

Ф. ЛИНЕВЕР

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ТЕХНИКЕ

СПРАВОЧНИК



Fritz Lieneweg

# **HANDBUCH der technischen Temperaturmessung**

» vieweg

**Ф. ЛИНЕВЕРГ**

# **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ТЕХНИКЕ**

Справочник

Перевод с немецкого  
Т. И. КИСЕЛЕВОЙ  
и В. А. ФЕДОРОВИЧА  
Под редакцией Л. А. ЧАРИХОВА



МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1980

УДК 536.5 (430.1)

Под общей редакцией докт.-инж. Ф. Линевега, Карлсруэ

Авторский коллектив: инж. Г. Бройниг, Карлсруэ; инж. П. Дитрих, Эсфельд; В. Глокман, Хаузен фон дер Хёэ; инж. В. Хёне, Карлсруэ; докт.-инж. Ф. Линевег, Карлсруэ; проф. докт. Г.-П. Попп, Хаттинген; инж. Г. Титце, Карлсруэ; инж. Г. Фанвор, Ханау

УДК 536.5 (430.1)

Л и н е в е г Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. 1980 544 с.

Систематизированы современные достижения в области контактных и бесконтактных средств измерения температуры. Даны типы термометров и пирометров, разработанных различными фирмами, изложены технические возможности их установки на агрегатах.

Рассмотрены теоретические основы температурных измерений, приведены понятия погрешностей измерения и их оценка.

Подробно рассмотрено измерение температур расплавов металла, газовых потоков, движущихся и неподвижных объектов в печных пространствах. Приведены методики измерений, а также средства и методы поверки и градуировки приборов.

Предназначен для инженерно-технических работников всех отраслей промышленности, а также конструкторов, занимающихся созданием измерительной аппаратуры. Ил. 341. Табл. 59. Библиогр. ук. 624 назв.

-

Л  $\frac{31000-011}{040(01)-80}$  14-80 2600000000

© by Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1976.

© Перевод на русский язык. Издательство «Металлургия», 1980.

## Предисловие к русскому изданию

Трудно назвать область техники или отрасль промышленности, где бы не требовалось измерять температуру твердых, жидких или газообразных тел. Наряду с этим следует отметить, что в каждой конкретной области выбор методов и средств измерения температуры определяется ее спецификой. Поэтому задача написания однотомного справочника по технике измерения температуры, который при достаточно широком охвате проблемы не страдал бы низкой степенью информативности, весьма сложна. Тем не менее вышедшая в 1976 г. в ФРГ книга-справочник по технике измерения температуры коллектива авторов под редакцией Ф. Линевега (он же автор основных глав книги) решает эту задачу вполне успешно.

Книга выдержана в стиле, несколько отличном от общепринятого для такого рода изданий. Помимо расчетных формул, табличных данных, номограмм и графиков, а также хорошо подобранных числовых примеров, авторы включили в каждую главу теоретическую часть, которая вполне достаточна для сознательного применения чисто справочного материала и в то же время не перегружает читателя излишними тонкостями. Кроме того, в конце каждой главы авторы книги приводят хорошо отобранный библиографический указатель использованных работ на каждую из которых в тексте даны соответствующие ссылки.

Четкая, подробная рубрикация справочника существенно облегчает поиск интересующих читателя сведений, а богатый иллюстративный материал ускоряет их восприятие. В книге максимально отражены последние достижения в области техники измерения температуры. На книги по отдельным вопросам, изданные после 1976 г. в нашей стране, нами сделаны соответствующие ссылки. Некоторые формулы, приводимые в книге, даны без соответствующих выводов, поэтому в ряде наиболее трудных случаев мы прибегли к восполнению недостающих выводов (в сносках).

Опубликование перевода книги-справочника будет удачным пополнением справочного фонда, в частности по теории и технике измерения температуры. Книга безусловно найдет весьма широкий круг читателей как среди разработчиков средств и систем измерения температуры, так и среди тех ученых, инженеров, техников и квалифицированных рабочих исследовательских институтов и промышленных предприятий, которые используют в своей работе эти средства и системы.

Канд. техн. наук *Л. А. Чарихов*

## Предисловие

Этот справочник предназначен для физиков и химиков, работающих в промышленности и в научно-исследовательских лабораториях, инженеров-разработчиков и экспериментаторов, а также для метрологов и имеет своей целью ввести их в область технических измерений температуры и оказать помощь в решении возникающих при этом специальных проблем. Книга полезна также и опытным специалистам в области температурных измерений. В связи с этим ее содержание разделено на ряд глав, и каждая глава снабжена обширной библиографией.

В справочнике рассмотрены теоретические основы температурных измерений, приведены понятия погрешностей измерения и их оценки при измерениях температуры. Для контактных термометров с помощью законов теплопередачи можно рассчитать погрешности, возникающие в результате теплообмена между измеряемым объектом и термометром, и найти способы устранения этих погрешностей. Теплопередача оказывает также значительное влияние и на динамические характеристики термометров, используемых для измерения температуры различных сред. Отсюда вытекают критерии выбора наиболее подходящего для данных условий типа термометра и его рационального размещения на объекте с точки зрения необходимого времени установления его показаний в данной измеряемой среде. При выборе типов термометров для конкретных промышленных объектов следует также обращать внимание на химическую стойкость их защитной арматуры и ее механическую прочность, расчет которых имеет большое значение.

Так же, как для контактных термометров, важно знание законов теплопередачи, для правильного применения и оценки показаний пирометров излучения необходимо знать законы излучения. Основываясь на этих законах, в книге подробно рассмотрены различные методы пирометрии излучения, типы пирометров, а также виды и величины погрешностей измерения. При измерении температуры пирометрами излучения прежде всего следует учитывать влияние излучательных характеристик измеряемого объекта, а также поглощение излучения промежуточной средой. На выбор типа пирометра, помимо этого, большое влияние оказывают также тип оптической системы, вид приемника излучения и его спектральные характеристики. В последние годы, кроме измерения относительно высоких температур, пирометрия излучения находит все более широкое применение в области измерения сравнительно низких температур, а также в области определения температурных полей методом термографии.

Для многих термометров и пирометров излучения необходимы электрические вторичные приборы, которые выдают результаты измерений температуры в аналоговой или цифровой форме. Знание основных процессов преобразования сигналов в этих приборах так же важно, как и знание методов испытаний, с помощью которых датчики температуры и измерительные приборы могут быть проверены на предприятиях и в лабораториях.

В различных главах справочника изложены технические возможности применения тех или иных устройств для измерения температуры. Кроме того, в специальных разделах подробно описаны многочисленные технические установки для измерения температуры, в которых используются контактные термометры и пирометры излучения. Все возможности их применения, что вполне понятно, описаны не абсолютно полностью. Однако читатель найдет достаточно сведений о том, каким образом в том или ином случае лучше всего выполнять измерение температуры.

Приведены также сведения из истории развития температурных измерений и о возникновении термодинамической шкалы Кельвина и Международной практической температурной шкалы. Температурные измерения пламен, а также измерения наивысших температур приобретают все большее значение.

Таблицы и диаграммы, приведенные в справочнике, помогут читателю отыскать сведения о характеристиках наиболее распространенных типов термометров, а также сведения о применении соответствующих материалов для защитных

чехлов в различных отраслях промышленности, что значительно облегчает конструирование оптимальных измерительных установок.

В процессе работы над справочником сотрудники многих предприятий и институтов, занимающихся изготовлением и эксплуатацией устройств, предназначенных для измерения температуры, с готовностью предоставляли мне необходимые данные. Мои бывшие коллеги, сотрудники фирмы Siemens, оказали мне большую помощь в подготовке книги, а научно-техническая редакция фирмы дала ряд ценных советов, касающихся формулировок многих мест текста справочника, а также его оформления. Фирма W. C. Negeus любезно предоставила большое количество рисунков для подготовки издания к печати. Всем им, а также сотрудникам фирмы Friedr. Vieweg and Sohn я хочу выразить свою сердечную благодарность.

Карлсруэ, июль 1976 г.

*Фритц Линевег*

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## 1.1. ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура оказывает влияние на многие процессы и реакции, протекающие в природе, осуществляемые в лабораториях и на промышленных предприятиях. В связи с этим измерение температуры приобретает очень большое значение. Обычно измеряемые температуры лежат в интервале от  $-273$  до  $3000^{\circ}\text{C}$ : в плазме встречаются даже температуры более  $10^8$   $^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для измерения температуры во всех возможных случаях необходимы разнообразные средства и методы измерений, к которым в зависимости от поставленной задачи измерения выдвигаются существенно различные требования, касающиеся точности измерения. Чтобы получить представление, с какими погрешностями при измерениях температуры следует считаться, познакомимся с основами техники измерения температуры.

### *Характеристики средств измерения температуры*

Термометрами называют измерительные средства, входной (измеряемой) величиной которых является температура, а выходной (выходным сигналом) может быть любая величина, однозначно зависящая от температуры. Термометр — это законченное измерительное устройство, представляющее собой единый конструктивный узел. Он состоит, например, в случае стеклянных термометров из термометрического чувствительного элемента (заполненного жидкостью сосуда), соединительного элемента (соединительного капилляра) и измерительного элемента с показывающим приспособлением (измерительного капилляра). Термометрический чувствительный элемент (с защитной арматурой или без нее) называется термометром, если с конструктивной точки зрения он представляет собой законченный узел, передающий выходной сигнал для дальнейшей обработки к подключенным к нему измерительным приборам. Местом установки (монтажа) называется то место, где устанавливается часть термометра, содержащая термометрический чувствительный элемент.

Перечень основных средств и методов измерения температуры и интервалов их рабочих температур дан в табл. 1.1. В основном по способу измерения следует различать контактные термометры и пирометры излучения.

### *Контактные термометры*

Контактные термометры при измерении температуры непосредственно контактируют с измеряемым объектом. Изменение одной из величин, однозначно зависящих от температуры, например теплового расширения жидкости, используется для измерения температуры. Установка термометра на измеряемый объект приводит в большей или меньшей степени к искажению его температурного поля. Возникающие в результате этого погрешности измерения и запаздывания показаний зависят от физических свойств и скорости течения измеряемой среды около термометра, а также от конструкции термометра. Такие погрешности могут быть значительно больше погрешностей, обусловленных самим средством измерения температуры. В случае быстро изменяющихся температур зачастую следует также учитывать время установления показаний подключенных к термометру показывающего прибора, самописца или измерительного устройства регулятора. При выборе контактного термометра следует, кроме того, учитывать, что термометр должен выдерживать механические, химические и термические нагрузки, которым он подвержен на данном объекте измерения.

Т а б л и ц а 1.1

**Средства и методы измерения температуры**

Средство или метод измерения	Интервал рабочих температур, °С
<i>Контактные термометры</i>	
<i>1. Термометры расширения</i>	
Стекланный жидкостный термометр:	
с несмачивающей (металлической) термометрической жидкостью . . . . .	(-58) (-38)—630 (1000)
со смачивающей (органической) жидкостью . . . . .	(-200)—210
Пружинный жидкостный термометр *:	
с несмачивающей жидкостью . . . . .	(-35)—500
со смачивающей жидкостью . . . . .	(-35)—350
Манометрический термометр . . . . .	(-200) (-50)—350 (700)
Дилатометрический термометр . . . . .	0—1000
Биметаллический термометр . . . . .	(-50)—400
<i>2. Термоэлектрические термометры</i>	
Термопары:	
медь—константан . . . . .	(-200)—400 (600)
железо—константан . . . . .	(-200)—700 (900)
NiCr—Ni . . . . .	(-200) 0—1000 (1300)
PtRh10—Pt, PtRh13—Pt . . . . .	0—1300 (1600)
PtRh30—PtRh6 . . . . .	0—1500 (1800)
<i>3. Термометры сопротивления</i>	
Платиновый термометр сопротивления . . . . .	(-250) (-220)—850 (1000)
Никелевый термометр сопротивления . . . . .	(-60)—150 (180)
Терморезистор . . . . .	(-100) (-40)—180 (400)
Терморезистор с положительным температурным коэффициентом . . . . .	40—270
<i>Пирометры излучения</i>	
<i>1. Энергетические пирометры</i>	
Квазимонохроматический (яркостный) пирометр . . . . .	650—3500 (5000)
Пирометр частичного излучения . . . . .	(50) 500—2000
Пирометр полного излучения . . . . .	(-60) (-40)—2000 (3000)
Пирометр частичного излучения в инфракрасной области спектра и термография . . . . .	(-40)—2000 (4000)
<i>2. Пирометры спектрального распределения (цветовые)</i>	
Цветовой пирометр сравнения . . . . .	1150—1800 (2000)
Пирометр спектрального отношения . . . . .	(200) 700—2200 (3100)
<i>Специальные способы измерения температуры</i>	
1. Спектроскопические способы . . . . .	4000— $1 \cdot 10^8$
2. Термоиндикаторы . . . . .	
Термочувствительные краски . . . . .	40—1350
Пироскопы . . . . .	45—1600
Конус Зегера . . . . .	600—2000
Жидкие кристаллы . . . . .	20—135

\* Согласно ГОСТ 13417—76 «Средства измерений температуры. Термины и определения» (жидкостные, паровые и газовые манометрические термометры) такой термометр относится к манометрическим термометрам. (Прим. ред.)

## *Пирометры излучения*

При помощи пирометров излучения температуру измеряемых объектов определяют по излучаемому ими теплу, не подвергая при этом пирометры нагреву до измеряемой температуры. На показания пирометра прежде всего оказывают влияние излучательные характеристики объекта измерения, характеристики промежуточной среды, поглощающей излучение между пирометром и измеряемым объектом, а также отраженное поверхностью измеряемого объекта излучение сторонних источников.

Для правильного выбора того или иного устройства для измерения температуры нужно прежде всего определить, какие требования следует выдвинуть к его конструкции и какую погрешность измерения можно допустить. Для этого необходимо учитывать не только погрешности, обусловленные самим устройством и его соединительными и измерительными элементами, но и погрешности, обусловленные свойствами объектов измерения и окружающей среды. Используя известные методы, можно в большей или меньшей степени уменьшить погрешности измерения с учетом конкретных условий.

## *Задачи теории и практики измерения температуры*

Итак, теория и практика измерения температуры включают изучение: истории развития и основ теории измерения температуры (температурные шкалы и их распределение);

различных по принципу действия, конструкции средств измерения, влияющих на измерение факторов, погрешностей измерения и их допустимых пределов; химических, механических и термических нагрузок на контактные термометры и вытекающих отсюда рекомендаций по их монтажу;

излучательных характеристик измеряемых объектов и вытекающих отсюда выводов относительно измерений с помощью пирометров излучения;

погрешностей измерений, обусловленных влиянием подвода и отвода тепла, и вытекающих отсюда рекомендаций по конструкции термометров;

испытания термометров и пирометров, а также подключенных к ним вторичных измерительных приборов.

## **1.2. ПОГРЕШНОСТЬ И ПРЕДЕЛ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ**

Истинное значение температуры никогда нельзя определить абсолютно точно. При измерении температуры одним из заданных способов не всегда получают одинаковые результаты измерения. Разница между измеренным значением и действительным значением, определенным по реперным точкам или путем сравнения с показаниями образцового измерительного прибора, называется погрешностью измерения. Вводимая в показания измерительного прибора поправка (коррекция) по величине равна погрешности, но с противоположным знаком. Различия в измеренных случайных значениях могут быть обусловлены систематическими или случайными погрешностями.

### *Систематические погрешности измерений*

Систематические погрешности измерений имеют определенную величину и знак. На такие погрешности можно ввести поправки, компенсирующие их. При измерениях температуры систематические погрешности обусловлены ошибками градуировки термопреобразователей, ошибочным делением шкалы, влиянием различных физических факторов (чувствительностью термопреобразователя к изменению давления, падением силы рабочего тока в цепи электроизмерительного потенциометра и т. п.), а также влиянием соединительных элементов между термопреобразователем и измерительным прибором, влиянием других факторов, обусловленных окружающей средой, а также отводом тепла от измеряемого

объекта через термометр наружу. Систематические погрешности можно скорректировать, но так как их нельзя определить достаточно точно, то чаще всего ограничиваются лишь их оценкой.

### Случайные погрешности измерений

Случайные погрешности измерений, напротив, обусловлены различными факторами, которые нельзя точно определить, а значения погрешности подвержены неконтролируемым изменениям. Они могут быть обусловлены неизвестным влиянием температуры на те или иные части измерительного прибора, обратимыми или необратимыми изменениями характеристик термопреобразователя (например, в результате гистерезиса или явлений старения), трением в опорах (подшипниках) подключенных к термопреобразователю вторичных измерительных приборов и т. д. Неоднократно повторенные одним наблюдателем или сопоставленные с некоторым номинальным значением отдельные (единичные) измерения могут иметь разброс. При этом погрешности единичных измерений различны как по величине, так и по знаку; они делают результаты измерений ненадежными. Хотя нельзя точно определить эти погрешности, но их можно оценить и охарактеризовать с помощью статистических методов. Измеренная величина будет тем точнее, чем больше производится единичных измерений.

### Параметры распределения случайных погрешностей измерений

1. *Среднее значение.* Среднее арифметическое результата  $n$  отдельных измерений, систематическую погрешность которых скорректировали, определяют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.1)$$

2. *Стандартное отклонение*<sup>1</sup>. Мерой случайных отклонений  $n$  отдельных измерений от их среднего значения является среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение)  $s$ , которое определяют по формуле

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1.2)$$

Обозначив разность  $x_i - \bar{x}$  через  $f_i$ , получим

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n f_i^2}. \quad (1.3)$$

Для  $n \gg 1$ , т. е. для большого числа измерений,  $s$  приближается к величине, называемой стандартным отклонением  $\sigma$  генеральной совокупности. Величину  $\sigma$  определяют по формуле

$$\sigma = + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i^2}. \quad (1.4)$$

Стандартное отклонение  $s$  или  $\sigma$  можно определить лишь с некоторой погрешностью. В случае достаточно большого числа независимых результатов отдельных

<sup>1</sup> ГОСТ 16263—70 «Метрология. Термины и определения» рекомендует применять термин «среднее квадратическое отклонение результата измерения». В литературе величину  $s$  принято называть точечной оценкой среднего квадратического отклонения результатов измерений (наблюдений). (Прим. ред.)

измерений распределение погрешностей можно принять соответствующим гауссову нормальному распределению (гауссовой кривой, рис. 1.1)\*. Тогда вероятность того, что отдельные значения  $x_i$  расположены в пределах области, симметричной максимальному значению  $h$  и ограниченной с обеих сторон кривой распределения, определяется только стандартным отклонением. В этом случае статистическая достоверность  $^1 P$  того, что  $x_i$  лежит в пределах  $\pm \sigma$ , равна 68,3%. Это значит, что из 1000 отдельных значений в среднем 683 лежат в пределах области разброса среднего значения  $\bar{x} \pm \sigma$ , а 317 — вне этой области. Если принять стандартное отклонение  $\sigma$  кратным некоторому числу  $k > 1$ , то ординаты отсекаемых при этом концов кривой распределения станут меньше (рис. 1.1), а статистическая достоверность  $P$  соответственно больше. Зависимость между областью разброса  $\bar{x} \pm k\sigma$  и статистической достоверностью  $P$  представлена в табл. 1.2. Разность  $1 - P$  называется вероятностью превышения или вероятностью ошибки.

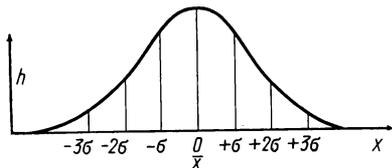


Рис. 1.1. Кривая нормального распределения вокруг среднего значения результата измерения  $\bar{x}$  с частотой  $h$  отдельных значений  $x$  при различной величине  $k\sigma$  [1.8]

3. *Доверительные границы.* Полученное по уравнению (1.1) среднее значение нельзя рассматривать как истинное значение измеренной величины, т. е. оно недостоверно. Тем не менее для найденного из  $n$  результатов измерений среднего значения можно указать верхнюю и нижнюю доверительную границы, между которыми с заданной достоверностью будет находиться истинное значение. Эти доверительные границы, помимо среднего значения  $\bar{x}$ , зависят (в предположении

нормального распределения) от требуемой статистической достоверности и вместе с тем от значения стандартного отклонения  $\sigma$  (табл. 1.2), которое должно быть известно из более ранних измерений. Тогда истинное значение с достоверностью  $P$  находится около среднего значения  $\bar{x}$  внутри доверительных границ  $\bar{x} \pm V$ , где

$$V = k\sigma/\sqrt{n}. \quad (1.5a)$$

Упрощенно  $V$  часто называют доверительной областью.

В соответствии с этим при наличии девяти результатов измерений для  $P = 95\%$  по табл. 1.2 находим  $V = 2\sigma/3$ ; результат расположен внутри доверительных границ  $\bar{x} \pm 2\sigma/3$ .

Если стандартное отклонение  $\sigma$  неизвестно, но имеется несколько результатов измерений,  $V$  можно определить с помощью рассчитанного по уравнению (1.2) стандартного отклонения  $s$  при  $n$  результатах измерений из уравнения

$$V = ts/\sqrt{n}. \quad (1.5b)$$

Коэффициент  $^2 t$  зависит от числа  $n$  результатов измерений и от заданной статистической достоверности  $P$  (табл. 1.3).

4. *Случайная погрешность измерения.* Решающим для правильного определения погрешности результатов измерения является знание области, в которой эти результаты следует рассматривать как ненадежные. Поэтому случайная погрешность измерения должна включать не только случайные погрешности, которые определяются стандартным отклонением  $s$  или  $\sigma$  и, таким образом, статистической достоверностью  $P$  или доверительной областью, но также и все

\* Более строго это условие следовало сформулировать следующим образом: на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей можно утверждать, что при достаточно большом числе измерений распределение среднего арифметического как суммы случайных величин  $\frac{1}{n} x_i$  будет сколь угодно близким к нормальному. (Прим. ред.)

<sup>1</sup> Чаще употребляется термин «доверительная вероятность». (Прим. ред.)

<sup>2</sup> Коэффициент Стьюдента. (Прим. ред.)

Т а б л и ц а 1.2

Область разброса  $\bar{x} + k\sigma$ 

Статистическая достоверность (вероятность выполнения условия) $P, \%$	Вероятность превышения (вероятность невыполнения условия) $1 - P, \%$	$\bar{x} \pm k\sigma$
68,3	31,7	$\bar{x} \pm \sigma$
95,0	5	$\bar{x} \pm 1,96\sigma \approx \bar{x} \pm 2\sigma$
99,0	1	$\bar{x} \pm 2,58\sigma$
99,73	0,3	$\bar{x} \pm 3\sigma$

Т а б л и ц а 1.3

Значения коэффициента  $t$ 

$n$	Значения коэффициента $t$ при $P, \%$		
	95	99	99,7
5	2,8	4,6	6,6
10	2,3	3,2	4,1
20	2,1	2,9	3,4
200	1,97	2,58	3,04

неопределимые или не определенные, хотя и поддающиеся оценке, систематические погрешности  $f'$  [1.3]. Результат  $y$  серии измерений из  $n$  независимых результатов складывается в соответствии с этим из среднего значения  $\bar{x}_E$ , из которого вычтены учетные систематические погрешности, и из случайной погрешности измерения  $u$ . Случайная погрешность измерений  $u$  складывается из доверительной области  $V$  для требуемой статистической достоверности (1.5) и абсолютной суммы  $f'$  всех неучтенных или не поддающихся учету систематических ошибок. Таким образом, получаем

$$y = \bar{x}_E \pm u = \bar{x}_E \pm V \pm |f'| = \bar{x}_E \pm \frac{ts}{\sqrt{n}} \pm |f'|. \quad (1.6)$$

В противоположность погрешности некоторого среднего значения из  $n$  результатов отдельных измерений погрешность метода измерения, называемая также теоретической погрешностью, не зависит от числа  $n$  результатов измерений; она дает лишь сравнительную оценку различных методов измерений. Поэтому погрешность термометра в основном обусловлена погрешностью способа градуировки. Тщательные исследования показали, что эту погрешность целесообразно представлять стандартным отклонением  $k\sigma$ . По табл. 1.2 может быть определена также статистическая достоверность метода измерения. Погрешности градуировки определяют на одном и том же объекте, для одних и тех же условий измерения. Они представляют собой количественное выражение случайных погрешностей.

5. *Условия сравнимости и повторяемости*<sup>1</sup>. Для того чтобы правильно оценить результаты измерений, прежде всего при проверке измерительных приборов и методов измерений в научно-исследовательских лабораториях следует учитывать условия испытаний. Практически различают два граничных случая.

Условия повторяемости существуют в том случае, когда один наблюдатель с помощью одного и того же измерительного прибора при одинаковых рабочих условиях, на одном и том же объекте измерения определяет последовательно измеряемые величины (количественным выражением этого является повторяемость  $r$  [1.4]). При этом систематические ошибки не различаются.

Условия сравнимости существуют в том случае, когда различные наблюдатели в разных лабораториях с помощью различных измерительных приборов одного типа на одинаковых объектах измерения производят то или иное измерение одним и тем же методом (количественным выражением этого является сравни-

<sup>1</sup> Термин «сравнимость» соответствует принятому в ГОСТ 16263—70 «Метрология. Термины и определения» термину «воспроизводимость», а термин «повторяемость» — термину «сходимость». (Прим. ред.)

ваемость  $R$ ). При этом результаты измерений вследствие наличия систематических погрешностей могут отличаться друг от друга.

Погрешность измерения можно уменьшить, правда, лишь до определенного предела, что обусловлено имеющимися неучтенными систематическими погрешностями, путем увеличения числа измерений.

В качестве погрешности измерения или доверительной области среднего значения, внутри которой находится истинное значение, часто указывается стандартное отклонение  $\pm 2\sigma$ , соответствующее статистической достоверности  $P = 95\%$  [1.1, 1.4]. В случае прецизионных измерений, особенно для точного определения погрешности измерения физических констант, придерживаются статистической достоверности  $P = 99$ , или  $99,7\%$ .

**6. Суммарная погрешность.** Если результат измерения, полученный, например, одним способом, является функцией нескольких независимых одна от другой величин, которые измеряются с погрешностью, то по закону увеличения погрешностей можно также определить погрешность способа измерения в целом. Прибор для измерения температуры в общем случае состоит из термодатчика, отсчетного устройства и подводных проводов в качестве соединительного элемента. Если  $u_1, u_2$  и  $u_3$  случайные погрешности измерения отдельных элементов, то полная случайная погрешность  $u_y$  средства измерения будет равна

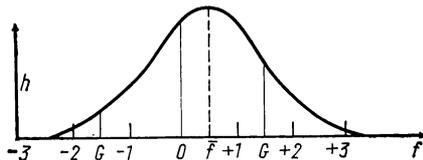


Рис. 1.2. Несимметричное расположение пределов допустимой погрешности  $G, \%$ , на кривой нормального распределения для приборов одной серии:

$f$  — погрешность, %;  $h$  — частота появления погрешности  $dn/df$  (число приборов  $dn$ , приходящееся на классы с бесконечно малой погрешностью  $df$ );  $\bar{f}$  — средняя величина погрешности неограниченного распределения, %;  $G$  — пределы допустимой погрешности около  $f = 0$ , не соответствующего максимальному значению  $h$  [1.6]

$$u_y = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}. \quad (1.7)$$

Известные систематические погрешности следует исправлять. Но если нужно проверить, какое влияние систематические погрешности оказывают на результат измерения при их

функциональной связанности, их складывают с учетом знака.

**7. Пределы допустимых погрешностей.** От погрешности результата измерения следует строго отличать предел допустимой погрешности  $G$ . В то время как погрешность измерения показывает, в каких пределах около среднего значения  $\bar{x}$  могут рассеиваться отдельные значения измеряемой величины, предел допустимой погрешности определяет, какое значение погрешности не будет превышено при измерениях с помощью данного прибора. Предел допустимой погрешности обусловлен конструкцией прибора, неизбежной неодинаковостью однотипных приборов, а также явлениями старения.

