M. Frieß. Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography. // Intern. J. of Thermal Sciences, 2004. V. 43. P. 967-977.
17. Дьяконов В.П. MATLAB 6. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
18. Вавилов В.П., Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье. – Дефектоскопия, 1999, №2, с. 58–72.
19. Larose, Daniel T. Data mining methods and models John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006.– 322.
20. Maldague X. et al. A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments. – Rev. Generale de Termique, Vol. 37, No. 2, Sept. 1998, pp. 708–716.
21. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. – 530 с.
22. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.