Указываемые изготовителем пределы допустимых погрешностей измерительных приборов должны гарантировать потребителям, что измеренные с помощью этих приборов в определенных условиях значения измеряемых величин отличаются от действительных значений не больше чем на предел допустимой погрешности. Эти пределы устанавливают на основе исследований большого числа измерительных приборов одной серии. По экономическим соображениям, от изготовителя не всегда требуют гарантированных пределов допустимых погрешностей.

Пределы допустимой погрешности градуировки указываются в имеющем силу в ФРГ и Западном Берлине и опубликованном в бюллетене законов порядке градуировки. Это главным образом не поддающиеся учету систематические отклонения показаний от правильного, определенного образцовым прибором значения, которые еще допустимы для градуируемого прибора. Пусть для стеклянного термометра предел допустимой градуировочной погрешности равен  $\pm 0,20$  К. И пусть при температуре испытания  $20,00^\circ\text{C}$  термометр показывает  $20,10^\circ\text{C}$ . Тогда погрешность средства измерения ( $20,10^\circ\text{C} - 20,00^\circ\text{C} = 0,10$  К) находится в пределах допустимой градуировочной погрешности. Если известны системати-

ческие погрешности этого термометра, то температуру можно измерять более точно, а именно с погрешностью  $u = \pm 0,02$  К (см. табл. 3.3).

Максимальный результирующий предел допустимой погрешности  $G'_y$  результата измерения, который складывается из нескольких функционально связанных величин или из нескольких последовательно включенных элементов измерительной цепи, получаем как сумму абсолютных значений пределов допустимой погрешности отдельных элементов измерительной цепи:

$$G'_y = \pm |G_1| + |G_2| + \dots \quad (1.8)$$

При определении результирующего предела допустимой погрешности, с одной стороны, не всегда возможно учесть все погрешности отдельных элементов. С другой стороны, мало вероятно, что все эти погрешности будут иметь один и тот же знак. Поэтому в общем случае можно ограничиться определением меньшего по значению статистического предела допустимой погрешности  $G''_y$ . Для достоверности  $P = 95\%$  вполне возможно определять значение этого предела погрешности следующим образом:

$$G''_y = \pm \sqrt{G_1^2 + G_2^2 + \dots} < G'_y \quad (1.9)$$

Например, в случае четырех равных значений отдельных пределов допустимой погрешности статистический предел допустимой погрешности будет равен:

$$G''_y = \frac{1}{2} G'_y.$$

Такое суммирование пределов погрешности допустимо, поскольку для отдельных приборов одной серии можно принять нормальное распределение погрешностей, концы кривой которого часто несимметрично отсекаются пределами допустимой погрешности  $\pm G$  (рис. 1.2).

Если, например, в одну измерительную цепь включено 100 термодатчиков серии А и 200 показывающих приборов серии Б, то возможны 20 000 комбинаций различных термодатчиков и показывающих приборов. Достоверность  $P \geq 95\%$  статистического предела допустимой погрешности  $G''_y$  означает, что в среднем как минимум в 19 000 комбинаций выдерживается рассчитанный по уравнению (1.9) предел допустимой погрешности  $G''_y$ . В редких случаях, когда средняя величина погрешности  $\bar{f}$  некоторой серии приборов больше чем  $0,2G$  (где  $G$  — гарантируемый изготовителем предел допустимой погрешности), то необходимо проверить, выполняется ли критерий допустимости квадратичного суммирования [1.5—1.8].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 1.1. DIN 1319 Bl. 3; 12.68: Grundbegriffe der Meßtechnik, Begriffe für die Fehler beim Messen.
- 1.2. Fritz, W., Poleck, H. Über die Fehler beim Messen und die praktische Beurteilung von Meßergebnissen. Arch. techn. Messen J 021—12, März 1965; J 021—13, April 1965; J 021—14, Mai 1965.
- 1.3. Wagner, S.: Zur Behandlung systematischer Fehler bei der Angabe von Meßunsicherheiten. PTB—Mitteilungen 5 (1969), S. 343—347.
- 1.4. DIN 51848 Bl.1 E 6.66: Prüfung von Mineralölen, Prüffehler und ihre Anwendung, Allgemeines, Begriffe und ihre Anwendung auf Lieferbedingungen.
- 1.5. Poleck, H.: Die Sicherheit statistischer Fehlergrenzen bei der Fehlergrenzenfortpflanzung. Arch. techn. Messen J 021—8, Sept. 1964; J 021—9, Okt. 1974; J 021—10, Nov. 1964; J 021—17, Jan. 1966; J 021—18, Aug. 1966.
- 1.6. Poleck, H.: Anwendung der Statistik in praktischen Meßtechnik. Z. Instr. 75 (1967), S. 147—154.
- 1.7. Poleck, H.: Die Ergebnissicherheit bei quadratischer Addition von Fehlergrenzen. VDI-Z. 107 (1965), S. 1341—1349.
- 1.8. Richtlinie VDE/VDI 2620 Blatt 1, Entwurf Okt. 1971: Fehlerfortpflanzung bei Messungen. Fortpflanzung von Fehlern und Fehlergrenzen.
- 1.9. VDE/VDI—Richtlinie 2620: Fortpflanzung von Fehlergrenzen bei Messungen. Bl. 1 Grundlagen 1.73. Bl. 2 Beispiele zur Fortpflanzung von Fehlern und Fehlergrenzen 7,74.

## 2. ОСНОВЫ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

### 2.1. ИЗ ИСТОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 2.1.1. ТЕРМОМЕТРЫ

Температура в термодинамике наряду с объемом и давлением является одной из трех основных величин, характеризующих состояние вещества. Она характеризует его тепловое состояние. Наши органы чувств воспринимают такие ощущения, как ледяной, холодный, теплый, горячий, раскаленный, нагретый до белого каления, в результате соприкосновения с предметом или его визуального наблюдения. Уже эти ощущения позволяют оценить тепловое состояние того или иного вещества или предмета, но такая оценка очень относительна. При оценке теплового состояния с помощью наших органов чувств можно, очевидно, лишь определить различия в степени нагретости тех или иных предметов или веществ. Определить температуру объекта с помощью измерительных приборов также можно, лишь отнеся наблюдаемые на термометре значения температуры к некоторой эталонной температуре, например к температуре таяния льда. В принципе все явления, происходящие под действием тепла, например тепловое расширение газов, жидкостей или твердых тел, температурная зависимость электрического сопротивления металлических проводников, тепловое излучение нагретых тел и т. д., можно использовать для измерения температуры.

*Стеклянные термометры.* В первом физическом термометре — термоскопе Галилея (1592 г.) — для определения температуры было использовано известное еще со времен Геро Александрийского явление теплового расширения воздуха. Запаянная с одного конца стеклянная трубка открытым концом погружалась в сосуд с водой или винным спиртом. После нагрева и последующего охлаждения трубки жидкость заполняет частично ее внутреннее пространство. Высота столбика жидкости изменяется в зависимости от температуры окружающего воздуха. Санкториус из Падуи усовершенствовал этот термометр, оснастив трубку шкалой и отметив на ней рисками положения мениска жидкости при двух различных температурах. Однако на показания этих термометров большое влияние оказывало атмосферное давление.

*Стеклянные жидкостные термометры расширения.* В 1660 г. великий герцог Тосканы Фердинанд II изготовил первый стеклянный термометр расширения, на показания которого не влияло атмосферное давление. Он состоял из небольшого стеклянного сосуда, наполненного жидкостью, с припаянным к нему замкнутым капилляром. Шкалы различных «флорентийских» термометров согласовывали между собой путем сравнения. Температуре снега соответствовало число 20, а температуре самого жаркого летнего дня — число 80. Точку таяния льда еще не использовали. Точнее определять температуру удалось лишь после того, как в 1694 г. итальянец Ренальдини проградировал шкалу такого термометра по точкам таяния льда и кипения воды. Разработанная в 1702 г. Олафом Рёмером из Копенгагена техника изготовления капилляров позволила гданьскому стеклодуву Фаренгейту в 1724 г. изготовить стеклянный термометр, заполненный сначала винным спиртом, а затем ртутью; форма этого термометра сохранилась и поныне.

*Манометрические термометры.* Первые манометрические термометры были изготовлены в 1879 г. Это были газовый термометр с пластинчатыми и трубчатыми пружинами Ф. Виски, ртутный термометр с пластинчатыми пружинами П. Грюдельбаха и паровой термометр И. В. Клингхаммера. Жидкостный манометрический термометр в его привычной сегодня форме с капиллярным проводом был изготовлен в 1882 г. Дрейером-Брюкнером.

*Дилатометрические и биметаллические термометры.* Дилатометрические термометры были изготовлены в 1860 г. Биметаллический термометр был изобретен в 1800 г. А. Л. Бреке в результате соединения пайкой двух металлов с различными коэффициентами теплового расширения.

*Термоэлектрические термометры и термометры сопротивления.* Следующим этапом развития измерений температуры явилась разработка термоэлектрических термометров, с помощью которых можно измерять как высокие, так и низкие температуры подобно тому, как их измеряют с помощью стеклянных термометров расширения. В 1821 г. Зеебек открыл явление термоэлектричества. В замкнутой цепи из спаянных проводов двух различных металлов возникает электродвижущая сила, когда спай находится при различных температурах. Лишь в 1887 г. А. Ле Шателье и в 1889 г. К. Барусу удалось использовать это явление для измерения температуры. Для измерения температуры можно также использовать температурную зависимость электрического сопротивления. Сэр В. Сименс в 1871 г. использовал для этой цели платиновый термометр, который в 1886 г. Г. Л. Каллендар усовершенствовал, превратив его в прецизионный прибор, пригодный также для измерения высоких температур.

*Пирометры излучения.* Для измерения еще более высоких температур, которые уже нельзя измерять с помощью контактных термометров, используют пирометры излучения. Уже в 1880 г. А. Крова разработал принцип, согласно которому температуру можно измерять путем определения яркости излучения при двух различных длинах волн. Пригодный для проведения измерений яркостной пирометр был изготовлен А. Ле Шателье в 1892 г. Для ослабления излучения объекта измерения были использованы два перемещаемых по отношению друг к другу серых клина<sup>1</sup>. При этом измеряемую яркость излучения сравнивали с яркостью излучения эталонной лампы. В 1904 г. Ш. Фери усовершенствовал этот пирометр. Примерно в то же время (в 1900 г.) Г. Ваннер создал пирометр, работающий по принципу поляризационного фотометра. В 1901 г. Л. Холборн и Ф. Курльбаум создали пирометр с исчезающей нитью. Ш. Фери является также создателем первого технически совершенного пирометра с вогнутым зеркалом, в котором был использован биметаллический элемент в качестве приемника излучения. В пирометре Хиршзон-Брауна в качестве приемника излучения был применен болометр — тонкие проволоки, изменяющие свое сопротивление под действием теплового излучения, падающего на болометр через металлическую трубку. Поскольку в этом пирометре никакие оптические устройства не используются, то пирометр воспринимает практически полное излучение объекта. Показания пирометров с линзами для фокусировки излучения и приемниками излучения (первичными пирометрическими преобразователями) в виде термобатарей, как в Ардометре фирмы Siemens and Halske (1920 г.), практически не зависят от расстояния до источника излучения, поскольку площадь изображения объекта измерения при малых и больших расстояниях между ним и объективом пирометра изменяется незначительно.

## 2.1.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Для однозначного измерения температуры необходимо было создать достоверную температурную шкалу [2.1—2.3]. Уже издавна для градуировки термометров использовали температуру таяния льда и кипения воды, так как эти температуры хорошо воспроизводятся (Ренальдини, 1694 г.). Фаренгейт в качестве фиксированной точки использовал температуру смеси льда с солью и нашатырем, которую он принял за 0 град; температура тающего льда по его шкале составляет +32 град, а температура тела здорового человека +96 град. Приблизительно в то же время французский ученый Реомюр принял за 0 град температуру таяния льда, а температуру кипения воды—за 80 град. В 1742 г. шведский ученый Цельсий предложил 100-град шкалу, в которой за 0 град была взята

<sup>1</sup> В пирометре А. Ле Шателье использованы две перемещаемые относительно друг друга ромбические диафрагмы. Два перемещаемых серых клина использованы впервые в пирометре Ш. Фери. (*Прим. ред.*)

температура кипения воды, а за 100 — температура таяния льда. Применяемая в настоящее время шкала Цельсия, в которой за 0 град принята температура таяния льда и за 100 град — температура кипения воды, была введена в 1750 г. шведским ученым Штрёмером. Условное обозначение единицы измерения температуры по шкале Цельсия — °С. У стеклянных термометров расширения, заполненных различными жидкостями, показания при 0 и 100°С совпадают, но промежуточные показания могут все же отличаться друг от друга, поскольку коэффициенты расширения термометрических жидкостей изменяются по-разному в зависимости от температуры. В результате этого показания ртутного и спиртового термометров при 50°С могут отличаться примерно на 1,8 град, если шкала делит капилляр на равные объемные части. К тому же у термометров могут существовать градуировочные погрешности в результате неоднородности поперечного сечения капилляра и неравномерности деления шкалы. У газовых термометров показания зависят еще и от применяемого газа, а также от его давления в термометре. Так, французский ученый Шаппюи уже в 1887 г. установил, что показания водородного термометра между 0 и 100°С занижены по сравнению с показаниями термометров, заполненных воздухом, азотом или кислородом. Однако при низком начальном давлении и при не слишком низких температурах их показания совпадают значительно лучше, поскольку в этом случае газы по своим свойствам все больше приближаются к идеальным.

*Водородная шкала.* На основе накопленных знаний в 1887 г. Международной комиссией мер и весов была разработана водородная шкала. В качестве фундаментального инструмента был принят водородный термометр постоянного объема с начальным давлением водорода 1,333224 бар. С этим термометром сравнили ртутный термометр, скорректированные показания которого соответствовали водородной шкале. Но и эти, заполненные водородом или гелием, газовые термометры имеют свои границы применения, поскольку свойства даже этих газов с увеличением температуры все больше отличаются от свойств идеальных газов и поскольку при высоких температурах водород начинает проникать в материял сосуда, который он заполняет.

Так как, по Гей-Люсаку (1802 г.), давление или объем идеального газа с повышением температуры на 1 град увеличивается на  $1/273,15$  своего начального значения, то температурную шкалу газового термометра можно расширить за пределы интервала 0—100°С. Для идеального газа, по Гей-Люсаку, при давлении  $p$  и объеме  $V$

$$pV/(pV)_0 = 1 + \alpha t = \alpha (t + 1/\alpha) = \alpha T, \quad (2.1)$$

где  $(pV)_0$  — значение произведения  $pV$  при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 1/273,15 \text{ K}^{-1}$  и  $T = t + 273,15 \text{ K}$ ;  $T$  — температура, отсчитываемая от абсолютного нуля ( $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$ ). Ее называют абсолютной температурой; она была введена в 1851 г. лордом Кельвиным (У. Томсоном). Абсолютные температуры измеряют в градусах Кельвина, обозначаемых К.

Уже Бекон (1630 г.) полагал, что тепло представляет собой некоторую разновидность движения. Француз Г. Амонтон, создавший в начале XVIII в. первый газовый термометр постоянного объема, сделал из этого вывод, что абсолютного нуля можно достичь в том случае, когда это движение прекратится. Он попытался даже вычислить, на сколько абсолютный нуль ниже температуры таяния льда.

Согласно кинетической теории газов энергия движения молекул и атомов зависит от температуры. Для идеального газа массой  $m$  со средней скоростью движения молекул  $v$  действительно уравнение

$$\frac{m}{2} v^2 = \frac{3}{2} kT, \quad (2.2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ), которая связана с молярной газовой постоянной  $R$  [ $8,3143 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$ ] и числом Авогадро  $L$  ( $6,02252 \times 10^{23}/\text{моль}$ ) соотношением  $k = R/L$ .

Поскольку вблизи абсолютного нуля энергия молекул вследствие вырождения газа не изменяется, то на основе кинетической теории газов для всех темпе-

ратур, вплоть до  $T = 0 \text{ К}$ , нельзя дать общего (пригодного для всех случаев) определения температуры.

*Термодинамическая температурная шкала.* Удовлетворяющая всем требованиям, хорошо воспроизводимая температурная шкала, не зависящая от значения температуры и каких-либо свойств веществ, была разработана в 1852 г. Кельвином. Она основывается на 2-м законе термодинамики и называется термодинамической температурной шкалой. В замкнутом цикле Карно два изотермических процесса изменения состояния, происходящих при высокой  $T$  и низкой  $T_0$  температурах, связаны с двумя адиабатическими процессами. В этом замкнутом цикле определенную, зависящую только лишь от температуры обоих изотермических процессов часть тепла  $Q$ , соответствующего температуре  $T$ , можно превратить в работу  $W$ . При адиабатическом сжатии или расширении к газу не подводится и от него не отводится наружу тепло, при этом температура газа повышается от  $T_0$  до  $T$  или понижается от  $T$  до  $T_0$ . Напротив, при изотермическом процессе расширения при температуре  $T$  газ должен получить извне тепло  $Q$ , а при изотермическом сжатии при температуре  $T_0$  должен выделить тепло  $Q_0$ . Тогда производимая в этом замкнутом цикле работа  $W = Q - Q_0$  и механический к. п. д.

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T},$$

откуда

$$1 - Q_0/Q = 1 - T_0/T. \quad (2.3)$$

Таким образом, при заданной температуре  $T_0$  температура  $T$  определяется как

$$T = T_0 Q/Q_0. \quad (2.4)$$

Температура  $T$ , а вместе с ней и температурная шкала в соответствии с уравнением (2.4) однозначно определяются единицей СИ для термодинамической температуры Кельвина, обозначаемой прописной буквой  $K$ .  $1 \text{ К}$  — это  $1/273,16$  (термодинамической) температуры Кельвина тройной точки воды  $T_{\text{тр}}$ , измерить которую можно с малой погрешностью<sup>1</sup>. Температурой Цельсия  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) называется разность между температурой Кельвина и температурой  $T_0 = 273,15 \text{ К}$ , т. е.  $t = T - T_0 = T - 273,15 \text{ К}$ . Очевидно, что  $\Delta t = \Delta T$ . Градус Кельвина  $K$  является также единицей разности температур и температурных интервалов.

*Логарифмическая температурная шкала.* Согласно 3-му закону термодинамики можно достичь абсолютного нуля. Это не находит отражения в обычных температурных шкалах, за исключением логарифмической температурной шкалы, предложенной Дальтоном (1766—1844 гг.). В этой шкале за абсолютный нуль принята  $-\infty$ , а за теоретически возможную максимальную температуру  $+\infty$ . Шкала рассчитана таким образом, что температуры таяния льда и кипения воды, как и по шкале Цельсия, соответствуют числам 0 и 100. В обычных температурных шкалах равным абсолютным изменениям термического свойства во всей температурной области приняты равные изменения температуры независимо от значения некоторого термического свойства, например давления газа. В результате этого абсолютному нулю соответствует конечное значение шкалы ( $0 \text{ К}$  или  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), тогда как теоретической максимальной температуре  $+\infty$ . Если же, напротив, как в логарифмической шкале, равным относительным изменениям термического свойства тела приписывают равные изменения температуры, т. е. если  $E$  — значение термического свойства, то вместо  $dE = k_1 dT$  используют дифференциальное уравнение  $dE/E = k_2 d\theta$ , решение которого дает логариф-

<sup>1</sup> Тройная точка воды — точка равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах — может быть воспроизведена в специальных сосудах с погрешностью не более  $0,0001^{\circ}\text{C}$ . (Прим. ред.)

мическую шкалу. Между логарифмической  $\theta$  ( $^{\circ}\text{L}$ ) и абсолютной температурой  $T$  ( $\text{K}$ ) существует зависимость

$$\frac{\theta}{^{\circ}\text{L}} = 783,10 \lg \frac{T}{\text{K}} - 1798,4, \quad (2.5)$$

если для температур таяния льда и кипения воды приняты  $\theta = 0^{\circ}\text{L}$  и  $100^{\circ}\text{L}$  соответственно.

На логарифмической шкале температура  $50^{\circ}\text{C}$  соответствовала бы лишь относительно немного отличающейся от нее температуре  $54^{\circ}\text{L}$ . Температурам  $0,25\text{ K}$  и  $100\,000\text{ K}$  на логарифмической шкале соответствовали бы  $-2243$  и  $+1892^{\circ}\text{L}$ , т. е. данные температуры на логарифмической шкале лежат в противоположных направлениях на примерно равных расстояниях от точки таяния льда.

Логарифмическую шкалу используют предпочтительно в тех случаях, когда измерения проводят вблизи абсолютного нуля. Однако было решено придерживаться шкал Цельсия и Кельвина, поскольку целый ряд температурных зависимостей материалов связан с коэффициентом  $1/273$  и поскольку в замкнутом цикле Карно отношение количеств тепла равно отношению абсолютных температур (2.4).

## 2.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ И МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

### 2.2.1. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Единицей термодинамической температуры (температуры Кельвина) является Кельвин ( $\text{K}$ ); единица температуры Цельсия обозначается  $^{\circ}\text{C}$ . В англосаксонских странах до сих пор температуру еще измеряют в градусах Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ). Значения температуры термодинамической температурной шкалы, соответствующие градусам Фаренгейта, выражаются в градусах Ранкина ( $^{\circ}\text{R}$ ). Шкала Реомюра в настоящее время уже не применяется.

Для обозначения термодинамической температуры по преимуществу используют букву  $T$ , для температур Цельсия и Фаренгейта — букву  $t$  (в случае необходимости условные обозначения снабжают индексами). Вместо  $t$  используют также букву  $\vartheta$ , чтобы не путать это обозначение с условным обозначением времени  $t$  (см. 7.3).

Между различными единицами температуры существует определенная связь  $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C} = 9/5^{\circ}\text{F}$  или  $1^{\circ}\text{F} = 5/9^{\circ}\text{C} = 5/9\text{K}$ .

Для пересчета численных значений температур в градусы Цельсия, Кельвина, Фаренгейта и Ранкина ( $t_{\text{C}}$ ,  $T_{\text{K}}$ ,  $t_{\text{F}}$  и  $T_{\text{R}}$ ) действительны следующие уравнения (ДИН 1345):

$$\begin{aligned} T_{\text{K}} &= 273,15 + t_{\text{C}} = 5/9 T_{\text{R}}; & t_{\text{C}} &= 5/9 (t_{\text{F}} - 32) = T_{\text{K}} - 273,15 \\ T_{\text{R}} &= 459,67 + t_{\text{F}} = 1,8 T_{\text{K}}; & t_{\text{F}} &= 1,8 t_{\text{C}} + 32 = T_{\text{R}} - 459,67 \end{aligned} \quad (2.7)$$

### 2.2.2. ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ КЕЛЬВИНА

Для определения термодинамической температурной шкалы Кельвина (ТТШК) по уравнению (2.4) следовало бы найти соответствующие температурам  $T$  и  $T_0$  значения  $Q$  и  $Q_0$ . С помощью экспериментов этого нельзя сделать достаточно точно. Поэтому термодинамическая шкала определяется в основном по измере-

ниями температур с помощью подходящих газовых термометров с привлечением уравнения состояния реальных газов [2.1, 2.6—2.8]. Для малых давлений справедливо уравнение

$$pV_m = RT + k_t p, \quad (2.8)$$

где  $k_t$  — наклон изотерм  $pV$  исследуемого газа к оси  $p$ ;  $R$  — молярная газовая постоянная;  $V_m$  — молярный объем. В соответствии с этим термодинамическую температуру можно определить путем экстраполяции измеренных при различных давлениях значений на нулевое давление.

При термометрических измерениях с помощью газа давление или объем газа определяется при двух различных температурах и постоянной массе газа. Следует учитывать влияние паразитного объема соединительного капилляра между термометрическим сосудом и манометром при оценке результатов измерений, а также тепловое расширение термометрического сосуда (изготавливаемого для низких температур из меди или благородных металлов, для высоких — из кварца высочайшего оптического качества или сплавов платины).

а. При постоянном объеме  $V$  температура  $T$  определяется температурой  $T_0$  и давлениями  $p$  и  $p_0$ , а именно  $T = p/p_0 \cdot T_0$  (рис. 2.1). Этот способ наиболее распространен. При высоких температурах его чувствительность значительно выше, чем чувствительность других способов измерения.

б. При постоянном давлении  $p$  температура  $T$  определяется температурой  $T_0$  и объемами  $V$  и  $V_0$ . Этот способ измерения не зависит от паразитного объема, если при обоих состояниях измерения температура паразитного объема одинакова.

в. При постоянной температуре  $T$  и постоянном объеме  $V$  сосуда давление газа изменяется с  $p_1$  на  $p_2$ . Часть газа можно переместить в дополнительный сосуд объемом  $V_0'$  с температурой  $T_0$ . Тогда при измерении определяют лишь соотношение объемов. В связи с этим данный способ измерения не зависит от явления адсорбции и дегазации. Поэтому можно работать с сосудами малого объема, которые можно непосредственно погрузить в расплав металла.

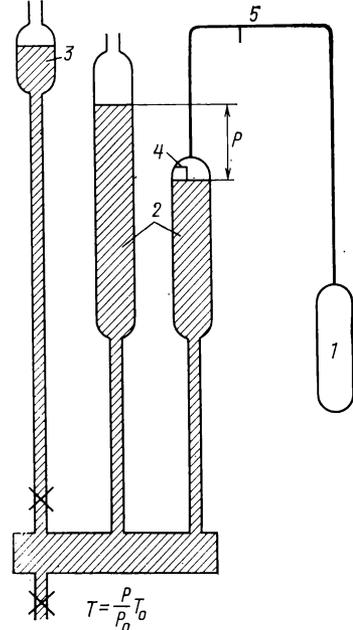


Рис. 2.1. Газовый термометр постоянного объема:

1 — термометрический газовый резервуар; 2 — ртутный манометр; 3 — сборник ртути; 4 — метка, до которой с помощью сборника 3 устанавливается ртутный мениск и затем поддерживается на этом уровне [2.1]; 5 — соединительный капилляр;  $p$  — давление

### 2.2.3. МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА (МПТШ)

Поскольку реализация термодинамической температурной шкалы требует проведения большого числа экспериментов, то на основе международных соглашений была принята чисто эмпирическая, легко воспроизводимая шкала, так называемая Международная практическая температурная шкала (МПТШ), которая приближается к термодинамической температурной шкале Кельвина (ТТШК) [2.9—2.12а].

В качестве фундаментальных фиксированных точек МПТШ, которым соответствуют определенные численные значения, были выбраны температура кипения кислорода ( $-182, 962^{\circ}\text{C}$ ) и температура затвердевания золота ( $+1064,43^{\circ}\text{C}$ ), полученных на основе очень точных и хорошо воспроизводимых измерений с помощью газового термометра. Кроме того, были выведены формулы интерполяции и экстраполяции для термометров сопротивления, которые воспроизводят зависимость между температурой фиксированных точек и показаниями этих приборов, если они градуировались по фиксированным точкам.

*Фиксированные точки МПТШ.* Во введенной в 1927 г. Международной температурной шкале (МТШ) в качестве фиксированных были приняты точки плавления серебра ( $960,5^{\circ}\text{C}$ ) и золота ( $1063^{\circ}\text{C}$ ). Высокие температуры были рассчитаны по формуле Вина при значении второй постоянной уравнения Планка  $c_2 = 1,432 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ . Эта шкала была пересмотрена в 1948 г. на 9-й Генеральной конференции мер и весов и усовершенствована в 1960 г. Вместо точки таяния льда в качестве фиксированной была введена тройная точка воды ( $0,01^{\circ}\text{C}$ ). Температура таяния льда остается в дальнейшем равной  $0,000^{\circ}\text{C}$ . Один градус термодинамической температурной шкалы равен  $1/273,16$  температурной области между тройной точкой воды и абсолютным нулем. Температура затвердевания серебра была определена в  $960,8^{\circ}\text{C}$ , вторая постоянная уравнения Планка  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  [2.9]. Однако на основе тщательных термометрических измерений с помощью газов было установлено, что значения шкалы 1948 г. (МПТШ-48) значительно отличаются от термодинамических температур. Кроме того, шкала должна была охватывать область низких температур (от 10 до 90 К). В октябре 1968 г. решением 13-й Генеральной конференции мер и весов Международной комиссии по мерам и весам была принята Международная практическая температурная шкала МПТШ-68 [2.10—2.12а].

Определяющие фиксированные точки МПТШ-68 с соответствующими значениями температур приведены в табл. 2.1. Прежде всего следует указать на изменение точек затвердевания золота (с  $1063$  на  $1064,43^{\circ}\text{C}$ ) и серебра (с  $960,8$  на  $961,93^{\circ}\text{C}$ ) и на вновь введенные фиксированные точки для температур вплоть до  $13,81 \text{ К}$  (значения температур, определенные по МПТШ-68, снабжаются индексом 68, например  $T_{68}$  или  $t_{68}$ , соответственно значениям температуры по МПШТ-48  $t_{48}$ ).

Следует учитывать зависимость температур точек кипения от давления  $p$ . а. Для водорода при температурах от  $13,81$  до  $23 \text{ К}$  справедлива формула для определения давления пара:

$$\lg \frac{p}{p_0} = A + B/T_{68} + CT_{68} + DT_{68}^2,$$

где  $A = 1,711466$ ;  $B = -44,01046 \text{ К}$ ;  $C = 0,0235909 \text{ К}^{-1}$ ;  $D = 0,000048017 \text{ К}^{-2}$ .

б. Формула для определения температуры по величине давления

$$T_{68} = A + B [(p/p_0) - 1] + C [(p/p_0) - 1]^2 + D [(p/p_0) - 1]^3$$

справедлива для: неона в интервале от  $27$  до  $27,2 \text{ К}$  с  $A = 27,102 \text{ К}$ ;  $B = 3,3144 \text{ К}$ ;  $C = -1,24 \text{ К}$ ;  $D = -0,74 \text{ К}$ ; кислорода в интервале от  $90,1$  до  $90,3 \text{ К}$  с  $A = 90,188 \text{ К}$ ;  $B = 9,5648 \text{ К}$ ;  $C = -3,69 \text{ К}$ ;  $D = 2,22 \text{ К}$ ; паров воды в интервале от  $99,90$  до  $100,10^{\circ}\text{C}$  с  $A = 373,15 \text{ К}$ ;  $B = 28,0216 \text{ К}$ ;  $C = -11,642 \text{ К}$ ;  $D = 7,1 \text{ К}$ .

Наряду с определяющими фиксированными точками для сравнительных измерений можно использовать вторичные фиксированные точки, некоторые из которых приведены в табл. 2.2. Следует учитывать зависимость температуры кипения, а также затвердевания ртути, свинца и мышьяка от давления  $p$ .

*Интерполяционные и экстраполяционные формулы.* Для того чтобы использовать термодинамическую температурную шкалу для температур, отличающихся от температур фиксированных точек; в диапазоне от  $-259,34$  до  $630,74^{\circ}\text{C}$  применяют платиновые термометры сопротивления. Обмотка из платиновой проволоки не должна подвергаться воздействию механических напряжений и для изготовления термометров должна использоваться чистая, хорошо составленная платина. Отношение значений сопротивления термометра  $R$  при  $0$  и  $100^{\circ}\text{C}$  [ $W(t_{68}) = R(t_{68})/R(0^{\circ}\text{C})$ ] не должно быть меньше  $1,39250$ .

Т а б л и ц а 2.1

Определяющие фиксированные точки МПТШ-68 и МПТШ-48  
и соответствующие им температуры  
(при атмосферном давлении  $p_0 = 101\,325\text{ Н/м}^2$ )

Фиксированная точка	$T_{\text{ф.с.}}$ , К	$t_{\text{ф.с.}}$ , °С	$t_{\text{д.с.}}$ , °С
Тройная водорода * <sup>1</sup> . . . . .	13,81	—259,34	
Кипения водорода * <sup>1</sup> (при пониженном давлении 25/7633 330,6 Па = 33 330,6 Н/м <sup>2</sup> ) . . . . .	17,042	—256,108	
Кипения водорода * <sup>1</sup> . . . . .	20,28	—252,87	
Кипения неона . . . . .	27,102	—246,048	
Тройная кислорода . . . . .	54,361	—218,789	
Кипения кислорода . . . . .	90,188	—182,962	—182,97
Тройная воды * <sup>2</sup> . . . . .	273,16	0,01	
Кипения воды * <sup>2</sup> * <sup>3</sup> . . . . .	373,15	100	100
Затвердевания цинка . . . . .	692,73	419,58	419,505
Затвердевания серебра . . . . .	1235,08	961,93	960,8
Затвердевания золота . . . . .	1337,58	1064,43	1063

\*<sup>1</sup> Орто- и параводород в равновесном состоянии.

\*<sup>2</sup> Изотопный состав океанической воды.

\*<sup>3</sup> Вместо точки кипения воды можно использовать точку затвердевания олова ( $T_{\text{ф.с.}} = 505,1181\text{ К}$  или  $t_{\text{ф.с.}} = 231,9681^\circ\text{С}$ ).

Т а б л и ц а 2.2

Вторичные фиксированные точки МПТШ-68  
с соответствующими значениями температур

Фиксированная точка	$T_{\text{ф.с.}}$ , К	$t_{\text{ф.с.}}$ , °С	$t_{\text{д.с.}}$ , °С
Кипения азота . . . . .	77,348	—195,802	
Сублимации $\text{CO}_2$ . . . . .	194,674	—78,476	—78,5
Затвердевания ртути . . . . .	234,288	—38,862	—38,87
Затвердевания воды . . . . .	273,15	0	0
Бензойной кислоты . . . . .	395,52	122,37	122,36
Затвердевания свинца . . . . .	600,652	327,502	327,3
Кипения серы . . . . .	717,824	444,674	
Затвердевания:			
сурьмы . . . . .	903,89	630,74	
алюминия . . . . .	933,52	660,37	660,1
меди . . . . .	1357,6	1084,5	1083
никеля . . . . .	1728	1455	1453
палладия . . . . .	1827	1554	1552
платины . . . . .	2045	1772	1769
родия . . . . .	2236	1963	1960
иридия . . . . .	2720	2447	2443
Плавления вольфрама . . . . .	3660	3387	3380

Т а б л и ц а 2.3

Значения эталонной функции  $W_{CCT-68}T(68) = f(T_{68})$ 

$T_{68}$ , К	$W_{CCT-68}(T_{68})$	$T_{68}$ , К	$W_{CCT-68}(T_{68})$
13,000	0,00123061	100,000	0,28630201
13,810	0,00141206	125,000	0,39338316
17,042	0,00253444	150,000	0,49861135
20,280	0,00448517	175,000	0,60236478
27,102	0,01221272	200,000	0,70496694
35,000	0,02807645	225,000	0,80660352
54,361	0,09197252	250,000	0,90738309
70,000	0,15649541	273,150	1,00000000
80,000	0,19958212	373,150	1,39259668
90,188	0,24379909	505,118	1,89257086

а. Для области 0—630,74°С (273,15—903,89 К) значение температуры определяется уравнением

$$t_{68} = t' + 0,045 \left[ \left( \frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left( \frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \right] \left[ \left( \frac{t'}{419,58^\circ\text{C}} - 1 \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{t'}{630,74^\circ\text{C}} - 1 \right) \right], \quad (2.9)$$

где  $t'$  получено из установленного отношения сопротивлений  $W(t') = R(t')/R(0^\circ\text{C})$  как

$$t' = \frac{1}{\alpha} [W(t_{68}) - 1] + \delta \left( \frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left( \frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right). \quad (2.10)$$

Значения  $R(0^\circ\text{C})$ ,  $\alpha$  и  $\delta$  определяют путем измерения сопротивлений в тройной точке и точке кипения воды, а также в точке затвердевания цинка.

б. В области 13,81—273,15 К для идеального платинового термометра сопротивления установлена зависимость между температурой  $T_{68}$  и отношением сопротивлений  $W(T_{68})$  (табл. 2.3). Поскольку показания любых платиновых термометров сопротивления, которые можно использовать для этой цели, могут отклоняться от этой функции, то для определения температуры  $t_{68}$  были введены интерполяционные формулы для четырех подобластей. Отклонение измеренного отношения сопротивления  $\Delta W(T_{68})$  платинового термометра сопротивления от соответствующего значения по табл. 2.3 составляет

$$\Delta W(T_{68}) = W(T_{68}) - W_{CCT-68}(T_{68}). \quad (2.11)$$

Эти отклонения сначала устанавливают для определяющих фиксированных точек.

1. Для области 90,188—273,15 К справедливо уравнение

$$\Delta W(T_{68}) = A_4 t_{68} + C_4 t_{68}^3 (t_{68} - 100^\circ\text{C}). \quad (2.12)$$

Константы определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$  при 90,188 и 373,15 К (см. табл. 2.1).

2. Для области 54,361—90,188 К справедливо уравнение

$$\Delta W(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2. \quad (2.13)$$

Константы определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$  при температуре 54,361 К, а также из рассчитанных по уравнению (2.12) значений  $\Delta W(T_{68})$  и  $d[\Delta W(T_{68})]/dT_{68}$  при температуре 90,188 К.

3. Для области 20,28—54,361 К справедливо уравнение

$$\Delta W (T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3. \quad (2.14)$$

Константы определяют из значений  $\Delta W (T_{68})$  при температурах 20,28 и 27,102 К, а также из значений  $\Delta W (T_{68})$  и  $d [\Delta W (T_{68})]/dT_{68}$  при температуре 54,361 К, рассчитанных по уравнению (2.13).

4. Для области температур 13,81—20,28 К справедливо уравнение

$$\Delta W (T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3. \quad (2.15)$$

Константы определяют из значений  $\Delta W (T_{68})$  при температурах 13,81 и 17,042 К, а также из значений  $\Delta W (T_{68})$  и  $d [\Delta W (T_{68})]/dT_{68}$  при температуре 20,28 К, рассчитанных по уравнению (2.14). Для любого измеренного значения  $W (T_{68})$  соответствующую температуру  $T_{68}$  получают с помощью табл. 2.3, уравнения (2.11), а также интерполяционных формул [уравнения (2.12—2.15)], справедливых для рассматриваемой подобласти.

в. Для области температур 630,74—1064,43°С справедливо уравнение, выражающее зависимость между измеренной т. э. д. с. платина-родий (10%) — платиновой термопары и температурой  $t_{68}$ :

$$E (t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2 \quad (2.16)$$

при температуре свободных концов термопары 0°С. Константы  $a$ ,  $b$  и  $c$  получают из значений  $E (t_{68})$  при температуре затвердевания сурьмы (630,74°С), которые определяют с помощью измерений платиновым термометром сопротивления и расчета по уравнениям (2.9), (2.10) и точек затвердевания серебра и золота.

Термопара должна быть хорошо отожжена, отношение сопротивлений платинового термометра сопротивления при температурах 0 и 100°С должно быть не менее 1,3920. При 630,74°С, а также при температурах затвердевания золота и серебра должны выдерживаться следующие напряжения:

$$E_{Au} = (10\,300 \pm 50) \text{ мкВ}; \quad (2.17)$$

$$E_{Au} - E_{Ag} = 1183 \text{ мкВ} + 0,158 (E_{Au} - 10\,300 \text{ мкВ}) \pm 4 \text{ мкВ}; \quad (2.18)$$

$$E_{Au} - E (630,74^\circ\text{C}) = 4766 \text{ мкВ} + 0,631 (E_{Au} - 10\,300 \text{ мкВ}) \pm 8 \text{ мкВ}. \quad (2.19)$$

г. Выше точки затвердевания золота (1064,43°С) температура  $T_{68}$  определяется из отношения спектральной энергетической яркости излучения абсолютно черного тела  $L_{\lambda s}$  с температурой  $T_{68}$  при длине волны  $\lambda$  к спектральной энергетической яркости излучения при температуре затвердевания золота  $T_{68} (Au)$  при той же длине волны:

$$\frac{L_{\lambda s} (T_{68})}{L_{\lambda s} [T_{68} (Au)]} = \frac{\exp [c_2/\lambda T_{68} (Au)] - 1}{\exp [c_2/\lambda T_{68}] - 1} \quad (2.20)$$

с постоянной излучения  $c_2 = 0,014388$  мК (в основу МТШ-27 была положена постоянная  $c_2 = 0,01432$  мК, а по МПТШ-48  $c_2 = 0,01438$  мК).

Согласно последним исследованиям [2.23а] термодинамическая температура кипения воды составляет не 100°С, а на 0,034 К ниже, т. е. 99,966°С. Эта разница объясняется тем, что раньше недостаточно полно учитывали адсорбционные эффекты. При более позднем пересмотре МПТШ-68 они были учтены (см. также [2.12а]).

## 2.2.4. РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУР ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ШКАЛАМ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Из указанных в табл. 2.4 температурных разностей изменявшихся с течением времени Международных температурных шкал в связи с уточнением температур фиксированных точек (см. табл. 2.1) и новыми значениями постоянной излучения  $c_2$  следует:

Т а б л и ц а 2.4

Разности (К) между значениями температур по МПТШ-68, МПТШ-48 и МТШ-27

$t_{68}$	$t_{68} - t_{48}$	$t_{68}$	$t_{68} - t_{48}$	$t_{68} - t_{27}$	$t_{48}$	$t_{48} - t_{27}$
-180	0,012	600	0,150	0,35	600	-0,20
-150	-0,013	700	0,390	0,64	700	0,25
-100	0,022	800	0,670	1,07	800	0,40
-75	0,033	900	0,950	1,35	900	0,40
-50	0,029	1000	1,240	1,45	1000	0,20
-25	0,015	1100	1,500	1,40	1100	-0,10
0	0	1200	1,700	0,90	1200	-0,80
25	-0,008	1400	2,000	0,30	1400	-1,70
50	-0,010	1600	2,400	-0,60	1600	-3,00
100	0,000	1800	2,800	-1,70	1800	-4,50
150	0,020	2000	3,200	-3,80	2000	-7,00
200	0,043	2500	4,500	-7,50	2500	-12,00
250	0,061	3000	5,900	-12,10	3000	-18,00
300	0,073	3500	7,500	-19,50	3500	-27,00
400	0,076	4000	9,300	-31,70	4000	-41,00
500	0,079					

а) различие между значениями шкал МТШ-27 и МПТШ-48 в области температур от 600 до 1000°С можно объяснить повышением температуры затвердевания серебра на 0,3 К. Резкий рост с повышением температуры отрицательных значений разностей в области высоких температур объясняется значительным увеличением постоянной излучения  $c_2$  (с 0,0143 до 0,01438 мК);

б) различия между значениями температур по шкале МПТШ-68 и по шкале МПТШ-48 обусловлены изменением температур фиксированных точек: точки затвердевания серебра на 1,13 К, золота на 1,43 К, цинка на 0,075 К и точки кипения кислорода на 0,008 К (см. табл. 2.1). При высоких температурах некоторое увеличение постоянной излучения  $c_2$  приводит к уменьшению разностей.

При сравнении указанных в литературе по шкалам МТШ-27 или МПТШ-48 температур с результатами последних измерений в них следует внести поправки на величины разностей, приведенных в табл. 2.4. Температурная шкала МПТШ-68 применяется Федеральным физико-техническим институтом при проведении научных исследований и испытаний с 1 апреля 1969 г. Приведенные в табл. 3.5 основные параметры терморпар и термометров сопротивления в табл. 3.14 большей частью соответствуют шкалам МПТШ-68. Лишь в параметры, помеченные звездочкой, следует внести поправки согласно табл. 2.4. Для технических измерений различия между шкалами вплоть до температуры 600°С столь незначительны (см. табл. 2.4), что они находятся в пределах допустимых отклонений для термометров этого типа.

Установленные шкалой МПТШ-68 значения температур фиксированных точек, а также интерполяционные формулы и значения эталонной функции (см. табл. 2.3) составлены на основе очень тщательно проведенных измерений в различных государственных институтах. В многочисленных публикациях сообщалось о применяемых способах измерения, об отдельных результатах измерений, а также об установленных при этом погрешностях измерения:

1. Методика и результаты измерений для построения шкалы МПТШ-68 [2.13—2.17].

2. Эталонная функция ССТ-68 [2.18—2.20].

3. Измерения с помощью термометров сопротивления в диапазоне температур 14—273 К [2.21, 2.22].

4. Исследования т. э. д. с. для установления МПТШ-68 [2.23—2.23а].

Можно рассчитывать на воспроизводимость температур затвердевания золота и серебра с точностью 0,05 К, а вблизи них — с точностью около 0,2 К [2.6]. Температуру затвердевания цинка можно воспроизвести с точностью приблизи-

тельно 0,001 К, а температуру тройной точки воды — с точностью около 0,0002 К. Погрешность измерения с помощью газового термометра при 1000°С достигает 0,1—0,2 К, при 600°С 0,05 К, а при измерениях ниже 400°С (вплоть до 13 К) 0,01—0,02 К. Установленные с помощью газового термометра отличия температур фиксированных точек от значений по шкале МПТШ-48 при измерениях температур затвердевания золота и серебра хорошо согласуются с отклонениями, полученными при измерениях с помощью пирометра излучения, когда  $c_2 = 0,014388$  мК, погрешность которой указывается равной всего лишь  $\pm 0,0000019$  мК, а для точки затвердевания золота используется значение температуры, равное 1064,43°С [2.24,2.25].

## 2.2.5. РАСШИРЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ ДО ТЕМПЕРАТУР НИЖЕ 0,2 К

Для расширения шкалы МПТШ-68 до температур ниже 15 К, помимо газовых термометров [2.8], в первую очередь используют манометрические термометры [2.26а—2.26е], с помощью которых можно измерять температуры вплоть до 0,2 К, определяя изменение давления паров жидкости в зависимости от температуры (см. 3.1.2.2). Соединительный капилляр между термометрическим сосудом и прибором для измерения давления в случае проведения измерений в жидких газах должен быть изолирован от окружающей среды с помощью вакуумированного цилиндра для того, чтобы жидкость не испарялась. Благодаря этому термометр показывает температуру ванны, а не поверхности жидкости. Высокая чувствительность манометрических термометров позволяет использовать их в качестве образцовых термометров, характеризующихся высокой точностью измерений; однако с их помощью можно производить измерения лишь в узких диапазонах температур. В случае заполнения манометрического термометра жидким кислородом температурный диапазон измерения простирается от 54 до 90 К, при заполнении жидким азотом — от 63 до 77 К, а при заполнении жидким водородом — от 14 до 20 К. С помощью манометрического термометра, заполненного  $^4\text{He}$ , точка кипения которого 4,215 К, можно измерять температуры в диапазоне от 1 до 5,2 К, а при заполнении  $^3\text{He}$ , точка кипения которого 3,190 К, — от 0,2 до 3 К. Погрешность измерения может составлять 0,02—0,005 К.

Опираясь на тщательные измерения, проведенные с помощью манометрических термометров, заполненных жидким гелием, Международная комиссия мер и весов рекомендовала для области 5,2—2,245 К использовать таблицу, которая определяет зависимость между давлением пара и температурой: « $T_{68}$ , шкала  $^4\text{He}$ », а для области 2,45—0,25 К уравнение давления пара как функцию температуры: « $T_{68}$ , шкала  $^3\text{He}$ ». Погрешность этой шкалы по сравнению с термодинамической температурной шкалой не превышает 0,002 К [2.27, 2.28].

Для построения температурной шкалы в области температур 2—10 К используют платиновые термометры сопротивления, погрешность которых составляет примерно 0,05 К. В результате дополнительных мероприятий, требующих соответственно больших затрат, погрешность измерения с помощью платиновых термометров сопротивления можно снизить до 0,01 К [2.29а]. Для области температур 5,2—13 К наиболее пригодны германиевые термометры сопротивления.

## 2.2.6. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ДИАПАЗОНЕ ОТ 90 ДО $10^{-2}$ К [2.26в, 2.29в, 2.60]

*Металлические термометры сопротивления.* Принимая во внимание значение измерений в области очень низких температур (ниже 90 К), было уделено большое внимание разработке и техническому усовершенствованию соответствующих измерительных средств. О конструкциях и пределах допустимых погрешностей платиновых термометров сопротивления, которые служат в качестве эталонов температуры, а также о проведении их испытаний см. 3.2.2.2.2. и рис. 3.68. Благодаря применению платины, легированной небольшими добавками переход-

ных металлов, удалось создать термометры, которые вплоть до температур ниже 1 К обладают высокими температурными коэффициентами и по сравнению с чистой платиной имеют более высокое сопротивление при низких температурах [2.29с].

Термометры сопротивления из других металлов или металлических сплавов, несмотря на более высокие температурные коэффициенты сопротивления, менее пригодны из-за влияния микропримесей на точность измерений. С понижением температуры влияние дефектов решетки на электрическую проводимость значительно усиливается. Кроме того, интервал рабочих температур ограничивается тем, что металлы при очень низких температурах становятся сверхпроводящими. Поэтому нижняя граница измерений для германия — это температура 1,5 К, для свинца 7,3 К, для индия 3,5 К. Поскольку относительно легко получить очень чистый индий, то термометры сопротивления, изготовленные из него, характеризуются высокой стабильностью показаний (при 20 К отклонение составляет около 0,003 К) [2.30, 2.31]. Термометры сопротивления из бронзы с добавкой свинца можно использовать для измерений температур в диапазоне 1,8—5,5 К [2.32]. Погрешность измерения лагунных термометров (70% Cu, 30% Zn) в области температур 0,3—0,7 К составляет всего лишь 0,05 К [2.33]. На пленочный термометр толщиной всего 0,1 мкм, полученный путем совместного напыления меди и свинца, магнитные поля напряженностью до 0,2 Т не оказывают влияния [2.34].

*Полупроводниковые термометры сопротивления.* Термометры сопротивления из полупроводников, углерода или графита, также имеющие при низких температурах высокие температурные коэффициенты сопротивления, можно применять для измерения температур в диапазоне 12—0,03 К. Их стабильность в большинстве случаев удовлетворительная. Следует особо отметить, что путем измерения разности между определяемой температурой и температурой некоторой фиксированной точки можно определять температурные градиенты до  $1 \cdot 10^{-6}$  К. Погрешность воспроизводимости показаний термометров сопротивления из графита в диапазоне температур 2—4,2 К составляет не более 0,01 К [2.35]. В общем случае можно рассчитывать на воспроизводимость тройной точки водорода с точностью примерно 0,2 К [2.36]. Для термометров сопротивления из очень чистого графита зависимость сопротивления от температуры построена вплоть до 0,03 К [2.37]. В более широком диапазоне (2—400 К) температуру можно измерять с помощью комбинированного термометра из платины и графита, определяя падение напряжения на сопротивлениях при протекании по ним тока постоянной силы. В диапазоне температур 8—400 К сопротивление термометра определяется сопротивлением платины, а в диапазоне температур 2—12 К сопротивлением графита [2.38].

Легированные оксидные полупроводники можно использовать для измерения температур вплоть до 4 К с точностью 0,03 К. Их чувствительность так же высока, как и у германиевых термометров сопротивления, однако на их показания не оказывают влияния ни электрические, ни магнитные поля [2.39]. Вводя небольшие примеси, можно изменять температурную чувствительность полупроводниковых термометров сопротивления. Кроме того, благодаря введению примесей их показания становятся более стабильными. Термометры сопротивления, изготовленные из германия, легированного галлием, можно использовать для измерения температур в диапазонах 1—5 К и 13—25 К. Такие термометры характеризуются высокой чувствительностью и точностью воспроизведения показаний (порядка 0,001 К). Если же германий легирован мышьяком, то чувствительность его снижается, однако диапазон температур, которые можно измерять с помощью термометров сопротивления, изготовленных из такого германия, расширяется и составляет 1—77 К [2.40, 2.41]. Почти линейная шкала получается в диапазоне 2—300 К при измерении проходного напряжения диодов из GaAs. При температуре 4,2 К чувствительность такого термометра 1,5 мВ/К [2.42].

*Термопары.* Термопары менее пригодны для очень точных измерений температуры и прежде всего для построения температурной шкалы в области низких температур, поскольку паразитные т. э. д. с., обусловленные неизбежными неоднородностями термоэлектродной проволоки, могут стать недопустимо большими. Однако с помощью термопары медь—константан можно производить довольно точные измерения вплоть до температуры 30 К. Чувствительность термо-

пары Au=2,1% (ат) Co—Cu при 5 К еще составляет 5 мВ/К. При температуре 20 К она примерно в три раза выше, чем чувствительность термопары медь—константан [2.43]. Если медную проволоку заменить серебряной, содержащей 0,37% золота, то можно достичь необходимой для низкотемпературных измерений низкой теплопроводности, не изменяя при этом сколько-нибудь значительно т. э. д. с. В диапазоне температур 20—273 К характеристика этой термопары почти линейна, тогда как чувствительность термопар медь—константан и железо—константан при температурах ниже 75 К резко уменьшается. Чувствительность термопары Au, 0,07% (ат.) Fe—Cu в диапазоне температур 6—20 К составляет 13,7 мВ/К и 8 мВ/К при температуре 78 К; т. э. д. с. этой термопары отличается высокой стабильностью [2.44, 2.45]. Термопара Au-0,03% (ат.) Fe — хромель обладает высокой т. э. д. с. при температуре 3 К (4,714 мВ) и в диапазоне температур 3—73 К имеет линейную характеристику (см. 3.2.1.3 и рис. 3.27).

*Акустические термометры.* Важным дополнением к манометрическим термометрам можно назвать акустические (ультразвуковые) термометры, с помощью которых можно очень точно измерять температуру в диапазоне 2—20 К; акустические термометры пригодны для построения термодинамической температурной шкалы. По скорости звука некоторого идеального газа, например гелия, температуру можно рассчитать по формуле

$$v_0^2 = \frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{RT}{M_{\text{He}}}, \quad (2.21)$$

где  $v_0$  — скорость звука, полученная экстраполяцией результатов измерений при давлениях 0,1—20 Н/см<sup>2</sup> на нулевое давление;  $c_p/c_v$  — отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме и  $M_{\text{He}}$  — молярная масса гелия. Для измерения скорости звука в цилиндрическом резонаторе с кварцем (для стабилизации частоты) и рефлектором, передвигаемым с помощью расположенного снаружи приспособления, создаются стоячие волны. По известной частоте кварца и рассчитываемой по необходимому перемещению рефлектора длине волны определяется скорость звука. Определяемая таким образом температура, воспроизводимая с точностью 0,002 К, служит для градуировки германиевых термометров, с помощью которых проводят дальнейшие измерения. Температуры, измеренные акустическими термометрами, все же лежат на 0,008 К выше, чем температуры, определенные по гелиевой шкале [2.1, 2.26d, 2.46—2.48].

*Шумовые термометры.* Абсолютную температуру можно, кроме того, определять по термическим шумам сопротивлений [2.49, 2.50]. Например, при измеряемой температуре  $T$  при помощи усилителя с большим коэффициентом усиления на известном сопротивлении  $R$  измеряется напряжение шумов, а с помощью регулируемого сопротивления  $R_0$ , температура которого известна, устанавливается такое же напряжение шумов. Измерение не зависит от атмосферного давления. С понижением температуры погрешность измерения возрастает. Минимальная погрешность измерения при температуре 1 К составляет около 10%, тогда как при температуре затвердевания золота она составляет лишь 0,05%.

Для того чтобы измерять еще меньшие напряжения тепловых шумов измерительного сопротивления, имеющего температуру  $T$ , можно путем корреляции сигналов двух усилителей исключить собственные шумы усилителей. В этом случае получают линейную зависимость между температурой измерительного сопротивления  $R$  и выходным напряжением в диапазоне температур 4—300 К с погрешностью 1% при 4 К [2.59, 2.60].

Если нужно определить температуру в области сверхпроводимости, то можно устранить все шумовые помехи и измерять абсолютную температуру, используя электронный туннельный эффект Джозефсона (1962 г.) и преобразуя изменения напряжения в изменения частоты. Если два проводника соединяются через очень тонкий изолирующий слой, например ниобий—окись ниобия—ниобий, и если к этой системе приложено постоянное напряжение, то через нее протекает ток, частота которого пропорциональна напряжению. Предположим, что эта частота равна 5 кГц. Если теперь к контакту Джозефсона подключить измерительное сопротивление величиной 10 мкОм, которая мала по сравнению с величиной омического сопротивления изолирующего слоя, то тогда колебания напряжения, обусловленные тепловыми шумами в известном сопротивлении  $R$ , вызовут соот-

ветствующие изменения частоты тока, протекающего через контакт Джозефсона. Сигнал после усиления подается на частотомер. Рассчитываемое по изменению частоты среднее квадратическое отклонение зависит от температуры измерительного сопротивления  $R$ . Этим способом удалось измерять температуру вплоть до 0,023 К с погрешностью 0,0003 К. Теоретически с помощью контактов Джозефсона можно измерять температуры примерно до 0,01 К [2.58, 2.60].

**Магнитные термометры.** Путем адиабатического размагничивания парамагнитных солей можно достичь температуры порядка 0,001 К. При использовании таких солей для измерения температуры их магнитная восприимчивость служит в качестве температурозависящей величины. По закону Кюри—Вейса магнитная восприимчивость парамагнитной соли приблизительно обратно пропорциональна абсолютной температуре. Магнитная восприимчивость определяется по методу самоиндукции или взаимоиנדукции. С помощью монокристалла нитрата церия—магния можно измерять температуры в диапазоне 0,1—4 К, с помощью сульфата аммония марганца 1,8—4 К [2.51—2.53]. Погрешность этого способа измерения еще слишком велика, чтобы полученную таким образом магнитную температурную шкалу можно было использовать для расширения МПТШ до области очень низких температур. С помощью измерений магнитной восприимчивости таких металлов, как медь, можно определять температуры до 10 мК [2.60].

**Резонансные термометры.** Квадрупольная частота ядерного магнитного резонанса  $^{35}\text{Cl}$  в кристаллической решетке хлората калия зависит от температуры. При очень точном измерении частоты погрешность измерения составляет 0,02 К при температуре 10 К, 0,004 К при температуре 30 К и 0,001 К в диапазоне температур 50—297 К [2.54—2.56].

При излучении и поглощении  $\gamma$ -лучей атомные ядра испытывают отдачу, которую все же можно исключить, если ядра, излучающие и поглощающие  $\gamma$ -лучи, находятся в кристаллической решетке. Лишь в этом случае можно наблюдать ядерное резонансное поглощение (эффект Мессбауэра). Чем ниже температура, тем больше вероятность процесса, свободного от явления отдачи. Естественная полуширина кривой резонансного поглощения наиболее распространенного  $^{57}\text{Fe}$  в случае  $\gamma$ -линии с энергией 14,4 кэВ соответствует 4,1 эВ или доплеровской скорости 0,09 мм/с. При наличии отдачи могут возбуждаться колебания кристаллической решетки. В результате этого возникает спектр сверхтонкого взаимодействия, плотности излучения которого по обе стороны от мессбауэровской линии для равных доплеровских скоростей расположены асимметрично. Величина этой асимметрии зависит от температуры. Для проведения анализа источник  $\gamma$ -излучения ( $^{57}\text{Co}$ ) движется по отношению к поглотителю  $\gamma$ -излучения ( $^{57}\text{Fe}$ ) со скоростью, например, 5,32 мм/с, при которой наблюдается максимальная асимметрия. Измерения проводили при температурах от 4 до 0,85 К. При таком способе измерения погрешность можно уменьшить до 0,001 К [2.57, 2.60].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

1. *Rahfs, P.*: Die Internationale Praktische Temperaturskala sowie die Möglichkeiten und Meßverfahren zu ihrer Erweiterung nach tiefen Temperaturen. VDI—Berichte № 112: Technische Temperaturmessung. Düsseldorf 1966.
2. *van Dijk, H.*: Über Temperatureinheiten und Temperaturskalen. Z. angew. Physik 15 (1963), S. 561—566.
3. *de Boer, J.*: Temperature as a basic physical quantity. Metrologia 1 (1965), S. 158—169.
4. *Hal, J. A.*: a) Fifty years of temperature measurement. J. sci. Instrum. 43 (1966), S. 541—547.  
b) The early history of the international practical scale of temperature. Metrologia 3 (1967), S. 25—28.
5. *Kirenkow, J. J.*: Die thermodynamische und die internationale praktische Temperaturskala. Z. Instr. 71 (1963), S. 43—47.
6. *Moser, H.*: Gasthermometrie bei höheren Temperaturen. Metrologia 1 (1965), S. 68—73 sowie *Moser, H.*; *Otto, H.*; *Thomas, W.*: Gasthermometrische Messungen bei hohen Temperaturen. IV. Bestimmung der thermodynamischen Temperatur von Fixpunkten zwischen 232° C und 661° C. Z. Phys. 206 (1967), S. 223—228.
7. *Proston—Thomas, H.*; *Kirby, C. G. M.*: Gas thermometer determinations of the thermodynamic temperature scale in the range —183° C to 100° C. Metrologia 4 (1968), S. 30—40.
- 2.8] *Astrov, D. N.*; *Orlova, M. P.*; *Kylin, G. A.* (*Астров Д. Н., Орлова М. П., Кумин Г. А.*): Primi temperature scale in the range from 4,2 K to 20 K. Metrologia 5 (1969), S. 111—118.

- 2.9. Echelle internationale pratique de temperature de 1948. Comptes rendue de la onzième Conference Generale des Poids et Mesures. Octobre 1960.
- 2.10. Echelle internationale pratique de temperature de 1968. Comptes rendue de la Treizieme Conference Generale des Poids.
- 2.11. The international practical temperature scale of 1968; adopted by the Comite Inter-national des Poids et Mesures. Metrologia 5 (1969), S. 35—44.
- 2.12. Internationale Temperaturskala von 1968. PTB—Mitteilungen 2/69, S. 123—125; Bekanntmachung über Temperaturskalen vom 1. Dezember 1970; Internationale Praktische Temperaturskala von 1968 (IPTS-68). PTB—Mitteilungen 1/71, S. 31—43.
- 2.12a. Thomas, W.: Die internationale Temperaturskala als Approximation der thermody-namischen Temperaturskala. VDI—Berichte Nr. 198. Technische Temperaturmes-sung, Düsseldorf 1973, S. 5—17.
- 2.13. Barber, C. R.; Hersford, A.: Differences between the thermodynamic scale and the international practical scale of temperature from 0° C to —183° C. Metrologia 1 (1965), S. 75—80.
- 2.14. Seifer, P.: Der heutige Stand der Temperaturmeßtechnik. Feingerätetechn. 15 (1966), S. 313—318.
- 2.15. Terrien, J.; Preston-Thomas, H.: Progress in the definition and the measurement of temperature. Metrologia 3 (1967), S. 29—31.
- 2.16. Hall, J.; Barber, C. R.: The evolution of the international practical temperature scale. Metrologia 3 (1967), S. 78—86.
- 2.17. Preston-Thomas, H.; Bedford, R. E.: Practical temperature scale between 11 K and 273 K. Metrologia 4 (1968), S. 14—30.
- 2.18. Orlova, M. P.; Sharevskaya, D. I.; Astrov, D. N.; Krutikova, I. G.; Barber, C. R.; Hayes, J. G. (Орлова М. П., Чаревская Д. И., Астров Д. Н., Крутикова И. Г., Барбер К. Р., Хейес Ю. Г.): The derivation of the provisional reference table CCT 64. T = f(W) for platinum resistance Thermometers for the range from 12 K to 273, 15 K. Part 1. The derivation of the table for the range from 12 K to 95 K. Metrologia 2 (1966), S. 6—10.
- 2.19. Barber, C. R.; Hayes, J. G.: wie [2.18]. Part II. The derivation of the table for the range from 90 K to 273, 15 K. Metrologia 2 (1966), S. 11—13.
- 2.20. Bedford, R. E.; Preston-Thomas, H.; Durieux, M.; Muilwijk, R.: Derivation of CCT-68 reference function of the international practical temperature scale of 1968. Metrologia 5 (1969), S. 45—47.
- 2.21. Sharevskaya, D. I.; Orlova, M. P.; Belyansky, B. B.; Galoushkina, G. A.: Investi-gation of the resistance-temperature properties of platinum for resistance thermometry over the range from 14 K to 90 K. Metrologia 5 (1969), S. 103—107.
- 2.22. Belyansky, M. P.; Orlova, M. P.; Sharevskaya, D. I.; Astrov, D. N.: Investigation of the resistance-temperature properties of platinum for resistance thermometry over the range from 90 K to 273 K. Metrologia 5 (1969), S. 107—111.
- 2.23. Bentley, R. E.: The EMF criteria for international practical temperature scale thermo-couples. Metrologie 5 (1969), S. 26—28.
- 2.23a. Guidner, L. A.; Anderson, R. L.; Edsinger, R. E.: Effects of sorption on the reali-sation of the thermodynamik scale. Temperature, its measurement and control in sci-ence and industry, Pittsburgh 1973, Vol. IV, Part 1, S. 315—322.
- 2.24. Haii, J. A.: The radiation scale of temperature between 175° and 1063° C. Metrologia 1 (1965), S. 140—158.
- 2.25. Heusinkveld, W. A.: Determination of the differences between the thermodynamic and practical temperature scale in the range 630° C to 1063° C from radiation mea-surements. Metrologia 2 (1966), S. 61—71.
- 2.26a. Klipping, G.: Messung tiefer Temperaturen. VDI—Berichte Nr. 198 Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1973, S. 129—140.
- 2.26b. Klein, E.: Meßmethoden für Temperaturen unter 1 Kelvin. PTB—Mitt. 1974, S. 161—167.
- 2.26c. Sample, H. H.: Low temperature thermometry in high magnetic fields, III Carbon resistors (0,5 ... 4,2K); thermocouples. Rev. Sci. Instrum. 45 (1974), 1, S. 64—73.
- 2.26d. Schinkmann, M.: Messen und Regeln tiefer Temperaturen. Teil 1, Thermodyna-mische Verfahren. Meßtechn. 81 (1973), S. 175—181.
- 2.26e. Klipping, G.; Schmidt, F.: Temperaturbestimmung mit dem Dampfdruckthermome-ter. Kältetechnik 17 (1965), S. 382—384.
- 2.27. Brickwedde, F. G.: The «1958 He<sup>4</sup>» — Scale of temperatures. J. Res. Nat. Bur. Stan-dards 64 (1960), Part 1, S. 1—4. van Dijk, H.; Durieux, M.; Clement, J. K.: Tables for the 1958 temperature scale. Part 2, S. 4—17.
- 2.28. Sydoriack, S. G.; Sherman, R. H.: The 1962 He<sup>3</sup> scale of temperatures. J. Res. Nat. Bur. Standards 68A (1964), Part I New vapor pressure comparisons S. 547—558. Sydoriack, S. G.; Roberts, T. R.; Sherman, R. H.: Part II Derivation S. 559—565. Roberts, T. R.; Sherman, R. H.; Sydoriack, S. G.: Part III Evaluation and status S. 567—578. Sherman, R. H.; Sydoriack, S. G.; Roberts, T. R.: Part IV Tables S. 579—588.
- 2.29a. Berry, R. J.: Platinum resistance thermometry below 10 K. Metrologia 3 (1967), S. 53—57.
- 2.29b. Schäfer, G.; Schinkmann, M.: Messen und Regeln tiefer Temperaturen. Teil II, Elektrische Verfahren. Meßtech. 82 (1974), S. 31—38.
- 2.29c. Obrowski, W.; Scholz, J.; Stand und Entwicklungstendenzen der Temperaturmes-sung mit Widerstandsthermometern. VDI—Berichte Nr. 198, Technische Tempera-turmessung, Düsseldorf 1973, S. 93—101.
- 2.30. White, G. K.; Woods, S. B.: Indium resistance thermometers; 4 K to 300 K Rev. sci. Instrum. 28 (1957), S. 638—641.

- 2.31. James B. W.; Yates, B.: Indium resistance thermometry. J. sci. Instrum. 40 (1963), S. 193—194.
- 2.32. Mikhailov, N. N.; Govor, A. Ya. (Михайлов Н. Н., Говор А. Я.): Lead brass resistance thermometers for measuring low temperatures. Cryogenics 3 (1963), S. 205—206.
- 2.33. Gordon J. E.; Amstutz, L. I. (Гордон Ю. Е., Амштутц Л. И.): A brass thermometer for use in determining temperatures below 1 K. Cryogenics 5 (1965), S. 329—332.
- 2.34. Golosvashkin, A. N.; Motulevich, G. P. (Головашкин А. И., Мотулевич Г. П.): A sensitive low inertia thermal resistor helium temperatures. Cryogenics 3 (1963), S. 167—169.
- 2.35. Mikhailov, N. N.; Kaganovskii, A. Ya. (Михайлов Н. Н., Казаковский А. Я.): Carbon resistance thermometer for low temperatures. Cryogenics 2 (1962), S. 98—100.
- 2.36. Kalinkina, J. N. (Калинкина Ю. Н.): Temperature dependence carbon thermometers. Cryogenics 4 (1967), S. 327.
- 2.37. Black, W. C.; Roach, W. R.; Wheatley, J. C.: Speer carbon resistors as thermometers for use below 1 K. Rev. sci. Instrum. 35 (1964), S. 587—591.
- 2.38. Holland, M. G.; Rubin, M. G.; Welts, J.: Temperature measurements from 2 K — 40 K. Instrum. Control Systems 35 (1962), S. 89—92.
- 2.39. Sachse, H. B.: Messung tiefer Temperaturen mit Halbleiterwiderstandsthermometern. Z. Angew. Physik 15 (1963), S. 4—7.
- 2.40. Blakemore, J. S.: Design of Germanium for thermometric applications. Rev. sci. Instrum. 33 (1962), S. 106—112.
- 2.41. Orlova, M. P.; Astrov, D. N.; Medvedeva, L. A. (Орлова М. П., Астров Д. Н., Медведова Л. А.): germanium resistance thermometer for low temperatures. Cryogenics 5 (1965), S. 165—167.
- 2.42. Cohen, B. G.; Show, W. B.; Tretola, A. R.: GaAs-p-n function diodes for wide range thermometry. Rev. sci. Instrum. 34 (1963), S. 1091—1093.
- 2.43. Powell, R. L.; Bunch, M. D.; Corruccini, R. J.: Low temperature thermocouples—1. Gold—Cobalt or Constantan versus Copper or «normal» silver. Cryogenics 1 (1961), S. 139—150.
- 2.44. Berman, R.; Brock, J. C. F.; Huntley, D. J.: Dilute gold-iron alloys as thermocouple material for low temperature heat conductivity measurements. Cryogenics 3 (1963), S. 70—76.  
Properties of gold + 0.03 per cent (at) iron thermoelements between 1 K and 300 K behaviour in a magnetic field. Cryogenics 4 (1964), S. 233—239.
- 2.45. Finnmore D. K.; Ostenson, J. E.; Stromberg, T. F.: Secondary thermometer for the 4 K to 20 K range. Rev. sci. Instrum. 36 (1965), S. 1369—1370.
- 2.46. Brodski, A. D.: Elektroakustisches Gas-Thermometer für den Bereich niedriger Temperaturen. Feinwerktechnik 67 (1963), S. 299—301.
- 2.47. Plumb, H.; Cataland, G.: An absolute temperature scale from 4 K to 20 K determined from measurements with an acoustical thermometer J. Res. Nat. Bur. Stand. A 69 (1965), S. 375—377.  
Acoustical thermometer and National Bureau Standards provisional temperature scale 2—20 (1965). Metrologia 2 (1966), S. 127—139.
- 2.48. Roggers, J. S.; Tainsh, R. J.; Anderson, M. S.; Swenson, C. A.: Comparison between gas thermometer, acoustic and platinum resistance temperature scales between 2 K and 20 K. Metrologia 4 (1968), S. 47—59.
- 2.49. Storm, L.: Zur genauen Messung der absoluten Temperatur aus dem thermischen Rauschen. Z. angew. Physik 14 (1962), S. 117—121.
- 2.50. Haroules, G. G.; Brown, W. E.: Technique for absolute temperature measurements at microwave frequencies. Rev. sci. Instrum. 38 (1967), S. 1093—1096.
- 2.51. Hudson, R. P.: The Thermodynamic scale of temperature below 1 K Temperature, its measurements and control in science and industry, Vol. III. Part I. New York and London 1962, S. 51—57.
- 2.52. Daint, J. G.; Edwards, D. O.: Measurement of temperature below 1 K. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part I. New York and London 1962, S. 133—138.
- 2.53. Betts, D. S.; Edmonds, D. T.; Keen, B. E.; Mathews, P. W.: A susceptibility thermometer for use at very low temperatures. J. sci. Instrum. 41 (1964), S. 515—516.
- 2.54. Vanier, J.: Nuclear quadrupole resonance thermometry. Metrologia 3 (1967), S. 135—140.
- 2.55. Utton, D. B.: Nuclear quadrupole resonance thermometry. Metrologia 3 (1967), S. 98—105.
- 2.56. Gill, D.; Kaplan, N.; Thompson, R.; Jaccarino, V.: Precision thermometer for the region 10 K—40 K. Rev. sci. Instrum. 40 (1969), S. 109—113.
- 2.57. Dean Tylor, R.: A low-temperature thermometer utilizing the Mößbauer effect. Temperature; its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part I. New York and London 1962, S. 139—145.
- 2.58. Kamper, R. A.: Survey of noise thermometer. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. IV Part. I. Pittsburgh 1973, S. 349—354.
- 2.59. Storm L.: Messung sehr kleiner Rauschspannungen mit einem Korrelator und Rauschthermometrie tiefer Temperaturen. Z. angew. Phys. 28 (1970), S. 331—333.
- 2.60. Lounasmaa, O. V.: Experimental principles and methods below 1 K. Academic press, London and New York 1974.

## 3. КОНТАКТНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Контактными называются термометры, находящиеся в механическом контакте с измеряемым объектом. Наиболее широко распространены термометры расширения и электрические термометры.

В термометрах расширения для измерения температуры используется тепловое расширение вещества: жидкости, газа или твердого тела, тогда как в электрических термометрах для определения температуры служат такие зависящие от температуры величины, как электросопротивление проводника или т. э. д. с. термопары.

### 3.1. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

#### 3.1.1. ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

##### 3.1.1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

В жидкостных стеклянных термометрах для определения температуры используется тепловое расширение специальной термометрической жидкости. Термометрическая жидкость заключена в тонкостенный стеклянный резервуар, соединенный с капилляром, с которым связана температурная шкала.

Вследствие различия теплового расширения жидкости и стеклянного резервуара при изменении температуры изменяется длина столбика жидкости, находящейся в капилляре.

Температура определяется по положению мениска относительно шкалы [3.1—3.3].

##### 3.1.1.1.1. Требования к свойствам стекла

Для хороших термометров необходимо применять стекла с минимальным термическим старением, которое часто приводит к изменениям объема резервуара термометра. Если термометр после нагревания быстро охладить, то наблюдается изменение показаний в сторону более низкой температуры, так называемая депрессия.

Депрессия, определенная при температуре таяния льда, называется депрессией нуля. При быстром охлаждении после длительного нагрева на  $100^{\circ}\text{C}$  величина депрессии может составлять от 0,01 до 0,05 К. После нагрева до более высокой температуры депрессия может составлять несколько десятых градуса. При не слишком высокой температуре депрессия представляет временное явление. Если термометр был нагрет на  $100^{\circ}\text{C}$ , она исчезает примерно через неделю.

При быстром охлаждении после длительного нагрева выше  $200^{\circ}\text{C}$  депрессия не изменяется. При этом исчезает и депрессия нуля. Термометры из кварцевого стекла не имеют депрессии примерно до  $600^{\circ}\text{C}$ .

Наряду с депрессией могут наблюдаться остаточные изменения в направлении увеличения температуры. Это положительное смещение может составлять 0,1—10 К в зависимости от температуры и длительности нагрева. Для хорошо стабилизированных термометров при нагреве до  $100^{\circ}\text{C}$  в течение года положительное смещение нуля не превышает 0,02 К, через несколько лет оно может увеличиться. По правилам поверки после 24-ч нагрева при температуре верхнего деления шкалы термометра погрешность его показаний не должна превышать 0,3 цены деления шкалы [3.4, 3.5].

Депрессия и положительное смещение нуля во всем интервале температур постоянны, поэтому вызываемые ими погрешности, которые необходимо учитывать при точных измерениях температуры, могут быть скорректированы при периоди-

Ческой поверке. Такую поверку особенно легко провести при температуре таяния льда, если точка 0°С есть на шкале.

Резервуар термометра должен быть изготовлен из рекомендованного РТВ\* сорта стекла. Максимальная рабочая температура для большинства стекол лежит между 350 и 480°С в зависимости от сорта стекла. Для резервуаров из стекла Супремекс допустима температура 630°С, для резервуаров из кварцевого стекла 1000°С. Капиллярная трубка должна быть прочно соединена с резервуаром термометра, она должна быть гидрولитически устойчива к воздействию рабочей жидкости термометра (гидролитический класс 1, 2 или 3 по ДИН12111). Об исследовании стабильности сообщается в работах [3,6 и 3.7].

### 3.1.1.1.2. Требования к термометрическим жидкостям

Смачивающие или несмачивающие термометрические жидкости должны обладать достаточной объемной стабильностью в условиях работы термометра. В качестве несмачивающей металлургической жидкости служит чаще всего чистая и осушенная ртуть. Она используется для измерений температур в диапазоне от —38,5°С (точка плавления —38,87°С) до 630°С.

Термометры из кварцевого стекла для измерения температур до 800°С наполнены ртутью. Для измерений до 1000°С применяют специальные сплавы, например сплав таллия. Для измерения низких температур (до —58°С) пригоден сплав ртути с 8,5% таллия [3.8].

Для измерений до —200°С применяют термометры, наполненные смачивающей органической жидкостью.

Для удобства наблюдений и облегчения отсчета в термометрическую жидкость добавляют голубое или красное красящее вещество [3.9]. Красящее вещество ни в коем случае не должно выделяться из жидкости и сужать сечение капилляра из-за осаждения на стенках. Неправильно выбранное красящее вещество может вызвать погрешность до 2 К. Чтобы уменьшить это влияние до минимума, жидкость перед наполнением термометра подвергают тепловой и световой обработке. При тщательной фильтрации, осушении, дегазации и полной изоляции от водяного пара и углекислоты воздуха эту погрешность можно почти полностью устранить. Жидкость должна иметь малую вязкость, чтобы время установления показаний из-за медленного протекания жидкости при охлаждении термометра было возможно меньше.

Необходимо также следить за тем, чтобы при измерениях температур ниже —40°С резервуар при введении в испытываемую среду охлаждался медленно, в противном случае из-за сильного возрастания вязкости жидкости и усиления адгезии к стенкам капилляра столбик жидкости может разорваться. Такие термометры со смачивающей органической жидкостью используют для измерений температуры до +210°С при минимальных требованиях к точности.

В качестве смачивающих термометрических жидкостей пригодны: толуол (от —90 до 100°С), спирт (от —110 до 210°С), пентановая смесь (—200 до 30°С). Из-за худшей теплопроводности и большей вязкости этих жидкостей инерционность таких термометров больше, чем ртутных.

Во всех термометрах не допускается наличие в жидкости пузырьков газа или пара, которые могут разрывать столбик. Следует также следить за тем, чтобы не происходило испарения и конденсации жидкости в свободном пространстве капилляра. У термометров со смачивающей жидкостью это может приводить к погрешности в несколько десятых градуса уже при сравнительно низких температурах. Поэтому свободное пространство капилляра часто заполняют осушенным и очищенным от кислорода инертным газом (азотом или аргоном) под давлением, повышая тем самым и точку кипения жидкости (избыточное давление в 1 бар для температур до 350°С, 20 бар до 600°С, 70 бар до 750°С). Только у ртутных термометров для измерений ниже 200°С можно использовать вакуумированный капилляр. Это облегчает устранение разрыва столбика, но и возникают они в этом случае значительно чаще. Поскольку большее сечение капилляра и быстрое изменение

\* Федеральный физико-технический институт (г. Брауншвейг, ФРГ). (Прим. ред.)

температуры вдоль столбика способствуют возникновению разрывов в вакуумированных термометрах, обычные ртутные термометры для низких температур также наполняют защитным газом. Галлиевые термометры не нуждаются в защитном газе благодаря высокой температуре кипения галлия ( $\sim 2060^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.1.1.1.3. Конструктивное исполнение термометров со вложенной шкалой и палочных термометров

По конструктивному оформлению различают палочные термометры и термометры со вложенной внутрь стеклянной оболочки шкалой (рис. 31). В последних

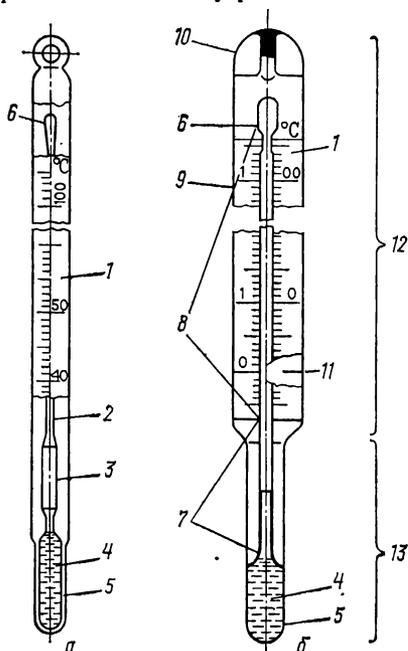


Рис. 3.1. Лабораторный жидкостный стеклянный термометр (по ДИН 16 160 лист 3):

*а* — палочный термометр, градуированный при полном погружении; *б* — термометр со вложенной шкалой, градуированный при частичном погружении; 1 — основная шкала; 2 — капилляр; 3 — расширение капилляра; 4 — термометрическая жидкость; 5 — резервуар термометра; 6 — предохранительное расширение; 7 — соединительный капилляр; 8 — измерительный капилляр; 9 — оболочка; 10 — пробка; 11 — метка на оболочке; 12 — верхняя часть; 13 — нижняя часть

шкала не связана с капилляром и находится на отдельной шкальной пластине. Капилляр и шкала герметично заключены в защитную оболочку, припаянную к резервуару. Шкальная пластина должна плотно прилегать к капилляру и быть скреплена с ним таким образом, чтобы могла свободно расширяться при нагревании термометра. Чтобы определить сдвиг шкальной пластины относительно капилляра, на оболочке градуируемого термометра наносится штриховая метка. У палочных термометров шкала наносится методом травления непосредственно на передней поверхности толстостенной капиллярной трубки.

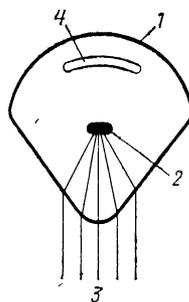


Рис. 3.2. Сечение линзообразного ртутного капилляра с окрашенной подложкой:

1 — капиллярная трубка; 2 — ртутный капилляр; 3 — ход лучей; 4 — окрашенная подложка

Часть капилляра со шкалой, предназначенная для отсчета температуры (измерительный капилляр), должна быть внутри гладкой, ровной, его внутреннее сечение не должно иметь местных отклонений более чем на 5% от среднего значения. Капилляры обычно имеют круглое, овальное или уплощенное с одной стороны сечение. Для ртутных термометров измерительный капилляр часто изготавливают в виде цилиндрической линзы, чтобы получить увеличенное отчетливое

Таблица 3.1

**Диазоны измерений и технические характеристики  
некоторых стандартных ртутных термометров**

№	Тип термометра	Диапазон измерений, °С	Цена делений шкалы, °С, термометра		Примечание	
			со вложенной шкалой	па-лочного		
1	Прецизионный термометр ДИН 12775 от 5.49	(-30)—50	0,5	0,5	Со вспомогательным делением при 100° С	
		0—50	0,2; 0,1	0,5		
		0—100	0,2	0,5	Со вспомогательным делением при 0° С	
		0—250		1		
		50—100	0,2	—		
2	Лабораторный термометр ДИН 12778 от 5.49	0—100	1	1	—	
		0—250	1	1		
		0—360	1	1		
3	Высокотемпературный термометр ДИН 12780 от 5.49	0—525	—	1	—	
		200—525	—	1		
		0—625	—	2		
4	Термометр с нормальным шлифом ДИН 12784 лист 2 от 2.63	0—150	0,5	—	Температура выступающего столбика, °С	
		0—250	0,5	—		
		0—360	1	—		
5	Термометр со вложенной шкалой для теплотехнических измерений ДИН 12786 от 3.55	0—60	0,1	—	Предел допустимой погрешности (±), °С:	
		0—125	1	—		
		0—250	1	—		0—60 . . . . . 0,15
						0—50 . . . . . 0,7
		200—450	1	—		50—125 . . . . . 1,0
						0—50 . . . . . 0,7
		400—580	1	—		50—100 . . . . . 1,0
						100—250 . . . . . 1,5
						200—450 . . . . . 2
						* при 0 . . . . . 0,7
			400—580 . . . . . 5			
			* при 0 . . . . . 0,7			

\* Со вспомогательным делением.

изображение столбика. Для облегчения отсчета необходимо, чтобы ртуть казалась окрашенной, для чего применяют окрашенные капилляры. Применяют также цветные подложки, в которых отражается столбик ртути (рис. 3.2). Все мероприятия, расширяющие видимое изображение столбика, эффективны только при ограниченном угле наблюдения.

**Капилляр.** На конце капилляра делается расширение, которое в какой-то мере должно предохранять термометр от повреждения при перегреве. Длина соединительного капилляра между резервуаром и измерительным капилляром зависит в основном от специального исполнения термометра (см. прямые, угловые и вытянутые термометры). Если необходимо измерять температуру только в ограниченном интервале температур, например от 200 до 450° С, то шкалу в неинтересующей области можно сократить или прервать путем устройства в капилляре сокращающего расширения. При этом, кроме основной шкалы, на шкальную пластину можно нанести вспомогательную шкалу для проверки термометра при фиксированных температурах, например при температуре таяния льда. Такое расширение может служить также для того, чтобы мениск не уходил в резервуар.

**Маркировка глубины погружения.** Показания жидкостного стеклянного термометра зависят не только от температуры резервуара, но и от температуры столбика жидкости в капилляре. Термометр, который подвергается воздействию измеряемой температуры по меньшей мере до мениска, называется погруженным термометром. Вообще следует применять такие градуированные при полном погружении термометры. Если часть столбика такого термометра находится не при

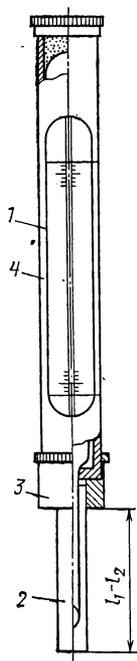
Т а б л и ц а 3.2

**Термометры-вставки для промышленных стеклянных термометров; номинальный размер 250; ДИН 16178 от 12.68**

Диапазон измерений, °С	Цена деления, °С	Наполнитель	Предел допустимой погрешности, К	Температура испытаний, °С	Температура столбика жидкости, °С
—60—40	1	Толуол	2	—50; 0; 40	—10; 15; 25
—30—50	1	оранжевый Ртуть в голубом капилляре	1	—30; 0; 50	—10; 15; 25
0—100	1	То же	1	0; 50; 100	15; 25; 45
0—160	2	Ртуть	2	0; 50; 100; 150	15; 25; 45; 55
0—200	2	»	2	0; 100; 200	15; 45; 65
0—300	2	»	2	0; 100; 200; 300	15; 45; 65; 80
0—400	5	»	5	0; 100; 200 300; 400	15; 45; 65 85; 100
0—500	5	»	5	0; 100; 200 300; 400; 400	15; 45; 65 90; 110; 130
0—600	5	»	< 500° С 5 ≥ 500° С 8	0; 100; 200; 300 400; 500; 600	15; 45; 65; 90 110; 130; 160

измеряемой температуре, то выступающая часть столбика принимает другую температуру, которая устанавливается в результате теплообмена между столбиком и окружающей средой. Показания такого частично погруженного термометра были бы неправильными, потому что часть жидкости в капилляре вследствие различия в температурах расширилась бы не в той же мере, что и жидкость в резервуаре.

Так как термометры в эксплуатации не всегда могут быть полностью погруженными, при точных измерениях необходимо или учитывать погрешность столбика (см. 3.1.1.2.2), или использовать термометры, отградуированные при частичном погружении. Поправки не нужны, если используется термометр с отмеченной на нем глубиной погружения и если действительная средняя температура выступающей части столбика равна температуре непогруженной части термометра. Это зависит прежде всего от диапазона измерений термометра (табл. 3.1, № 4). Часто величина этой погрешности зависит от длины выступающей части столбика, т. е. от значения измеряемой температуры (табл. 3.2). Верхняя граница допустимой глубины погружения называется линией погружения и может быть обозначена меткой погружения на термометре. Если на термометре указано, какому стандарту он соответствует, то можно не указывать глубину погружения и температуру непогруженной части термометра.



В связи с тем что в большинстве случаев средняя температура непогруженной части термометра может колебаться из-за изменений температуры в помещении, потоков воздуха вблизи объекта измерения или наличия защитной арматуры, для точных измерений температуры следует использовать термометры, градуированные при полном погружении.

Монтажный размер  $l_1$  (рис. 3.3) составляет по ДИН 16159 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000 мм.

### 3.1.1.4. Конструктивное исполнение термометров для кратковременных измерений

Жидкостные и газовые термометры используют в лабораториях, а также в промышленности для проверки и длительных измерений. Они имеют различное конструктивное оформление, соответствующее их назначению. Для кратковременных измерений чаще всего применяют прецизионные или лабораторные термометры со вложенной шкалой или палочные,

Рис. 3.3. Технический стеклянный термометр, прямой, верхняя часть круглая, штекерной формы (по ДИН 16174): 1 — термометр-вставка (со вложенной шкалой); 2 — защитная гильза (монтажная длина  $l_1$  равна глубине погружения  $l_2$ ); 3 — соединительная деталь для погружения трубки; 4 — верхняя часть

тогда как для теплотехнических измерений используют термометры со вложенной шкалой (см. рис. 3.1, табл. 3.1, № 1, 2, 5). Кроме того, они различаются по нормализованному рабочим диапазонам температур и по цене деления шкалы. Термометры для измерения высоких температур выполняют безнулевыми (см. табл. 3.1, № 3, 5). Для измерений в стеклянных колбах с притертой горловиной используют специальные термометры с конусной притертой пробкой (рис. 3.4); существуют специальные термометры для работы с молоком, минеральными маслами и горючими веществами (термометры для контроля процессов кипения, измерения вязкости, определения точки кристаллизации, температуры воспламенения, анилиновой точки, а также точек помутнения и затвердевания).

*Термометры кипения* служат для определения давления воздуха по температуре кипения воды. На этих термометрах, помимо основной шкалы для измерения температуры, есть вспомогательная шкала с делениями в миллибарах. Эти термометры, используемые для высотных измерений в водонагревательных приборах, называют гипсотермометрами. Калориметрические термометры имеют очень малую цену деления шкалы вплоть до  $0,01^\circ \text{C}$  для того, чтобы можно было измерять возможно меньшую разность температур. Их градуируют частично погруженными и изготавливают с восемью перекрывающимися интервалами измерения по  $6^\circ \text{C}$  для измерений от 9 до  $36^\circ \text{C}$ . У термометров для определения точек затвердевания

нижняя часть, состоящая из резервуара и соединительного капилляра, выполнена относительно длинной. Они служат также для измерения вязкости (при длине нижней части до 200 мм), для производственных измерений; термометры с вытянутым резервуаром — для определения средней температуры непогруженной части термометров (см. 3.1.1.1.2 и рис. 3.8).

У угловых термометров нижняя часть образует угол (например, 90 или 135° у промышленных стеклянных термометров) с верхней частью, состоящей из измерительного капилляра и шкалы.

Метеорологические термометры для измерения температуры почвы имеют угол 150°.

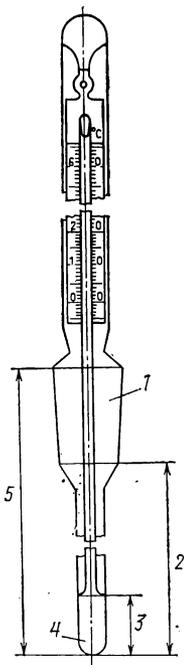


Рис. 3.4. Жидкостный стеклянный термометр с конусным переходником (по ДИН 16160 лист 1):  
1 — конусный переходник;  
2 — глубина погружения;  
3 — высота резервуара; 4 — термобульб; 5 — монтажный размер

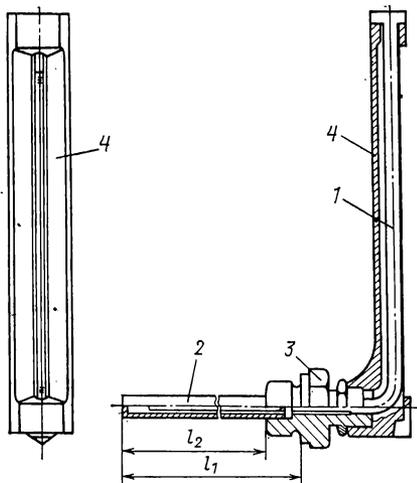


Рис. 3.5. Технический стеклянный термометр угловой (90°). Верхняя часть V-образной формы с резьбовым штуцером (по ДИН 16190):  
1 — термометр-вставка; 2 — защитная гильза; 3 — резьбовой штуцер; 4 — верхняя часть (оправа);  $l_1$  — монтажный размер;  $l_2$  — глубина погружения

Для измерений влажности психрометрическим методом разработаны метеорологические термометры, которые часто используют и в промышленности для кратковременных измерений.

**Промышленные стеклянные термометры.** В промышленности для различных целей, в частности для периодического контроля температуры жидкостей, газов и пара в трубопроводах, резервуарах и машинах, используют стеклянные термометры. Для защиты от механических повреждений их вставляют в защитную арматуру (оправу). Верхняя часть термометра помещается в вырезанную с одной стороны латунную оправу так, что в вырезе видна шкала (см. рис. 3.3). Значительно удобнее промышленные термометры в оправе V-образной формы (рис. 3.5), которая изготовлена горячей штамповкой из коррозионностойкого и механически прочного анодированного алюминиевого сплава. Стеклянный капилляр при этом хорошо защищен V-образной оправой. Такая конструкция позволяет легко заменять вставку-термометр. Нижняя часть термометра помещена в защитную гильзу, изготовленную в зависимости от назначения из латуни или стали диаметром 12 или 16 мм. Соответствующий диаметр стеклянной вставки равен 8 или 10 мм.

Защитная гильза связана с оправой через переходник. У угловых термометров с углом 90 или 135° стеклянная вставка легко входит в гильзу (см. рис. 3.5).

Термометр, имеющий простую соединительную деталь, может быть вмонтирован в измеряемый объект без специального крепежа (см. рис. 3.3). Гильза может быть снизу открыта или иметь радиальные отверстия в стенках для уменьшения времени установления показаний. В том случае, когда защитная гильза должна быть вмонтирована герметично, например в трубопровод или в защитный чехол, переходник имеет резьбовой штуцер или накидную гайку (см. рис. 3.5). Без дополнительных чехлов термометры могут выдерживать избыточное давление до 1 бар. При более высоких давлениях их следует завинчивать с уплотнением или варить в защитные чехлы, которые затем винчивают или вваривают в трубопровод. Благодаря такой конструкции промышленные термометры могут быть заменены в любое время без остановки агрегатов.

**Метастатические термометры.** Для определения очень малых градиентов температур или температурных изменений порядка десятых или сотых долей градуса при температуре объекта от  $-20$  до  $140^{\circ}\text{C}$  в научных исследованиях используют метастатические термометры (термометры Бекмана) [3.10].

Основная шкала ртутного метастатического термометра со вложенной шкалой имеет диапазон разности температур  $5\text{ K}$  и цену деления  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Для того чтобы можно было определять разность температур при любой номинальной температуре, в верхний конец измерительного капилляра впаяно установочное приспособление (рис. 3.6). Оно содержит разделитель и запасной резервуар для приема отделенной части ртути, а также установочную шкалу с ценой деления  $2^{\circ}\text{C}$ . Между основной шкалой и разделителем измерительный капилляр имеет расширение, чтобы после установки мениска на нулевое деление основной шкалы ртуть не поднималась до разделителя (при условии, что термометр не нагревается больше чем на  $45^{\circ}\text{C}$  выше установленной температуры). Ртуть в измерительном капилляре и в установочном приспособлении должна образовывать взаимосвязанные столбики. При нагреве или охлажде-

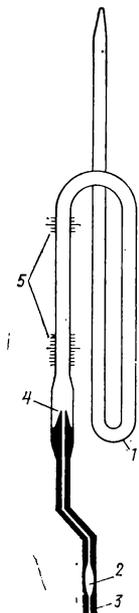


Рис. 3.6. Капельное регулировочное приспособление термометра Бекмана [3.3]:  
1 — ртутный резервуар; 2 — расширение капилляра; 3 — измерительный капилляр термометра с вложенной основной шкалой; 4 — разделитель-капельница; 5 — установочная шкала [ $(-20)$ — $(140^{\circ}\text{C})$ ]

нии резервуара термометра можно приблизительно определить температуру, при которой мениск установится на нулевой отметке основной шкалы. При наклоне термометра избыточное количество ртути отделяется в разделителе и при возвращении термометра в вертикальное положение стекает в запасной резервуар.

Метастатический термометр, капилляр которого над ртутью должен быть откачан до высокой степени разрежения, при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  калибруется по образцовому термометру Бекмана. Погрешность интервала в любом месте главной шкалы не должна быть больше  $0,01\text{ K}$  при цене деления шкалы до  $1^{\circ}\text{C}$  и не больше  $0,02\text{ K}$  при цене деления более  $1^{\circ}\text{C}$ .

**Экстремальные термометры** служат для фиксирования достигнутых за определенный промежуток времени максимальных или минимальных значений температуры. При измерении максимальным термометром мениск столбика остается против деления шкалы, соответствующего наибольшей температуре, даже после ее снижения. Это достигается путем разрыва столбика при охлаждении с помощью вставленного в измерительный капилляр штифта или сужения поперечного сечения этого капилляра. Для нового измерения необходимо легким встряхиванием вернуть столбик за нижнее деление шкалы.

Наиболее широко известным максимальным термометром является медицинский термометр. Его диапазон измерений от  $35$  до  $42^{\circ}\text{C}$ , цена деления шкалы равна  $0,1^{\circ}\text{C}$  и расстояние между штрихами шкалы не менее  $0,6\text{ мм}$ . Черными цифрами обозначены целые градусы. Цифра 37 выделяется на шкале каким-либо

образом, например звездочкой. Если термометр от комнатной температуры  $t_1$  погружен в переизмеряемую воду температуры  $t_2$ , то через 10 с показания термометра не должно отличаться от  $t_2$  более чем на  $0,02(t_2 - t_1)$ . Разность температур ( $t_2 - t_1$ ) должна быть не менее 15 К.

У минимальных термометров со спиртом в качестве термометрической жидкости в измерительный капилляр вставлена подвижная метка — штабик, у которого прилегающий к мениску торец выполнен таким образом, что при понижении температуры подвижная метка перемещается вместе со столбиком, а при повышении температуры остается на месте. При переворачивании термометра подвижная метка вновь перемещается к мениску.

У максимально-минимальных термометров (Джеймс Сикс, 1782 г., рис. 3.7) нижняя часть U-образной трубки заполнена ртутью, над ней в резервуаре и частично в капилляре с расширением находится спирт. В обоих плечах термометра на ртути плавают железные поплавки, которые сдвигаются при изменении температуры, но остаются на месте при обратном движении ртути. Максимальную и минимальную температуру за какой-то промежуток времени определяют по положению поплавков. В исходное положение на концы столбика поплавки устанавливают при помощи магнита.

Для измерения температуры жидкости в емкости на различной глубине используют опрокидывающиеся термометры. При переворачивании такого термометра столбик разрывается и ртуть перетекает в расширение капилляра, частично заполняя связанный со шкалой капилляр. По положению мениска отделенной части столбика определяют температуру в момент опрокидывания термометра. При глубоководных морских исследованиях таким способом можно определять температуру на глубине до 8 км, даже если при поднятии термометр проходит через более теплые слои. Для точных измерений необходимо вводить поправку на столбик при помощи вспомогательного термометра, так как чаще всего в момент отсчета термометр находится при другой температуре, чем при переворачивании.

**Контактные термометры.** Для позиционного автоматического регулирования температуры или сигнализации изготавливают контактные термометры со впаянными или вставленными контактами. Термометры, заполненные ртутью под давлением, оснащаются магнитными контактами. У термометров, заполненных без избыточного давления, положение контакта можно устанавливать с помощью винта в головке термометра.

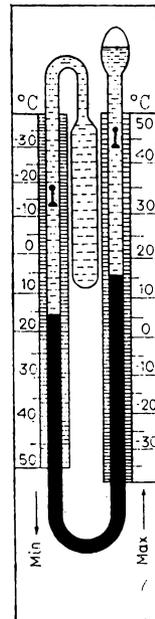


Рис. 3.7. Максимально-минимальный термометр

### 3.1.1.2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОПРАВКИ

#### 3.1.1.2.1. Пределы допустимой погрешности и случайная погрешность измерения]

Установленные правилами поверки [3.3, 3.4] пределы допустимой погрешности жидкостных стеклянных термометров, а также округленные значения случайных погрешностей измерения, которые могут выдерживаться со статистической достоверностью 95% при тщательном выполнении требований РТВ\* и инструкций по поверке, представлены в табл. 3.3. Для термометров, градуированных при частичном погружении, величина случайной погрешности может быть в 1,5—2 раза больше в зависимости от величины поправки на столбик. Эта случайная погрешность измерения обусловлена в основном случайной погрешностью метода по-

\* См. сноску на с. 34.

Пределы допустимой погрешности градуировки (ПП) и случайная погрешность измерения (ПИ) жидкостных стеклянных термометров, градуированных при полном погружении

1. Термометры с несмазывающей термометрической жидкостью

Диапазон измерения, °С	Цена деления шкалы, °С																			
	0,01		0,02		0,05		0,1		0,2		0,5		1		2		5		10	
	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ
(-59) - (-10)	-	-	-	0,02	-	0,03	0,3	0,03	0,4	0,05	0,5	0,1	1	0,2	2	0,5	5	1	10	3
(-10) - 110	0,02	0,01	0,1	0,01	0,02	0,02	0,2	0,02	0,3	0,05	0,5	0,1	1	0,2	2	0,5	5	1	10	3
110 - 210	-	-	-	0,02	-	0,05	-	0,4	0,1	0,5	0,5	0,2	1	0,3	2	0,5	5	1	10	3
210 - 310	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,5	1,0	0,2	2	0,3	2	0,5	5	1	10	3
310 - 410	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1,0	2,0	0,5	2	0,5	3	1,0	5	2	10	3
410 - 510	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1,0	2,0	0,5	3	0,5	4	1,0	5	2	10	3
510 - 610	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	2,0	4,0	1,0	3	1,0	4	1,0	5	2	10	3
610 - 810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	2,0	10	3	10	5

II. Термометры со смазывающей термометрической жидкостью

Диапазон измерения, °С	Цена деления шкалы, °С																					
	0,5		1		2		5		10													
	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ	ПП	ПИ				
(-200) - (-60)	-	1,0	3	1,0	4	1	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3
> (-60) - (-10)	1	0,3	2	0,5	4	1	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3
> (-10) - 110	1	0,3	2	0,5	3	1	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3
> 110 - 210	-	0,5	3	0,5	4	1	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3	5	2	10	3

верки. Она может быть снижена примерно вдвое, если в качестве образцового прибора использовать термометр сопротивления и, кроме того, если измерять только малые разности температур внутри небольшого температурного интервала.

У стандартных термометров пределы допустимой погрешности градуировки сохраняются в указанных в табл. 3.3 температурных интервалах независимо от пределов шкалы термометра.

У стандартных промышленных стеклянных термометров пределы допустимой погрешности почти всегда отнесены ко всей шкале (см. табл. 3.2).

### 3.1.1.2.2. Погрешность столбика термометрической жидкости и ее учет

При точных измерениях температуры в первую очередь следует учитывать погрешность столбика термометрической жидкости [3.3, 3.11]. Эта погрешность возникает в том случае, когда у термометра, градуированного при полном погружении, при измерении часть столбика жидкости выступает из измеряемой среды или когда у термометра, градуированного при частичном погружении, не выдерживается предписанная глубина погружения и средняя температура выступающей части столбика жидкости не соответствует заданному при градуировке значению. Например, если температура окружающего воздуха ниже, чем измеряемой среды, то термометр показывает заниженную температуру. Поэтому при высоких требованиях к точности необходимо вводить поправку на температуру выступающего столбика жидкости, если термометр не погружен на требуемую глубину или не имеет заданного распределения температуры по высоте столбика.

*Вспомогательный термометр с удлиненным резервуаром для определения средней температуры столбика жидкости.* Для учета погрешности столбика термометрической жидкости определяют фактическую его среднюю температуру специальным термометром, имеющим резервуар длиной от 5 до 20 см. Этот термометр должен быть возможно более плотно прикреплен к поверяемому термометру. Верхний конец его резервуара должен находиться на уровне мениска поверяемого термометра, нижний конец должен быть погружен по меньшей мере на 2 см в измеряемую среду (рис. 3.8).

*Термометры, градуированные при полном погружении.* Если у термометра с линейной шкалой, градуированного при полном погружении (например, ртутного термометра), часть столбика жидкости выступает из ванны, то при использовании вспомогательного термометра с удлиненным резервуаром поправку на выступающий столбик рассчитывают следующим образом:

$$K_f = (M_1 - M_2) \gamma (t - t_f), \quad (3.1)$$

где  $M_1$  — показание поверяемого термометра;  $M_2$  — деление шкалы поверяемого термометра,

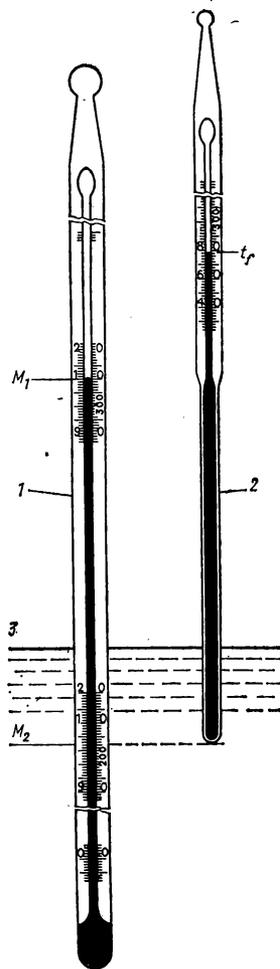


Рис. 3.8. Положение термометров при определении поправки на выступающий столбик для термометра, градуированного при полном погружении [3.3]: 1 — поверяемый термометр; 2 — вспомогательный термометр; 3 — поверхность ванны;  $M_1$  — показание поверяемого термометра;  $M_2$  — деление шкалы поверяемого термометра на высоте нижнего конца резервуара вспомогательного термометра;  $t_f$  — температура столбика

против которого расположен нижний конец резервуара вспомогательного термометра (см. рис. 3.8);  $t$  — температура ванны;  $t_f$  — показание вспомогательного термометра и  $\gamma$  — приведенный коэффициент расширения термометрической жидкости в стекле, зависящий от сорта стекла и температуры (рис. 3.9).

**П р и м е р.** Расчет поправки на выступающий столбик жидкости термометра из стекла Супермакс.

$$M_1 = 310^\circ\text{C}, M_2 = 205^\circ\text{C}, \gamma = 0,000182 \text{ K}^{-1},$$

$$t \text{ — температура ванны, } t_f = 280^\circ\text{C}.$$

В первом приближении температура ванны  $t = M_1$ . Тогда

$$K_f' = (310 - 205) 1,82 \cdot 10^{-4} (310 - 280) = 0,57\text{K}.$$

Это значение может быть уточнено последовательным приближением, если в уравнение (3.1) вместо  $M_1$  и  $t$  подставить значение  $M_1 + K_f'$ . Тогда поправка на выступающий столбик будет равна  $K_f'' = 0,59 \text{ K}$ .

Уравнение (3.1) нельзя использовать, если шкала основного термометра нелинейна, как у пентановых термометров. Тогда значения  $M_1 - M_2$  определяют из чувствительности  $E$  поверяемого термометра и из длины  $l$  резервуара вспомогательного термометра:  $M_1 - M_2 = l/E$ . Тогда

$$\gamma \cdot 10^{-5}, \text{K}^{-1}$$

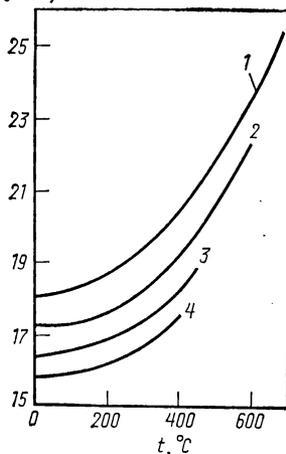


Рис. 3.9. Приведенный коэффициент расширения  $\gamma$  несмачивающей термометрической жидкости в некоторых сортах стекла: 1 — кварцевое; 2 — Супермакс; 3 — 2954; 4 — 16111

$$K_f = (l/E) \gamma (t - t_f). \quad (3.2)$$

В этом выражении чувствительность  $E$  равна отношению изменения  $\Delta L$  показания основного термометра в единицах длины к соответствующему изменению температуры  $\Delta t$ , т. е.  $E = \Delta L/\Delta t$ . Если чувствительность не постоянна вдоль шкалы, то ее определяют в интервале, в котором производится отсчет.

**П р и м е р.** У термометра с диапазоном измерения  $20-40^\circ\text{C}$  измеряемая температура отсчитывается между делениями шкалы  $30$  и  $35^\circ\text{C}$ . Для этого участка шкалы  $\Delta L = 101 \text{ мм}$ . Тогда при  $t - t_f = 5 \text{ K}$

$$E = 101/5 = 20,2 \text{ мм/К}. \quad (3.2a)$$

**Термометры, градуированные при частичном погружении.** Если такой термометр погружен в измеряемую среду на нужную глубину, но средняя температура выступающего столбика жидкости отличается от предусмотренной при градуировке температуры столбика  $t_s$ , тогда поправка на выступающий столбик будет равна

$$K_f = (l/E) \gamma (t_s - t_f). \quad (3.3)$$

Это уравнение справедливо, если метка погружения расположена на измерительном капилляре. При этом  $l$  — длина части столбика жидкости, которая должна выступать при градуировке термометра.

Если же у такого термометра метка погружения проходит по соединительному капилляру и он имеет внутреннее сечение, отличное от сечения измерительного капилляра, то необходимо определять длины отдельных частей столбика  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 3.10), а также соответствующие этим участкам шкалы значения чувствительности  $E_1$  и  $E_2$  и средние температуры  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$ .

Тогда поправка на выступающий столбик жидкости равна

$$K_f = \frac{l_1}{E_1} \gamma_1 (t_s - t_{f1}) + \frac{l_2}{E_2} \gamma_2 (t_s - t_{f2}) \quad (3.4)$$

Здесь  $l_1$  или  $l_2$  означают длины выступающего столбика жидкости между мениском  $s_0$  или меткой погружения  $s_e$  и местом сочленения капилляров  $s_v$ ;  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$  — средние температуры обоих участков столбика;  $t_s$  — температура столбика при градуировке и  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — приведенные коэффициенты расширения для температур  $(t_s + t_{f1})/2$  или  $(t_s + t_{f2})/2$ . Чувствительность  $E_1$ , соответствующая участку капилляра  $l_1$ , определяется аналогично  $E$  по уравнению (3.2а). Однако  $E_2$  не может быть определена простым измерением длины участка шкалы. Для этого необходимо охладить основной термометр на две различные температуры, которые должны лежать ниже  $s_0$ . Тогда чувствительность  $E_2$  рассчитывают по температурам ванны  $t_1$  и  $t_2$  и из соответствующих положений мениска столбика  $s_1$  и  $s_2$ :

$$E_2 = \frac{s_1 - s_2}{t_1 - t_2}. \quad (3.5)$$

Средние температуры участков выступающей части столбика жидкости  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$  в уравнениях (3.3) и (3.4) могут быть измерены одним или несколькими вспомогательными термометрами в зависимости от длины выступающего столбика. Средние температуры могут быть также измерены с помощью небольших вспомогательных термометров для отрезков столбика жидкости, средние температуры которых отличаются от температуры помещения не более чем на 10 К.

Пример (см. рис. 3.10):

$$l_1 = 120 \text{ мм}; E_1 = 0,57 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$\gamma_1 = 1,58 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; t_{f1} = 38 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$l_2 = 175 \text{ мм}; E_2 = 3,5 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$\gamma_2 = \gamma_1; t_{f2} = 55 \text{ }^\circ\text{С}; t_s = 30 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Используя (3.4), получаем  $K_f = -0,47 \text{ К}$ .

Если термометр, градуированный при частичном погружении, используется полностью погруженным, поправка на выступающий столбик жидкости будет равна

$$K_f = \frac{l}{E} \gamma (t_s - t), \quad (3.6)$$

где  $l$  — длина столбика жидкости от метки погружения до деления шкалы, соответствующего температуре ванны.  $\gamma$  определена для температуры  $(t_s + t)/2$ .

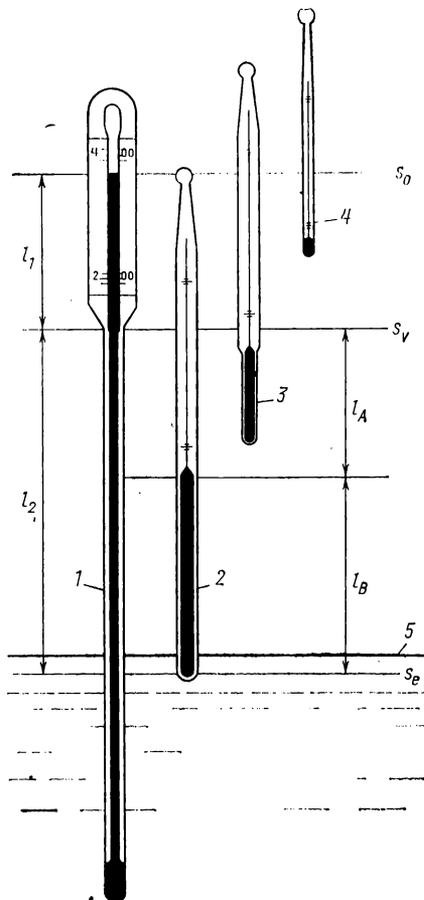


Рис. 3.10. Положение термометров при определении поправки на выступающий столбик для термометра, градуированного при частичном погружении [3.3]: 1 — поверочный термометр; 2, 3 — вспомогательные термометры с удлиненным резервуаром; 4 — вспомогательный термометр; 5 — поверхность ванны;  $l_1$  — длина столбика между мениском  $s_0$  и началом измерительного капилляра  $s_v$ ;  $l_2$  — длина столбика между  $s_0$  и меткой погружения  $s_e$ ;  $l_A$  и  $l_B$  — участки  $l_2$ , на которых температура столбика измеряется вспомогательными термометрами 2 и 3, из показаний которых определяется средняя температура столбика

Если термометр, градуированный при частичном погружении, опущен в ванну выше метки погружения, но не полностью, поправка на столбик жидкости будет равна

$$K_f = \frac{l_a}{E_a} \gamma_a (t_s - t_f) + \frac{l_b}{E_b} \gamma_b (t_s - t) \quad (3.7)$$

В этом выражении  $l_a$  — длина выступающего при измерении участка столбика жидкости и  $l_b$  — длина участка столбика жидкости, который должен выступать из ванны, но сейчас погружен. Для длин  $l_a$  и  $l_b$  должны быть определены чувствительности  $E_a$  и  $E_b$ ,  $\gamma_a$  и  $\gamma_b$  для температур  $(t_s + t_f)/2$  и  $(t_s + t)/2$ .

Для термометров Бекмана и экстремальных термометров необходимо определять соответствующие поправки на выступающий столбик жидкости, если их используют не в соответствии с условиями градуировки и инструкцией частично или полностью погруженными и если у термометров Бекмана средняя температура выступающего столбика жидкости отличается от указанных средних значений для различных номинальных температур. При расчете поправки для термометра Бекмана следует дополнительно учитывать, что шкала разности температур пригодна для номинальной температуры 20°С, но чувствительность термометра с повышением номинальной температуры снижается, так как из-за отделения части ртути количество ртути, используемой для измерения, уменьшается. Поэтому показания должны быть скорректированы при помощи коэффициента, который зависит от номинальной температуры и от температуры выступающего столбика жидкости и значение которого для номинальной температуры 20°С равно 1.

*Поправка на выступающий столбик жидкости при низких требованиях к точности.* При невысоких требованиях к точности (что имеет место в большинстве технических измерений) вполне достаточно ввести поправку на выступающий столбик, равную для термометров, градуированных при полном погружении,

$$K_f = n\gamma (M_1 - t_f), \quad (3.8)$$

при частичном погружении

$$K_f = n\gamma (t_s - t_f). \quad (3.9)$$

В этих выражениях  $t_f$  — средняя температура выступающего столбика;  $t_s$  — указанная для поверки термометра температура столбика;  $M_1$  — измеряемая температура;  $n$  — длина выступающего столбика, выраженная в делениях температурной шкалы. Для  $\gamma$ , К<sup>-1</sup>, можно использовать следующие средние значения в зависимости от вида термометрической жидкости:

Ртуть, ртуть—галлий . . . . .	0,00016
Сплав галлия . . . . .	0,00010
Пентан, спирт, толуол . . . . .	0,00100

Среднюю температуру выступающей части столбика основного термометра можно определять не специальным, а обычным вспомогательным термометром. Резервуар вспомогательного термометра следует прикреплять непосредственно к выступающей части основного термометра и обертывать металлической фольгой. При большой длине выступающего столбика термометрической жидкости измеряется температура в нескольких местах и затем определяется среднее значение температуры выступающего столбика жидкости.

### 3.1.1.2.3. Другие факторы, влияющие на точность измерений, их учет и способы их устранения

*Термическое старение.* При измерениях температуры должна быть гарантирована стабильность показаний во времени. Поэтому необходимо прежде всего уменьшить погрешность от термического старения, которая проявляется как повышение или депрессия показаний в результате объемных изменений стекла (см. 3.1.1.1). Это явление полностью устраняется стабилизацией наполненного термометра при высокой температуре (~на 20°С ниже температуры размягчения стекла). Достаточность стабилизации термометра, верхнее деление шкалы которого лежит выше 210°С, проверяется тем, что термометр выдерживают не менее

5 мин при температуре верхнего деления шкалы, медленно охлаждают на 50°С, а затем погружают в лед. После этого термометр снова выдерживают в течение 24 ч при температуре верхнего деления шкалы и охлаждают, как и в первом случае. Температура нагрева при этом не должна отклоняться на  $\pm 3$  К от верхнего деления шкалы. Термометр, погрешность которого в точке таяния льда после такой проверки превышает пределы, указанные в табл. 3.3, или который изменяет показания более чем на 0,3 деления, считается непригодным. Для уменьшения погрешности измерений в результате термического старения прецизионные термометры должны время от времени перепроверяться.

*Разрыв столбика термометрической жидкости.* Погрешности, вызванные разрывом столбика термометрической жидкости, который может возникнуть из-за растворенного в термометрической жидкости газа, а также из-за конденсации капелек жидкости на стенках капилляра выше мениска или в расширении капилляра (см. 3.1.1.1), могут быть устранены специальной обработкой термометра. Термометры перед использованием или перед установкой в агрегат рекомендуется проверять на отсутствие разрыва столбика и конденсации капелек жидкости. Отделенную часть столбика можно снова соединить с основной жидкостью, если охладить термометр настолько, чтобы вся жидкость ушла в резервуар (но ни в коем случае не до точки замерзания жидкости!). Затем после легкого постукивания снова нагреть термометр. Можно также осторожным нагревом термометра перегнать жидкость в предохранительное расширение капилляра и легким постукиванием соединить разделенные части жидкости. Одновременно можно устранить и конденсированные капли жидкости. Этот способ применим для термометров со шкалой до 250°С. Из-за перегрева и слишком сильного повышения избыточного давления при более высокой температуре можно легко повредить резервуар. Если термометр заполнен защитным газом, конденсированные в расширении капли можно перегнать в капилляр осторожным нагревом верхней части капилляра в пламени.

У откачанных ртутных термометров разрыв столбика и конденсированные капли можно устранить опрокидыванием термометра. Под действием силы тяжести часть ртути при осторожном постукивании отделяется от столбика и перетекает в расширение капилляра. При возвращении термометра в вертикальное положение она снова соединяется со ртутью, находящейся в капилляре. Если при опрокидывании термометра в расширение перетекает ртуть из резервуара, это значит, что в ртути еще содержатся остатки газа, которые могут быть удалены повторным опрокидыванием и осторожным нагревом.

*Влияние давления, параллакса и холостого хода.* На показания жидкостных стеклянных термометров оказывает влияние как внешнее, так и внутреннее давление. Влияние давления составляет у обычных термометров примерно 0,1 К/бар. Его надо учитывать прежде всего у термометров с ценой деления 0,01 и 0,02°С.

Внутреннее давление в ртутных термометрах вызывает небольшое повышение показаний на 0,05°С, если термометр расположен вертикально.

Чтобы при отсчете показаний термометра избежать ошибок из-за параллакса, плоскость наблюдения должна быть перпендикулярна к капилляру. У термометров со вложенной шкалой в этом случае первое деление над мениском кажется отрезком прямой на всей своей длине. Первое деление ниже мениска должно быть совмещено со своим отражением от ртути. Отсчет показаний значительно облегчается с помощью лупы.

Вследствие явления прилипания ртути к стенкам капилляра ртутные термометры обнаруживают наличие холостого хода при изменении температуры. Столбик поднимается или спадает после некоторой задержки скачкообразно. Легким постукиванием столбик термометра можно установить в правильное положение.

#### **3.1.1.2.4. Внесение поправок в показания при поверке термометров**

При высоких требованиях к точности измерений показания поверяемых термометров сравниваются с показаниями хорошо стабилизированных образцовых термометров, систематические погрешности которых должны быть исключены введением поправок (см. 5.2) [3.3].

Погрешности, соответствующие считываемым показаниям, могут иметь для различных участков шкалы разные значения. Корректировка показаний при 0°С, которая вызвана положительным смещением и депрессией, т. е. термическим старением (см. 3.1.1.1 и 3.1.1.2.3), называется поправкой точки таяния льда  $K_0$ . Она одинакова для всех участков шкалы, так что вполне достаточно определить ее при температуре таяния льда. Разница между поправкой показаний  $K$ , определенной при поверке термометра, и поправкой точки таяния льда  $K_0$  называется приведенной поправкой  $K_r$ . Таким образом

$$K_r = K - K_0 \text{ или } K = K_r + K_0. \quad (3.10)$$

Средние значения показаний поверяемого термометра, определенные многократными последовательными измерениями, сравнивают со средними показаниями образцового термометра, показания которого  $a_N$  скорректированы поправками  $K_0$ ,  $K_r$  и поправкой на выступающий столбик  $K_f$ . Поправку точки таяния льда образцового термометра необходимо определять заново через каждые три испытания; общую поправку  $K$  достаточно определять через более длительные промежутки времени.

Рассчитанное по образцовому термометру значение температуры  $t_N$ , т. е. температуры ванны, равно

$$t = t_N = a_N + K_{rN} + K_{0N} + K_{fN}. \quad (3.11)$$

Показание  $a_p$  поверяемого термометра сравнивают со скорректированными показаниями двух образцовых термометров, погрешность измерения которых должна быть не больше, чем указана в табл. 3.3. Поправка  $K_p$  поверяемого термометра тогда составляет

$$K_p = \frac{t_{N_1} + t_{N_2}}{2} - a_p - K_{fp}, \quad (3.12)$$

где  $a_p$  — среднее значение показаний поверяемого термометра и  $K_{fp}$  — его поправка на выступающий столбик.

## 3.1.2. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Измерение температуры манометрическими термометрами осуществляется с помощью упругого чувствительного элемента, который преобразует расширение термометрической жидкости (жидкостные манометрические термометры), зависящее от температуры давление пара жидкости (паровые манометрические термометры) или изменение давления газа (газовые манометрические термометры) в перемещение указателя [3.12].

### 3.1.2.1. ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

#### 3.1.2.1.1. Принцип действия и устройство

В жидкостных манометрических термометрах [3.13] металлический резервуар (термобаллон) соединен металлической капиллярной трубкой с упругим элементом (трубкой Бурдона). Вся система заполнена термометрической жидкостью.

При повышении температуры объем, занимаемый жидкостью, увеличивается соответственно разности теплового расширения жидкости и резервуара. Это воспринимает чувствительный к изменению объема упругий элемент. Таким образом, форма упругого элемента изменяется в зависимости от температуры, а изменение объема соответствует изменению давления жидкости на упругий чувствительный элемент. В манометрических термометрах отсутствует погрешность, связанная с гистерезисом, так как в отличие от манометров они являются замкнутыми, заполненными жидкостью системами.

Кроме того, эти термометры имеют практически линейную шкалу температуры. Деформация упругого элемента преобразуется в перемещение указателя с помощью передаточного механизма.

Основными параметрами для оценки жидкостных манометрических термометров является изменение внутреннего давления жидкости при изменении температуры от  $t_0$  до  $t$ :

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{(\gamma - 3\alpha) V_F}{\chi V + C}. \quad (3.13)$$

Здесь  $\Delta p$  — изменение давления жидкости;  $\gamma$  — объемный коэффициент расширения жидкости;  $\alpha$  — линейный коэффициент расширения материала термобаллона;  $V_F$  — объем термобаллона;  $V$  — объем жидкости в системе;  $C$  — постоянная, определяемая конструкцией термометра;  $\chi$  — сжимаемость.

В качестве измерительного элемента манометрического термометра применяют трубчатые пружины Бурдона (манометрические пружины) постоянной чувствительности. Объем термобаллона должен быть рассчитан так, чтобы изменение давления в пружине было достаточно для нормального или расширенного диапазона измеряемых температур  $t - t_0$ .

При одной и той же манометрической пружине объем термобаллона должен изменяться обратно пропорционально диапазону температур.

Чтобы уменьшить погрешность, вызываемую изменениями температуры пружины и капиллярного трубопровода, их объем ( $V - V_F$ ) должен быть мал по сравнению с объемом термобаллона  $V_F$ .

В том случае, когда требуется более широкий диапазон измеряемых температур, погрешность измерения, связанную с изменением температуры капилляра и пружины, можно уменьшить за счет того, что только часть увеличивающегося при повышении температуры объема жидкости поступает в капилляр. Для этого можно в большой термобаллон вложить упругую гофрированную мембранную коробку, наполненную воздухом. При повышении температуры эта мембранная коробка сжимается под действием увеличивающегося давления жидкости. Часть объема жидкости остается внутри термобаллона и только малая часть поступает в капиллярную трубку и манометрическую пружину.

Погрешность измерения из-за трубопровода и пружины не снижается, если объем термобаллона уменьшить, разместив внутри него стальной сердечник.

*Термометрические жидкости.* Жидкостные манометрические термометры, наполненные ртутью, используют для измерения температур от  $-35$  до  $500^\circ\text{C}$ , в некоторых случаях до  $600^\circ\text{C}$ . Наиболее распространенные диапазоны измерения,  $^\circ\text{C}$ , приведены ниже:

Нормальные	Со смещенным нулем	Нормальные	Со смещенным нулем
0—40	(—10)—30	0—160	40—120
0—50	(—20)—30	0—250	80—300
0—80	(—30)—50	0—400	100—500
0—100	—	0—500	—
0—120	—		

Термометрами, наполненными ртутноаллиевым сплавом, можно измерять температуры до  $-55^\circ\text{C}$ . Термометры с органическими жидкостями, такими как толуол или ксилол, применяют для измерения температур от  $-30^\circ\text{C}$  до  $350^\circ\text{C}$ . Благодаря высокому коэффициенту расширения этих жидкостей объем термобаллона, достаточный для того, чтобы получить необходимое для измерения изменение объема, может быть существенно уменьшен. Такие термометры используют в тех случаях, когда термоприемник должен быть не слишком большим, например при измерении температуры подшипников.

Как и у стеклянных термометров, рабочие жидкости должны быть хорошо очищены. Ртуть не должна содержать даже ничтожных количеств воды, масел и механических загрязнений во избежание засорения капилляра. Жидкости должны быть хорошо стабилизированы. Вся система перед наполнением термометрической жидкостью должна быть тщательно вакуумирована. Для исключения влияния остатков воздуха и паров наполнение жидкостью следует осуществлять так, чтобы уже в начале шкалы жидкость находилась под повышенным давлением.

У ртутных манометрических термометров начальное давление составляет 80—100 бар, а к концу шкалы оно повышается до 150—250 бар. Термометры с органической жидкостью заполняют при давлении от 5 до 50 бар.

Металлический термобаллон, заполненный ртутью, и присоединенный к нему капилляр образуют чувствительный элемент (рис. 3.11). Если отсчет температуры необходимо производить в непосредственной близости места изменения, чувстви-

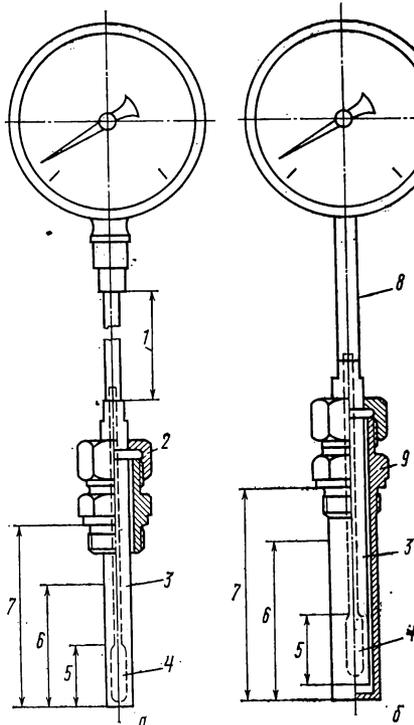


Рис. 3.11. Жидкостные манометрические термометры (по ДИН 16160 лист 4): а — с соединительным капилляром без защитной трубки; б — с шейкой и чехлом; 1 — длина соединительного капилляра; 2 — резьбовой штуцер; 3 — термочувствительный элемент; 4 — термоприемник; 5 — длина термоприемника; 6 — минимальная глубина погружения; 7 — установочный размер; 8 — шейка; 9 — защитный чехол

тельный элемент жестко соединяют с измерительной частью с помощью короткой шейки. Если отсчет и запись температуры надо производить на некотором удалении от объекта измерения, чувствительный элемент соединяют с измерительной частью гибким капиллярным трубопроводом (рис. 3.12). Все измерительные приспособления образуют единую систему.

Чувствительный элемент может быть погружен в измеряемую среду без дополнительных крепежных приспособлений. Для простого крепления, например в емкость или в трубопровод, к чувствительному элементу можно привинтить соединительный фланец или можно снабдить термометр переходником с накидной гайкой. В этом случае чувствительный элемент может быть вмонтирован в трубопровод через резьбовой штуцер с уплотнением (см. рис. 3.11, а) или вставлен в защитный чехол (см. рис. 3.11, б).

**Минимальная глубина погружения.** Наружный диаметр чувствительного элемента для температур до 300°С составляет 17—18 мм, для более высоких температур 13—14 мм. Монтажная длина может быть от 100 до 1000 мм. Толщина стенки чувствительного элемента рассчитана на высокое давление без дополнительного защитного чехла. Чтобы избежать погрешности, связанной с теплопередачей в аксиальном направлении от датчика наружу, чувствительный элемент должен быть достаточно глубоко погружен в измеряемую среду. Поэтому необходимая минимальная глубина погружения обозначается риской на чувствительном элементе или сообщается изготовителем

в численном виде. Она в значительной мере зависит от условий теплопередачи и вместе с тем от вида измеряемой среды (вода, вязкие вещества, такие как масло, и т. п.). При обычном конструктивном оформлении она составляет примерно 90—120 мм, при узком диапазоне температур и большой длине датчика необходима глубина погружения до 200 мм.

Чувствительный элемент, капиллярную трубку и манометрическую пружину ртутных манометрических термометров изготавливают из стали. Для температуры до 400°С используют углеродистую сталь, для более высоких температур — легированную теплостойкую сталь. Благодаря низкой теплопроводности этих материалов погрешность, связанная с теплопередачей в аксиальном направлении, относительно мала. Верхнюю часть чувствительного элемента изготавливают

чаще всего из тех же сталей (при низких механических напряжениях можно использовать малолегированные стали). В случае необходимости чувствительные элементы изготавливают из материала, химически устойчивого к воздействию измеряемой среды.

**Капиллярные трубопроводы:** Капиллярные трубопроводы с наружным диаметром 2—7 мм изготавливают из нелегированной стали. Их внутренний диаметр должен быть возможно меньше (0,1—0,35 мм) для того, чтобы при изменении тем-

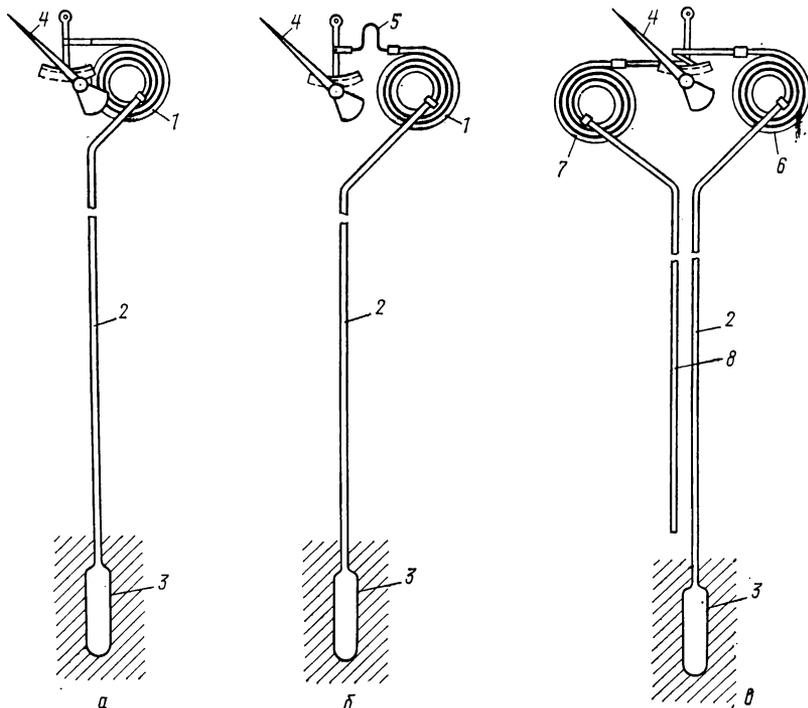


Рис. 3.12. Жидкостные манометрические термометры, термокомпенсирующие устройства:

*а* — простая конструкция без компенсации температуры; *б* — с частичной температурной компенсацией (исключено влияние только на измерительное устройство); *в* — с полной температурной компенсацией (исключено влияние на соединительный капилляр и измерительное устройство); 1 — манометрическая пружина; 2 — соединительный капилляр; 3 — термopриемник; 4 — указатель; б — биметалл; 6 — измерительный механизм; 7 — компенсирующий механизм; 8 — компенсационный капилляр

пературы соединительные элементы оказывали минимальное влияние на результаты измерений. Капиллярные трубопроводы требуют очень аккуратного обращения. Радиус их изгиба не должен быть менее 50 мм, резкие перегибы запирают капилляр. Для защиты от коррозии и повреждений их покрывают краской, наносят резиновое или пластиковое покрытие, затем помещают в свинцовую трубку с толщиной стенки ~1 мм или заключают в медную оболочку с толщиной стенки 0,5 мм. Для защиты от механических повреждений капилляры можно помещать в металлическую оплетку или в стальную трубку. Для уменьшения погрешности из-за кратковременных колебаний температуры в помещении соединительный трубопровод термометра изолируют. Все соединения в термометре должны быть сварными и выполнены с особой тщательностью для предотвращения утечки ртути.

У манометрических термометров с органической жидкостью термобаллон и соединительный капилляр могут быть изготовлены из меди или латуни с паяными

соединениями. Из-за большей вязкости органической жидкости в этих термометрах применяют капилляры большего внутреннего диаметра. Такие термометры инерционнее, чем ртутные.

Для измерений в газах и воздухе изготавливают спиральные термодатчики (рис. 3.13). Из-за большой поверхности и довольно малого диаметра трубки такие термодатчики имеют улучшенный теплообмен с окружающей средой и обеспечивают достаточно малое запаздывание показаний. Для измерений комнатной температуры используют плоские манометрические пружины с большой поверхностью или гофрированные мембранные коробки, наполненные жидкостью; их деформация передается на отсчетный механизм. С помощью удлиненных термодатчиков можно очень просто измерять среднюю температуру неравномерных температурных полей.



*Манометрические пружины.* В качестве упругих элементов термометров используют изогнутые в виде спирали пружины из бесшовных труб, сплюснутых при горячей деформации так, что их внутреннее сечение представляет овал высотой около 0,2 мм. Один конец пружины припаян к неподвижной скобе, перемещение другого конца пружины величиной 4—7 мм передается с помощью передаточного механизма, состоящего из тяги, зубчатого сегмента и шестеренки, на указатель круглой 270-градусной шкалы. Изменением точки прикрепления тяги можно расширить или сузить диапазон измерений. С помощью механизма настройки указателя, регулирующего положение оси вращения сегмента, прибор настраивают по образцовому термометру, например по ртутному стеклянному термометру (регулировка нулевой отметки). Путем создания предварительного натяга пружины можно сдвинуть начало шкалы к более высокой температуре, например к 100°С.

*Стабилизация.* Перед градуировкой жидкостной манометрический термометр необходимо достаточно долго стабилизировать при

Рис. 3.13. Ртутный манометрический термометр для измерения в газах и окружающем воздухе (модель Dreuer, Rosenkranz and Droop)

максимальной температуре использования термометра. При этом изменение показаний не должно превышать предела допустимой погрешности термометра. В производственных условиях термометры периодически поверяют.

*Простота использования.* Время, необходимое для монтажа ртутных манометрических термометров без дополнительных защитных гильз, мало благодаря их конструкции. Поэтому их используют в простых случаях автоматического регулирования, сигнализации и управления, для чего измерительную часть термометров снабжают контактными устройствами. Применение соединительных капилляров длиной более 30 м нежелательно. Для электрической передачи показаний в измерительную часть термометра встраивают датчик сопротивления или индуктивный датчик.

### 3.1.2.1.2. Погрешности измерения и их корректировка

Пределы допустимой погрешности измерения жидкостных манометрических термометров существенно зависят от пределов допустимой погрешности приборов, измеряющих давление. Для термометров без устройств, компенсирующих влияние окружающей температуры, установлены следующие пределы допустимой погрешности, если манометрическая пружина и капиллярный трубопровод находятся при той же температуре, при которой производили градуировку:

1% от диапазона шкалы для приборов 1-го класса,

2% от диапазона шкалы для приборов 2-го класса.

В диапазоне измерения от —20 до 30°С предел допустимой погрешности для приборов 1 класса составляет 0,5 К, а в диапазоне 0—400°С 4 К.

Поскольку жидкостные манометрические термометры по принципу действия подобны жидкостным стеклянным термометрам, источники их погрешности также

подобны. Кроме того, наличие металлических соединительных капилляров, а также конструкция и свойства манометрических пружин создают дополнительные источники возможных погрешностей. Перегрев может приводить к повреждению манометрической пружины. Деформации из-за недопустимого перегиба капиллярного трубопровода или из-за вмятин на защитной гильзе могут приводить к изменению показаний.

*Влияние соединительного капилляра.* Величина погрешности, возникающей при изменении температуры соединительного капилляра и манометрической пружины, аналогичная погрешности на выступающий столбик стеклянного термометра, может быть различной в зависимости от конструкции термометра. Погрешность  $f$ , соответствующая изменению окружающей температуры на  $\Delta t$  относительно температуры градуировки термометра, определяется из эффективного объема манометрической трубки  $V_M$ , соединительного капилляра  $V_K = ql$  ( $q$  — внутреннее сечение,  $l$  — длина капилляра) и объема жидкости в термобаллоне  $V_F$ :

$$f \approx \frac{V_M + V_K}{V_F} \Delta t. \quad (3.14)$$

Величину погрешности, связанной только с манометрической пружиной, можно считать равной примерно  $\pm 0,8\%$  от диапазона шкалы на каждые  $\pm 10$  К изменения ее температуры.

Величина погрешности, связанная с изменением температуры соединительного капилляра, составляет  $\pm 0,1$ — $0,2\%$  диапазона шкалы на каждые  $\pm 10$  К и  $1$  м длины капилляра при отсутствии компенсации.

Если показания не корректируются, то погрешность термометров без температурно-компенсирующего устройства (см. рис. 3.12, а) равна сумме погрешностей, связанных с соединительным капилляром и измерительным прибором.

*Частичная компенсация.* Погрешность, обусловленная изменениями температуры манометрической пружины, может быть скомпенсирована температурочувствительным биметаллическим элементом, вставленным между манометрической пружиной и передаточным механизмом (см. рис. 3.12, б). Так как объем манометрической пружины изменяется с изменением температуры термоприемника, полная компенсация возможна только при определенной температуре термоприемника. Поэтому компенсация рассчитана на среднюю температуру термоприемника. Остаточная погрешность такого термометра с частичной компенсацией при правильной установке термобиметаллического элемента составляет примерно  $\pm 0,05\%$  от диапазона шкалы на каждые  $\pm 10$  К колебаний температуры измерительной части прибора. При обычных колебаниях температуры помещения и длине соединительного капилляра до  $7$  м такая компенсация вполне достаточна и влиянием колебаний температуры соединительного капилляра можно пренебречь.

*Полная компенсация.* При больших колебаниях температуры окружающей среды и длинном соединительном капилляре рекомендуется возможно более полная компенсация возникающих погрешностей. Для этого наряду с описанной выше компенсацией влияния температуры манометрической пружины с помощью термобиметалла можно дополнительно исключить влияние температуры соединительного капилляра путем применения самокомпенсирующего капилляра. Он состоит из коррозионностойкой стальной трубки, в которую вставлена проволока из материала с минимальным тепловым расширением, например из инвара (железоникелевого сплава с  $36\%$  Ni). Пространство между проволокой и стенками трубки рассчитано таким образом, чтобы изменение его объема от температуры было близко к объемному расширению ртути.

В другом способе полная температурная компенсация на изменение температуры манометрической пружины и соединительного капилляра достигается тем, что, кроме основного капилляра, к термобаллону термометра подводится второй, компенсационный капилляр (см. рис. 3.12, в), который воздействует на компенсационную пружину, размещенную рядом с измерительной пружиной Бурдона. Обе пружины включены навстречу друг другу через дифференциальную тягу так, что температурное влияние на измерительную пружину и капиллярный трубопровод компенсируется. Оба капилляра чаще всего завальцовывают в общую

медную оболочку (рис. 3.14) или помещают в общую металлическую оплетку. Следует отметить, что работоспособность такого устройства меньше, чем компенсированных приборов. Полная компенсация в этом случае происходит также только для одной температуры термодатчика. Однако влияние температуры окружающей среды настолько мало, что колебаниями до  $\pm 30^\circ\text{C}$  относительно нормальной температуры при длине капилляра до 30 м можно пренебречь.

**Влияние высоты.** Жидкостные манометрические термометры обычно градуируются так, что термобаллон и измерительный механизм находятся на одном уровне. Если измерительный механизм расположен выше или ниже термодатчика, то возникает погрешность измерения вследствие воздействия на манометрическую пружину избыточного или недостаточного статического давления столба жидкости.

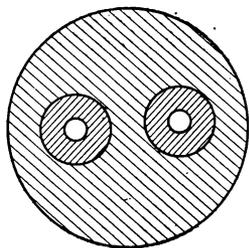


Рис. 3.14. Двойной капилляр с медной оболочкой

Величина этой погрешности зависит от упругой деформации термодатчика и в некоторых случаях от наличия в термометре остаточных пузырьков воздуха. Для ртутных термометров погрешность показаний можно считать равной 0,05—0,08% от диапазона шкалы на каждый метр разницы высот. Эту погрешность можно устранить на основании сравнительных измерений сдвигом нуля при установке термометра с помощью устройства для регулировки положения указателя.

Изменение атмосферного давления практически не влияет на показания. Однако если термочувствительный элемент ртутного манометрического термометра установлен в рабочий объем, находящийся под давлением без защитной гильзы, то вследствие деформации термочувствительного элемента возникает погрешность, равная  $+0,7\%$  от диапазона шкалы на каждые 100 бар избыточного давления.

### 3.1.2.2. ПАРОВЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

#### 3.1.2.2.1. Принцип действия и устройство

Паровые манометрические термометры отличаются от жидкостных тем, что у них резервуар термодатчика только частично заполнен легкокипящей жидкостью (рис. 3.15, а).

Давление пара жидкости возрастает экспоненциально с повышением температуры (рис. 3.16). Оно зависит только от температуры и не зависит от количества жидкости в резервуаре. Пока в резервуаре есть жидкость, пар не может быть перегрет. Давление пара воздействует на манометрическую пружину, деформация которой под действием разности внутреннего и атмосферного давлений является показателем температуры. В соответствии с кривой давления пара расстояние между соседними делениями шкалы с повышением температуры сильно возрастает.

**Термометрическая жидкость.** Термометрические жидкости для различных диапазонов измерения выбирают так, чтобы начало диапазона измерения лежало выше температуры кипения жидкости. Сверху диапазон измерений ограничен критической температурой или термической устойчивостью жидкости. В качестве таких жидкостей применяют, например, пропан, этиловый эфир, толуол и ксилол.

Существуют термометры с пропаном для диапазона температур от  $-40$  до  $+40^\circ\text{C}$ , с этиловым эфиром от  $40$  до  $195^\circ\text{C}$ , с двуокисью серы от  $0$  до  $160^\circ\text{C}$ , с этиловым спиртом от  $85$  до  $245^\circ\text{C}$  и с ксилолом от  $150$  до  $360^\circ\text{C}$ . В особых случаях, например для исследования состояния пара, в качестве термометрической жидкости используют исследуемую жидкость [3.14]. Давление пара на верхнем делении шкалы составляет от 15 до 60 бар. Жидкости должны быть очень тщательно очищены и аккуратно залиты в термобаллон, так как даже незначительные остатки газа или воздуха, а также загрязнения стенок термобаллона могут существенно влиять на постоянство показаний. Объем термобаллона и количество термометри-

ческой жидкости соразмерены так, что при максимальной температуре термометра в резервуаре все еще остается жидкость и что при самой низкой температуре резервуар заполнен жидкостью примерно на 60%.

*Требования к термобаллону и его заполнению.* Форма термобаллона и способ заполнения его жидкостью зависят от того, выше или ниже температура термобаллона, чем температура окружающей среды, соединительного капилляра и манометрической пружины. В большинстве случаев измеряемая температура выше окружающей температуры. Для таких измерений капиллярная трубка введена в термобаллон настолько, что при температуре нижнего предела шкалы она погружена в жидкость (см. рис. 3.15, а). Поэтому соединительный капилляр и манометрическая трубка при любой температуре окружающей среды заполнены жидкостью.

При больших манометрических пружинах, т. е. при больших циферблатах и указателях и при длинных соединительных капиллярах, объем термобаллона должен быть

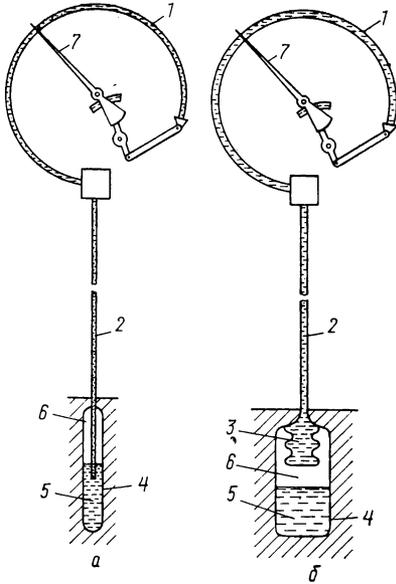


Рис. 3.15. Паровой манометрический термометр: а — нормальное исполнение; б — с сифоном в термобаллоне; 1 — манометрическая пружина; 2 — соединительный капилляр; 3 — сифон; 4 — термобаллон; 5 — жидкость; 6 — пар; 7 — указатель

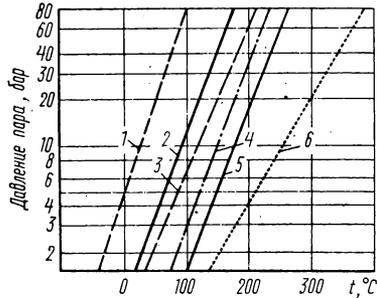


Рис. 3.16. Кривые давления пара различных термометрических жидкостей для паровых манометрических термометров: 1 — пропан; 2 — хлористый этил; 3 — этиловый эфир; 4 — этиловый спирт; 5 — вода; 6 — кислота

больше, чем при более компактном исполнении прибора. Поэтому промышленные термометры с глубиной погружения 160—200 мм изготавливают с защитной гильзой диаметром 17 мм, тогда как термометры для автомобильных моторов имеют длину 60 и диаметр 8—10 мм. При изменении температуры часть жидкости испаряется или конденсируется, поэтому аксиальный тепловой поток от термодатчика к соединительному капилляру и далее в окружающее пространство больше, чем у жидкостных манометрических термометров. Для уменьшения погрешности, связанной с теплоотводом, и снижения инерционности показаний термометра поверхность термобаллона делают возможно большей.

Если измеряемая температура ниже температуры окружающей среды, при больших колебаниях температуры термодатчика или капилляра в последнем из-за испарения жидкости могут образовываться пузырьки пара, которые плохо удаляются из тонкого трубопровода и вызывают толчки давления.

В этом случае в течение длительного времени наблюдаются нерегулярные прерывистые скачки стрелки значительной амплитуды. Если измеряемая температура может быть как выше, так и ниже температуры окружающей среды, то для исключения толчков давления в термобаллон, кроме термометрической жидкости,

добавляют несмешивающуюся с ней вспомогательную жидкость с большим удельным весом. Конец капилляра в термобаллоне должен быть погружен в эту жидкость.

Термометрическая жидкость располагается выше вспомогательной жидкости; последняя заполняет соединительный капилляр и манометрическую пружину. В качестве вспомогательной жидкости могут быть использованы раствор хлористого кальция, глицерин и водно-глицериновая смесь. Применение вспомогательной жидкости исключает образование пузырьков пара в соединительном капилляре при любой температуре окружающей среды.

Для обеспечения надежности вспомогательную жидкость отделяют от паров термометрической жидкости встроенным в термобаллон сифоном (см. рис. 3.15, б). Так как при этом объем термобаллона становится больше, инерционность термометра несколько увеличивается.

Если температура термобаллона всегда заведомо ниже температуры окружающей среды, то можно отказаться от выступающей в термобаллон части капилляра. Тогда, если манометрическая пружина термометра расположена выше термобаллона, в соединительном капилляре и в манометрической пружине всегда находится пар.

В паровых манометрических термометрах с повышением температуры сильно возрастает давление и уже при небольшом превышении максимальной температуры существует опасность перегрузки манометрической пружины. Паровой манометрический термометр можно сделать устойчивым к перегреву, если его заполнить таким количеством термометрической жидкости, которое при максимальной температуре полностью превратилось бы в пар. Тогда при дальнейшем повышении температуры в термобаллоне будет находиться лишь перегретый пар, давление которого изменяется с температурой незначительно. При этом необходимо предотвратить переливание жидкости из соединительного капилляра обратно в термобаллон. Для этого выше термобаллона из соединительного капилляра образуют охлаждаемый шлейф. Кроме того, к соединительному капилляру подсоединяют сифон со сжатым воздухом так, что при достижении определенного давления пара жидкость отсекается от термобаллона. Благодаря такому устройству защита от перегрева действует независимо от колебаний температуры соединительного капилляра [3.14], так как тогда в капилляре выше холодильника находится только жидкость, ниже — только пар.

*Длина соединительного капилляра.* Длина медного соединительного капилляра с наружным диаметром около 3 мм и внутренним 0,6—0,8 мм может составлять 50 м. Большое удаление нецелесообразно не только из-за затруднений при прокладке капиллярного трубопровода. При слишком длинном капилляре гидродинамическая передача давления на манометрическую пружину приводит к недопустимо большой инерционности прибора.

*Время установления показаний и шкала.* Запаздывание показаний паровых и ртутных манометрических термометров очень мало прежде всего из-за хорошей теплопроводности защитной гильзы и жидкости, а также из-за хорошего теплообмена между конденсирующейся на стенках термобаллона жидкостью и ее паром. Несмотря на относительно большой диаметр защитной гильзы, время установления полупоказания таких термометров в воде вдвое меньше, чем у термометров и термометров сопротивления в защитном чехле диаметром только 9 мм.

Паровые манометрические термометры могут иметь узкие диапазоны измерения. Так как расстояние между делениями шкалы для равных интервалов температуры увеличивается с повышением температуры, диапазон измерения выбирают так, чтобы измеряемая температура попадала в верхнюю треть шкалы.

Благодаря большому развиваемому усилию, высокой надежности в эксплуатации и высокой чувствительности в конце шкалы эти термометры используют в автоматических регуляторах прямого действия.

### 3.1.2.2.2. Погрешности измерения и их корректировка

Пределы допустимой погрешности паровых манометрических термометров, обусловленные их конструктивными особенностями, такие же, как и у жидкостных стеклянных термометров, т. е. 1—2% от диапазона шкалы. Благодаря увели-

чению расстояния между делениями шкалы, соответствующими разности температур в один градус, погрешность в градусах к концу шкалы уменьшается.

В отличие от жидкостных стеклянных термометров паровые манометрические термометры нечувствительны к колебаниям температуры окружающей среды и в них не используются компенсационные капиллярные трубопроводы. Деформация термоприемника и соединительного капилляра также не влияет на показания. Однако изменение атмосферного давления, воздействующего на манометрическую пружину, приводит к погрешности, величина которой зависит от давления в измерительной системе. Эта погрешность может составлять в начале шкалы до  $\pm 2$  К, а в последней трети шкалы только  $\pm 0,2$  К при изменении атмосферного давления на  $\pm 40$  мбар.

Как и в жидкостных манометрических термометрах, из-за статического давления столба термометрической жидкости в соединительном капилляре разность высот между термоприемником и манометрической пружиной вызывает погрешность, величина которой зависит от плотности жидкости. Если соединительный капилляр заполнен парами, этой погрешностью можно пренебречь. Однако если капилляр заполнен жидкостью, то этой погрешностью пренебречь нельзя и у паровых термометров она больше, чем у жидкостных. Она выражается как смещение нуля, которое может быть скорректировано изменением предварительного натяжения манометрической пружины с помощью приспособления для установки положения указателя.

Величина этой погрешности зависит от типа жидкости в термобаллоне. Чем больше давление ее паров при соответствующей температуре, тем меньше влияние высоты. Необходимо только отметить, что манометрическая пружина должна быть расположена выше термоприемника настолько, чтобы статическое давление жидкости было не меньше, чем давление пара жидкости при температуре начала шкалы.

### 3.1.2.3. ГАЗОВЫЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Газовые манометрические термометры представляют собой газовые термометры постоянного объема, у которых зависящее от температуры изменение давления передается на манометрическую пружину. Развиваемое ими усилие значительно меньше, чем у ртутных или паровых манометрических термометров, так как давление газа изменяется с температурой незначительно. Технические термометры заполняются азотом или гелием под давлением не менее 5 бар, чаще всего 15—20 бар.

Таковыми термометрами можно измерять температуры от  $-125^{\circ}\text{C}$ , но иногда измеряют и более низкие температуры (критическая точка для азота равна  $-147^{\circ}\text{C}$ , для гелия  $-268^{\circ}\text{C}$ ). Допустимая максимальная температура составляет около  $550^{\circ}\text{C}$ , если термочувствительный элемент изготовлен из нержавеющей стали. Минимальный рабочий диапазон равен 80 К. Длина соединительного капилляра может достигать 30 м.

Более узкий диапазон шкалы до 250 К при хорошей надежности может быть получен, если давление газа передавать через короткий соединительный капилляр на пневматический преобразователь. При этом небольшое усилие, развиваемое датчиком давления малого объема, уравновешивается давлением воздуха, пропорциональным измеряемому давлению. Это давление воздуха через соединительный трубопровод воздействует затем на подключенный показывающий прибор, развивающий большее усилие. Такие устройства благодаря их высокой надежности, точности и чувствительности применяют для автоматического регулирования температуры [3.15].

Газовые термометры имеют практически линейную шкалу, так как давление газа возрастает пропорционально температуре. Незначительное отклонение от линейности можно отнести за счет неидеального поведения газа, изменения объема термобаллона и упругой деформации манометрической пружины. Если объем пружины и капилляра мал по сравнению с объемом термобаллона, то влиянием колебаний температуры окружающей среды на показания можно пренебречь. Поэтому объем термобаллона должен быть возможно больше, по меньшей мере в 40 раз больше объема капилляра и манометрической пружины. Благодаря высо-

кому исходному давлению в системе показания термометра не зависят от колебаний атмосферного давления и разности уровней термобаллона и пружины. Так как теплоемкость газа-наполнителя очень мала, инерционность газовых термометров меньше, чем других манометрических термометров с одинаковым диаметром термобаллона.

### 3.1.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

В механических термометрах расширения (дилатометрических и биметаллических) измерение температуры основано на различии температурных коэффициентов линейного расширения двух веществ.

#### 3.1.3.1. ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

В дилатометрических термометрах расширения два стержня из материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения одним концом скреплены друг с другом, разница перемещений подвижных концов служит для измерения температуры. В качестве тел с малым расширением применяют стержни из кварца, фарфора или инвара. Эти стержни помещают в закрытые с одной стороны металлические трубки с большим коэффициентом линейного расширения и закрепляют пайкой или сваркой.

Трубки изготавливают из латуни для температур до 300°C, из никеля до 600°C и из хромоникелевой стали до 1000°C (рис. 3.17).

Из-за малой разницы теплового расширения трубки и стержня трубчатые датчики должны быть относительно длинными (300 мм). Кроме того, должно быть предусмотрено передающее звено, которое обеспечивало бы пере-

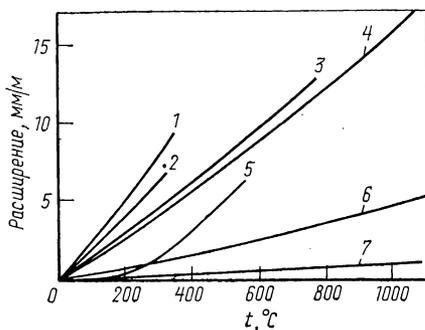


Рис. 3.17. Тепловое расширение материалов для дилатометрических термометров: 1 — алюминий; 2 — латунь; 3 — никель; 4 — нихром; 5 — инвар; 6 — фарфор; 7 — кварц

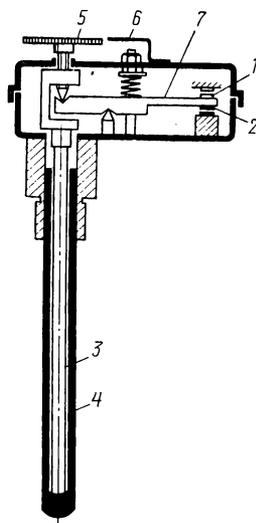


Рис. 3.18. Дилатометрический терморегулятор: 1 — ограничитель отклонения; 2 — контакт; 3 — внутренний стержень с малым коэффициентом линейного расширения; 4 — оболочка с высоким коэффициентом линейного расширения; 5 — установочная шкала; 6 — указатель; 7 — передаточное звено

мещение указателя на шкале. Из-за неточности передаточного механизма погрешность измерения составляет около 2% от измеряемого интервала температур.

Дилатометрические термометры могут развивать большие усилия, поэтому их часто используют в качестве регулирующего устройства. В простейшем исполнении дилатометрические регулирующие термометры снабжены электрическими контактами для двухпозиционного регулирования (рис. 3.18); при более высоких требованиях к качеству регулирования они могут быть использованы в сочетании

с гидравлическими или пневматическими регуляторами в качестве чувствительного элемента.

Из-за длинных металлических трубок, ведущих от объекта измерения наружу, относительно велик отвод тепла, в результате чего при измерениях стержневыми dilatометрическими термометрами возникает большая погрешность. По этой причине на шкалы таких термометров наносят не температурные, а относительные деления (например, 100 делений). Соответствие этой шкалы температуре устанавливают при градуировке по образцовому термометру на месте установки.

Для автоматического регулирования многих процессов очень важна скорость срабатывания dilatометрических термометров при быстрых изменениях температуры. Конечное значение температуры достигается довольно медленно, так как выравнивание температуры замедляется из-за теплоотвода вдоль трубок и, кроме того, внутренний мало расширяющийся стержень принимает конечную температуру со значительным отставанием.

Установив на трубопровод или нагреватель нерасширяющийся стержень, можно определять их температуру по разности расширений так же, как по стержневому dilatометрическому термометру.

### 3.1.3.2. БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Биметаллы состоят из двух прочно соединенных между собой примерно одинаковых по толщине слоев металлов или сплавов с разными коэффициентами теплового расширения.

При изменении температуры биметалл изгибается в сторону слоя материала с меньшим тепловым расширением. Этот изгиб передается на указатель и служит для определения температуры [3.16—3.18].

#### 3.1.3.2.1. Определение параметров биметаллов

Прогиб  $A$  нагруженной на одном конце биметаллической пластины длиной  $L$  и толщиной  $s$  при разности температур  $t_2 - t_1$  равен

$$A = \frac{aL^2}{s} (t_2 - t_1), \quad (3.15)$$

где  $a$  — удельный изгиб, зависящий в основном от разности коэффициентов линейного расширения составляющих биметалла. Изгиб тем больше, чем длиннее и тоньше биметаллическая пластина, и не зависит от ее ширины.

Если изгиб свободного конца пластины частично подавлен воздействием звена, передающего изгиб на счетное устройство, то изгибающая сила  $F$  может быть рассчитана из величины подавленного прогиба  $A_u$ :

$$F = \frac{Es^3b}{4L^3} A_u, \quad (3.16)$$

где  $E$  — модуль упругости биметалла.

Если принять, что прогиб полностью подавлен ( $A_u = A$ ), то, используя выражения (3.15) и (3.16), получаем значение необходимой для этого силы:

$$F_1 = \frac{Eas^2b}{4L} (t_2 - t_1). \quad (3.17)$$

Перемножением (3.15) и (3.17) получаем необходимую для подавления изгиба работу  $W$  или удельную работу изгиба при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$W = F_1 A = \frac{Ea^2sbL}{4} (t_2 - t_1)^2 = \frac{Ea^2V}{4} (t_2 - t_1)^2, \quad (3.18)$$

которая зависит от объема пластины  $V$  и разности температур.

Биметаллы для термометров выполняют чаще всего в виде плоских и цилиндрических спиралей. Это обеспечивает компактность при большой длине и, кроме

того, позволяет преобразовать изгиб в удобное для измерения вращательное движение. Для расчетов в этом случае вместо прогиба  $A$  и изгибающей силы  $F$  используют угол закручивания  $\alpha$  и крутящий момент  $M$ . Угол закручивания  $\alpha$  на  $1^\circ\text{C}$  определяют как

$$\frac{\alpha}{t_2 - t_1} = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{aL}{s} \quad (3.19)$$

и крутящий момент на каждый угловой градус закручивания как

$$\frac{M}{\alpha} = \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{Es^3b}{12L} \quad (3.20)$$

Если принять, что закручивание подавлено, то перемножим выражений (3.19) и (3.20) получаем изменение крутящего момента на  $1^\circ\text{C}$ :

$$\frac{M}{t_2 - t_1} = \frac{Eas^3b}{6}, \quad (3.21)$$

которое не зависит от длины пластины.

Если биметаллическая пластина шириной  $b$  в интервале температур  $t_2 - t_1$  должна развивать крутящий момент  $M$ , из выражения (3.21) можно рассчитать требуемую ее толщину  $s$ . Для заданного угла закручивания  $\alpha$  требуемую длину пластины  $L$  получают из выражения (3.19).

Различные биметаллы имеют модуль упругости  $E$  от  $14 \cdot 10^9$  до  $16,5 \times 10^9$  Н/м<sup>2</sup>. Допустимое изгибающее напряжение, при котором не происходит остаточной деформации, должно быть при  $20^\circ\text{C}$  не больше  $15 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>.

Приведенные расчетные формулы дают ориентировочные значения для размеров биметаллов. Для определения окончательных размеров необходимо тщательное исследование.

При высоких требованиях к стабильности показаний температуры усилия реакции передающего механизма должны быть минимальными. Для получения большого прогиба биметаллические пластины для показывающих приборов делают как можно тоньше. Наоборот, для работы в релейном режиме или для привода контактной пары требуется большое усилие. Чтобы при превышении температуры в биметалле не возникало остаточных деформаций, его изгиб ограничивают упорами.

Линейная зависимость между изгибом и температурой выдерживается только в ограниченной температурной области (табл. 3.4) (допустимое отклонение изгиба  $\pm 5\%$ ). Биметаллы могут работать в широкой области температур и нагрузок, если при этом не наблюдается остаточных деформаций. С помощью биметаллов из специальных сплавов (железоникелевые и железохромоникелевые) можно измерять температуры до  $600^\circ\text{C}$ . Наиболее низкая измеряемая температура равна примерно  $-100^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а 3.4

Химический состав и свойства биметаллов (по ДИН 1715)

Диапазон линейности, °C	Интервал рабочих температур, °C	Удельный изгиб, $10^{-6}\text{K}^{-1}$	Материал составляющих термометалла	
			активной	пассивной
(-20)—200	400	15,5	X60NiMn147	Ni36
(-20)—250	400	14,0	NiMn206	Ni38
(-20)—380	450	11,7	NiMn206	Ni42
(-20)—220	350	9,7	NiMn1	Ni36
(-20)—200	400	14,8	NiMn206	Ni36
(-20)—200	250	14,5	X60NiMn147	Ni36

Примечания: 1. Материал активной составляющей содержит, кроме того, 0,1—0,6% С, 0,5—1,0% Si, остальное Fe. 2. Материал пассивной составляющей содержит 0,1—0,15% С, 0,5—1% Mn, 0,5% Si, остальное Fe. 3. Удельный изгиб определен в интервале температур  $10-130^\circ\text{C}$  (ориентировочное значение).

### 3.1.3.2.2. Изготовление биметаллов и придание им требуемой формы

Составляющие биметалла соединяют между собой сваркой и прокатывают с промежуточными отжигами до заданной толщины. Чтобы биметаллы сохраняли

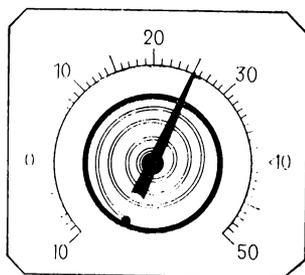


Рис. 3.19. Биметаллический термометр с биметаллической спиралью для измерения комнатной температуры

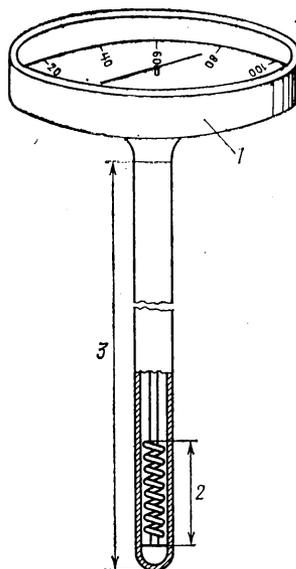


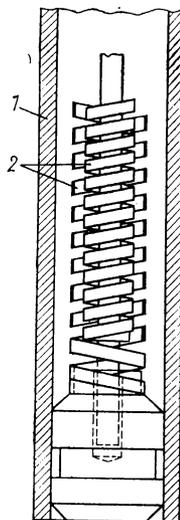
Рис. 3.20. Биметаллический термометр со спиральной пружиной в защитной оболочке:  
1 — указатель; 2 — термодатчик; 3 — оболочка

свои свойства и начальную форму после изготовления в течение длительного времени, готовые детали стабилизируют при 350—400° С, а если нужно, то и при более высокой температуре, а затем медленно охлаждают. Для защиты от коррозии на биметаллы наносят гальванические покрытия из никеля, серебра, хрома или кадмия толщиной не более 0,01 мм; для диапазона рабочих температур до 100° С биметаллы покрывают лаком.

Биметаллы применяют для корректировки показаний жидкостных манометрических термометров, однако основной областью их применения остается корректировка влияния температуры окружающей среды на показания электрических и механических измерительных приборов и установок. В большом количестве изготавливаются биметаллические термометры для измерений температуры в помещениях; в них используют биметаллы в виде плоской спирали (рис. 3.19).

Для измерения температуры в производственных условиях биметалл, свернутый в виде цилиндрической спирали, вставляют в трубчатую оболочку, соединенную с головкой термометра. Спираль должна близко прилегать к стенке оболочки для улучшения теплопередачи и уменьшения времени установления показаний (рис. 3.20).

Рис. 3.21. Торсионный биметаллический элемент, двухзаходный, в защитной оболочке:  
1 — оболочка; 2 — торсионная ступенчатая пружина



Чтобы получить при малой длине датчика большую изгибающую силу, что обеспечивает более достоверные показания, достаточную устойчивость к ударным нагрузкам, вибропрочность или позволяет расширить диапазон измерений, в тор-

сионном биметаллическом термометре соединяют две или больше соосные цилиндрические спирали (рис. 3.21) [3.19]. Такие биметаллические термометры в трубчатой оболочке могут быть встроены непосредственно в трубопровод или в резервуар. Время установления показаний в воде (время полупоказания) у таких термометров несколько больше, чем у термопар с защитными чехлами или без них.

При отсчете показаний на приборе с вертикальной осью вращательное движение биметаллической спирали может быть передано через подвижный валик на измерительную головку практически без трения.

Показывающий прибор, непосредственно связанный с биметаллическим датчиком, для производственных измерений снабжен стрелочным указателем, с помощью которого можно производить сравнительные измерения.

Предел допустимой погрешности хорошо стабилизированного биметаллического термометра составляет 1—1,5%, а при высоких температурах — до 3% диапазона измерения.

## 3.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ<sup>1</sup>

Стеклянные термометры расширения позволяют измерять температуру непосредственно вблизи объекта. С помощью манометрических термометров, которые постоянно соединены с термоприемником соединительным капилляром, можно измерять температуру на некотором расстоянии от объекта измерения. В отличие от них электрические термометры позволяют осуществлять дистанционные измерения температуры на любом расстоянии между термоприемником и вторичным прибором. Для измерения температуры используют электрические свойства термоприемника, зависящие от температуры. Температурный датчик вместе с другими деталями, такими как защитная арматура, образует электрический термометр. Выходной сигнал в виде напряжения или изменения электросопротивления поступает для обработки в подключенный к термометру вторичный измерительный или регулирующий прибор.

Из электрических термометров наибольшее распространение в лабораториях и промышленности получили термометры сопротивления и термоэлектрические термометры (термопары), так как они позволяют решать достаточно простыми средствами специальные задачи измерения температуры.

### 3.2.1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

#### 3.2.1.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В термоэлектрических термометрах для измерения температуры используется открытое в 1821 г. Зеебеком явление термоэлектричества (эффект Зеебека). Если два проводника из разных металлических материалов  $A$  и  $B$  соединены концами в замкнутый контур (рис. 3.22,  $a$ ) и места соединений находятся при разных температурах  $t_2$  и  $t_1$ , то в контуре возникает электрический ток. Оба электропроводника, называемые термоэлектродами, образуют термопару. Одно из мест соединения, помещаемое в среду с измеряемой температурой, является рабочим концом термопары, второе, находящееся при постоянной известной температуре, является свободным концом термопары.

#### 3.2.1.1.1. Теория термоэлектрических свойств термопары — эффекты Пельтье и Томпсона

Термоэлектродвижущая сила (т. э. д. с.)  $E$  термопары с термоэлектродами  $A$  и  $B$  может быть рассчитана из алгебраической суммы эффекта Пельтье (1834 г.) для мест контактирования  $A$  и  $B$  и эффекта Томпсона (1847 г.) для обоих термо-

<sup>1</sup> Описание конструкций серийных термометров см. в книге Бычковский Р. В. Контактные датчики температуры. М., «Металлургия», 1978. 240 с. с ил. (Приж. ред.)

электродов  $A$  и  $B$ , если пренебречь такими необратимыми явлениями, как джоулевы потери и потери на теплопроводность.

Если в контуре, составленном из термоэлектродов  $A$  и  $B$  (см. рис. 3.22, б), течет ток, то при переходе электронов из одного термоэлектрода в другой они должны или затрачивать, или приобретать энергию. При этом кинетическая энергия электронов увеличивается или уменьшается, а место контакта охлаждается или нагревается. Тепловые потоки, возникающие в обоих местах контактирования термоэлектродов  $A$  и  $B$ , изменяются пропорционально току  $I$ .

Тепловой поток равен  $\Phi_P = PI$ , где  $P$  — коэффициент Пельтье, зависящий от материала обоих термоэлектродов и температур  $t_1$  и  $t_2$  мест контактирования;  $P$  имеет размерность Вт/А = В.

При прохождении тока  $I$  в контуре вследствие небольшого по величине эффекта Томпсона термоэлектроды или нагреваются, или охлаждаются, если в них есть перепад температур по сравнению, например, с наиболее высокой

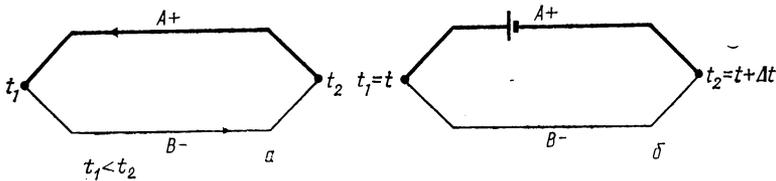


Рис. 3.22. Эффект Зеебека (а) и Пельтье (б): а — термоконтур с термоэлектродами  $A$  и  $B$ ; б — термоконтур с источником тока;  $t_1$  и  $t_2$  — температуры спаев термоэлектродов  $A$  и  $B$

температурой контакта  $T_2$ . Этот тепловой поток также пропорционален току  $I$  и градиенту температур  $\Delta T$  в обоих термоэлектродах и равен

$$\Phi_T = \sigma I \Delta T,$$

где  $\sigma$  — коэффициент Томпсона, зависящий от материала электродов и от температуры  $T$  и имеющий размерность Вт/А·К = В/К.

Если рабочий конец термопары находится при температуре  $T + \Delta T$ , а свободный — при  $T$ , то т. э. д. с.  $E = \frac{dE}{dT} \Delta T$ . Она равна сумме эффектов Пельтье и Томпсона, т. е.

$$E = \frac{dE}{dT} \Delta T = P_{(T+\Delta T)} - P_{(T)} + \sigma_A \Delta T - \sigma_B \Delta T \quad (3.22a)$$

$$\text{или } \frac{dE}{dT} = \frac{P_{(T+\Delta T)} - P_{(T)}}{\Delta T} + \sigma_A - \sigma_B.$$

Отсюда следует

$$\frac{dE}{dT} = \frac{dP}{dT} + (\sigma_A - \sigma_B). \quad (3.22б)$$

После некоторых преобразований из (3.22б) можно вывести связь между т. э. д. с.  $E$  и коэффициентами  $P$  и  $\sigma$ :

$$P = T \frac{dE}{dT}; \quad (3.22в)$$

$$\sigma_B - \sigma_A = T \frac{d^2E}{dT^2}. \quad (3.22г)$$

Из фундаментального уравнения (3.22г) можно получить все термоэлектрические свойства термопары, например нелинейную зависимость температура — т. э. д. с.:

$$E = aT + bT^2.$$

Интегрированием уравнения (3.22г) получаем

$$\frac{dE}{dT} = \int_0^T \frac{\sigma_B - \sigma_A}{T} dT = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T} dT - \int_0^T \frac{\sigma_A}{T} dT = \frac{dE_B}{dT} - \frac{dE_A}{dT}. \quad (3.22д)$$

Если известны вклад термоэлектрода  $B$  при любой температуре, например при температуре  $20^\circ\text{C}$ ,  $dE_B/dT$  и изменение т. э. д. с. термопары  $dE/dT$ , то можно определить вклад второго термоэлектрода  $dE_A/dT$  из разности  $dE/dT - dE_B/dT$ .

### 3.2.1.1.2. Термоэлектрический ряд потенциалов

Измерить изменение потенциала отдельного термоэлектрода в зависимости от температуры довольно трудно, поэтому для платинового термоэлектрода принимают независимо от температуры  $dE_{Pt}/dT = 0$ . При этом  $dE_A/dT = dE/dT$ .

По аналогии с рядом электрохимических потенциалов можно составить ряд термоэлектрических потенциалов (рис. 3.23) [3.21, 3.22]. Термоэлектрод, расположенный в ряду выше, всегда положителен по отношению к нижестоящему. Из-за различной крутизны кривых температура — т. э. д. с. последовательность ряда может изменяться в зависимости от температуры. Так, медь при  $100^\circ\text{C}$  располагается в ряду ниже железа, а при  $200^\circ\text{C}$  — выше него (рис. 3.24).

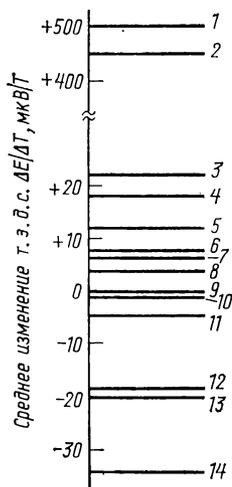


Рис. 3.23. Ряд термоэлектрических потенциалов [3.22] различных металлов относительно платины для температур от 0 до  $100^\circ\text{C}$  ( $\Delta E_{Pt}/\Delta T = 0$ ):

1 — теллур; 2 — кремний; 3 — никель — 10% хрома; 4 — железо; 5 — молибден; 6 — медь, серебро, золото, нержавеющая сталь 18/8; 7 — иридий, родий, вольфрам; 8 — алюминий, тантал; 9 — платина; 10 — рений; 11 — палладий; 12 — никель; 13 — кобальт; 14 — константан (55% Cu, 45% Ni)

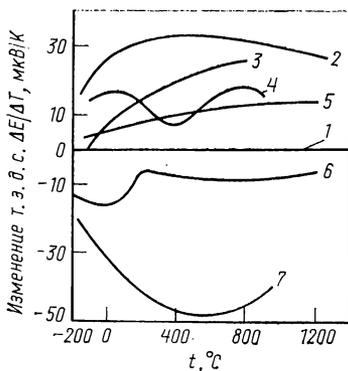


Рис. 3.24. Изменение т. э. д. с.  $\Delta E/\Delta T$  относительно платины вдоль термоэлектрода в зависимости от температуры ( $\Delta E_{Pt}/\Delta T = 0$  независимо от температуры): 1 — платина; 2 — NiCr (90/10); 3 — медь; 4 — железо; 5 — PtRh (90/10); 6 — никель; 7 — константан

### 3.2.1.1.3. Требования к выбору компонентов сплавов для термоэлектродной проволоки

Различные термоэлектрические свойства отдельных термоэлектродных материалов можно объяснить на основе электронной теории твердых тел, если принять некоторые упрощающие допущения. Однако количественную оценку в большинстве случаев провести нельзя. Поэтому характеристики термоэлектрических свойств изучают на основе эмпирически найденных зависимостей. Если какой-либо элемент мало растворим в другом, основном металле, то он имеет примерно те же свойства, что и основной металл. Если элемент растворяется в основном металле полностью, то он значительно отличается по термоэлектрическому потенциалу от основного металла.

Если элемент  $B$  по Периодической системе имеет порядковый номер меньше, чем элемент  $A$ , то при растворении малого количества элемента  $B$  в элементе  $A$  изменение т. э. д. с.  $dE/dT$  элемента  $A$  возрастает, и наоборот.

Если элементы  $A$  и  $B$  расположены в одной группе Периодической системы, то их взаимное влияние, за исключением сплавов на основе платины, очень мало. Исключение из этого правила составляют сплавы никеля, палладия или платины, в которых растворены медь, серебро или золото, а также твердые растворы алюминия, кремния или марганца в железе или никеле.

В тройных или более сложных сплавах влияние компонентов проследить не удастся. Следует подчеркнуть, что если элементы хорошо растворяются в основном металле, то при изменении температуры становятся заметными гистерезисные явления.

Малые изменения состава сплава не должны существенно влиять на его термоэлектрический потенциал, поэтому изготовление сплавов с одинаковыми термоэлектрическими свойствами не представляет затруднений. Легирующие добавки по возможности должны улучшать коррозионную стойкость сплава, но ни в коем случае не ухудшать ее.

### 3.2.1.1.4. Принципы измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров

1. По закону гомогенного контура в замкнутом контуре, состоящем из одного гомогенного проводника, ток отсутствует, даже если отдельные сечения проводника имеют различные температуры. Отсюда следует: в контуре из двух различных термоэлектродов, места контактирования которых имеют разную температуру, т. э. д. с. не зависит от распределения температуры вдоль термоэлектродов.

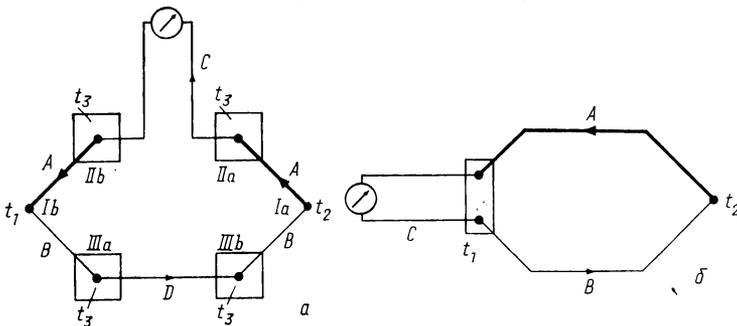


Рис. 3.25. Термоконтур с термоэлектродами  $A$  и  $B$ :  $a$  — в термоэлектрод  $A$  вставлен проводник  $D$ ; с измерительным прибором, в термоэлектрод  $B$  вставлен проводник  $D$ ;  $t_1$  и  $t_2$  — температуры спаев термоэлектродов  $A$  и  $B$ ;  $t_3$  — температура спаев термоэлектродов  $A$  и проводника  $C$ , а также термоэлектродов  $B$  и проводника  $D$ ;  $Ia$  и  $Ib$  — спаи  $B/A$  и  $A/B$  при температурах  $t_2$  и  $t_1$ ;  $IIa$  и  $IIb$  — спай  $A/C$  и  $C/A$  при температуре  $t_3$ ;  $IIIa$  и  $IIIb$  — спаи  $B/D$  и  $D/B$  при температуре  $t_3$ ;  $b$  — к свободным концам термопары подключен проводник  $C$  с измерительным прибором (температура спаев  $A$  с  $C$  и  $C$  с  $B$  равна  $t_1$ )

2. По закону промежуточного проводника сумма напряжений в контуре, состоящем из большого числа различных термоэлектродов, равна нулю, если все термоэлектроды имеют одинаковую температуру.

Исходя из этого закона, можно разомкнуть термоэлектрический контур в любом месте и включить в него один или несколько одинаковых или разнородных проводников. Если их места соединений находятся при одинаковой температуре, то не возникнет никаких паразитных т. э. д. с. (рис. 3.25, а). Можно разомкнуть контур в месте контактирования, например на свободном конце термопары и вставить другой проводник. Надо только на концах обоих термоэлектродов в разомкнутом месте контактирования поддерживать одинаковые температуры (рис. 3.25, б), тогда распределение температур вдоль вставленного проводника не будет влиять на т. э. д. с.

Как видно из рис. 3.25, а, различные проводники-термоэлектроды входят в термоэлектрический контур попарно и с противоположной направленностью тока по отношению к местам контактирования. Поэтому т. э. д. с. дает правильную информацию о температуре или разности температур только в том случае, если в контуре все т. э. д. с. одинаковых пар проводников взаимно компенсируются и если только рабочий и свободный концы термопары имеют различные температуры.

3. По закону аддитивности т. э. д. с., если два любых проводника *A* и *B* имеют по отношению к третьему *C* т. э. д. с.  $E_{AC}$  и  $E_{BC}$ , то т. э. д. с. термопары *AB* равна  $E_{AB} = E_{AC} + E_{BC}$  (см. ряд термопотенциалов).

4. По закону аддитивности температур т. э. д. с.  $E_3$ , возникающая вследствие разности температур  $t_3$  и  $t_1$ , равна сумме т. э. д. с.  $E_1$  между  $t_2$  и  $t_1$  и т. э. д. с.  $E_2$  между  $t_3$  и  $t_2$ , т. е.  $E_3 = E_1 + E_2$ . Поэтому т. э. д. с.  $E_3$ , определяемая разностью между температурами  $t_3$  и  $t_1$ , не зависит от изменения температуры термоэлектродов между рабочим концом термопары, находящимся при температуре  $t_3$ , и свободным концом, находящимся при температуре  $t_1$ .

### 3.2.1.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ТЕРМОПАР

Для удобства измерений температуры с помощью термопар желательно, чтобы т. э. д. с. была достаточно большой и чтобы электросопротивление термопары было не слишком высоким. В этом случае можно измерять температуру без особых дополнительных устройств, таких как усилитель, а также на достаточно большом расстоянии между термопарой и измерительным прибором. Кроме того, характеристика термопары должна быть линейной, а диапазон применения термопары возможно более широким.

Материалы для термопар должны иметь возможно более высокую точку плавления, должно быть возможным изготовление их в достаточном количестве и стабильного качества, термопары должны легко обрабатываться для получения нужной формы (провода, лент). В материале термоэлектродов в рабочем диапазоне температур не должно происходить аллотропических превращений, вызывающих скачкообразные изменения т. э. д. с. Термоэлектроды должны обладать достаточной коррозионной стойкостью и быть устойчивыми против окислительного и восстановительного действия среды; в процессе эксплуатации в результате окалинообразования или охрупчивания не должны изменяться их термоэлектрические свойства. Легирующие элементы, входящие в состав сплава, не должны диффундировать наружу в результате селективного окисления или испаряться при высокой температуре. Если эти условия выполняются в течение длительного срока эксплуатации, то получают равномерную и стабильную зависимость т. э. д. с. от температур. При этом значения т. э. д. с. термопар во всем рабочем диапазоне лежат в пределах допустимых погрешностей. Кроме того, необходимо обращать внимание на то, чтобы т. э. д. с. возможно меньше изменялась при механическом нагружении термопары, таком как растяжение, изгиб, скручивание и смятие. На свойства термоэлектродов особенно сильно влияет холодная деформация. Поэтому для достижения постоянства т. э. д. с. термоэлектроды или термопары часто стабилизируют электронагревом при достаточно высокой температуре.

При длительных высокотемпературных измерениях температуры рабочего конца и прилегающих частей термоэлектродов примерно равны. Происходящие в этих зонах изменения химического состава термоэлектродов не сказываются на т. э. д. с. Точно так же изменение состава сплавов на рабочем конце термопары из-за пайки или сварки термоэлектродов не влияет на измерение (закон промежуточного проводника).

### **3.2.1.2.1. Влияние неомогенности**

В термопаре могут возникать паразитные т. э. д. с., если на участке термоэлектрода с измененным из-за избирательного окисления химическим составом [3.23] наблюдается снижение температуры. Термоэлектроды термопары постепенно могут стать неомогенными, если термометр только частично введен в печь и на нем наблюдается перепад температуры. Степень такого избирательного окисления экспоненциально зависит от температуры. Она резко уменьшается при снижении температуры и не оказывает влияния на результаты измерения при постоянной глубине погружения в измеряемую среду. Однако, если последняя изменяется, возникающая из-за окисления неомогенность состава может привести к увеличению погрешности. Такая погрешность, связанная с неомогенностью, образовавшейся в процессе эксплуатации, может быть не замечена, если длинные термоэлектрические термометры поверяют в коротких трубчатых печах [3.24]. Неомогенность отдельного термоэлектрода может быть выявлена, если термоэлектрод, подключенный к показывающему прибору, протягивать через горячую ванну и непосредственно над поверхностью ванны охлаждать до температуры окружающей среды [3.25].

### **3.2.1.2.2. Устройство рабочих спаев термопар**

Металлические термоэлектроды для измерения температур до 150°С спаивают мягкими припоями, до более высокой температуры — твердыми припоями, но чаще всего их сваривают друг с другом в нейтральной атмосфере. Часто бывает достаточно прижать концы термоэлектродов к гомогенному металлу. Можно также погрузить их в расплав легкоплавкого металла или вдавить заостренные концы термоэлектродов в поверхность металла (игольчатые термоэлектрические термометры). Термоэлектроды очень малого сечения соединяют друг с другом через тонкий гальванически нанесенный слой металла.

### **3.2.1.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ (ТАБЛИЦЫ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН) И ДОПУСТИМЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ**

Из большого числа предложенных термопар на рис. 3.26 представлены характеристики т. э. д. с. некоторых наиболее тщательно исследованных и технически воспроизводимых термопар, используемых для измерения температур выше 0°С.

#### **3.2.1.3.1. Таблицы основных величин**

Существующие в различных промышленно развитых странах таблицы основных величин не всегда согласуются. В ФРГ они даны в ДИН 43710. В основе действующих до сих пор в США по МПТШ-48 основных величин лежат данные Национального бюро стандартов (NBS-циркуляр 561; 1955), приборостроительного общества Америки (ISA-RP 1.6.1964) и Американского общества испытателей и материалов (ASTM стандарт E 230-63). Существуют таблицы основных величин Британского института стандартов, Лондон (BS 1826—BS 1829), стандартов Франции (AFNOR NF 18-00, дек. 1958), СССР (ГОСТ 3044.45—61), а также промышленных стандартов Японии (JIS C 1602; 1960).

В США таблицы основных величин ASTM и NBS для важнейших термопар стандартизованы в соответствии со шкалой МПТШ-68 [3.57а]. В табл. 3.5. А — 3 приведены основные величины по ASTM E 230—72, тогда как в табл. 3.5 И приведены основные величины для термопар например по NBS 124, которые применимы прежде всего для измерений очень низких температур [3.57б]. Эти таблицы основных величин рекомендованы Международной электротехнической комиссией под индексом IEC 65В.8 для стандартизации.

Эти основные величины приняты Англией под индексом BS 4937 и Францией под индексом NF E 18—001. Таблицы основных величин IEC были опубликованы и позднее должны стать Европейским стандартом (EN). Для стран, входящих в ЕЭС, европейский стандарт станет национальным стандартом.

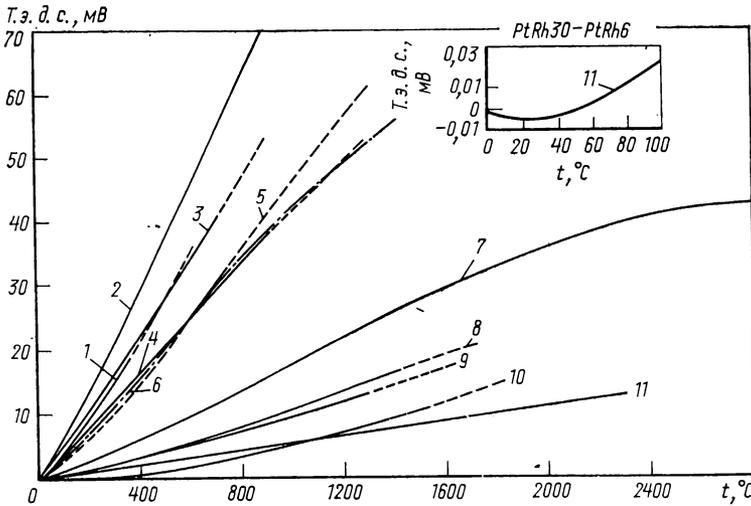


Рис. 3.26. Термоэлектрические характеристики термопар из благородных и неблагородных металлов для измерения температуры выше 0° С: 1 — Cu — константан; 2 — хромель (NiCr) — константан; 3 — Fe — константан; 4 — NiCr — Ni; 5 — палапат; 6 — платинель II; 7 — WRe3 — WRe25; 8 — PtRh13—Pt; 9 — PtRh10 — Pt; 10 — PtRh30—PtRh6; 11 — IrRh60—Ir

В новом издании ДИН 43710 (1976) основные величины для термопар PtRh (90/10) — Pt и NiCr — Ni согласуются с основными величинами EN. Они соответствуют также приведенным в табл. 3.5 основным величинам из ASTM E 230.72. Для термопар медь — константан и железо — константан после опубликования EN должны применяться только новые, отличающиеся от ДИН 43710 основные величины.

Для отмеченных знаком<sup>1</sup> таблиц основных величин температуры должны быть пересчитаны или изменены по табл. 2.4 на температуры МПТШ-68, так как они приведены еще в соответствии с МПТШ-48. В температурном интервале до 600° С необходимые изменения минимальны и ими можно пренебречь. Только для термопар железо — константан и медь — константан в этой области основные величины по ДИН несколько больше отличаются от данных ASTM, NF и BS. Это различие объясняется тем, что в ФРГ к чистоте железа предъявляют особенно высокие требования.

Наиболее сильно от принятых в большинстве стран величин т. э. д. с. отличаются основные величины, принятые в СССР для термопар, у которых одним из термоэлектродов является константан. Из-за различия характеристик таких термопар при градуировке вторичных измерительных приборов, а также при поверке следует обращать внимание на эти отличия основных величин от ДИН.

Т а б л и ц а 3.5

Основные величины т. э. д. с. термолар с допустимыми отклонениями. Подробный ряд основных величин важнейших термолар по ДИН 43710 и МЭК 65В.8 (идентично с ASTM E 230—72) приведен в приложении Величины, помещенные знаком <sup>1</sup>, приведены по МПТШ-48

А. Термолара медь—константан (медь—медь-никель). Краткое обозначение Cu—конст. (Cu—CuNi)

Температура, °С	Основная величина, мВ (а), и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по											
	ДИН 43710		ASTM E230—72		BS 4937		NF E18-001		ГОСТ 1		JIS 1	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
0	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—
20	0,80	—	0,789	0,85	—	—	0,787	0,80	—	—	0,787	—
50	2,05	3,00	2,035	0,85	—	—	2,035	0,80	—	—	2,035	—
100	4,25	3,00	4,277	0,75	4,277	1,25	4,277	0,80	4,75	3,0	4,277	2,25
200	9,20	3,00	9,286	1,50	9,286	1,75	9,288	1,50	10,29	3,0	9,288	2,25
300	14,90	3,00	14,860	2,25	14,860	2,25	14,864	2,25	16,48	3,0	14,864	2,25
400	21,00	3,00	20,869	3,00	20,869	3,00	20,874	3,00	23,13	3,5	20,873	—
500	27,41	3,75	—	—	—	—	—	—	30,15	4,4	—	—
600	34,31	4,5	—	—	—	—	—	—	37,47	5,3	—	—
—20	—0,77	—	—0,757	0,85	—	—	—0,751	0,80	—	—	—	—
—40	—1,50	—	—1,475	0,85	—	—	—1,463	0,80	—	—	—	—
—60	—2,18	—	—2,152	1,2	—	—	—2,135	1,20	—	—	—	—
—80	—2,18	—	—2,788	1,6	—	—	—2,764	1,60	—	—	—	—
—100	—3,40	—	—3,378	2,0	—	—	—3,349	2,00	—	—	—3,349	—
—120	—3,95	—	—3,923	—	—	—	—3,887	—	—	—	—	—
—140	—4,46	—	—4,419	—	—	—	—4,377	—	—	—	—	—
—160	—4,91	—	—4,865	—	—	—	—4,817	—	—	—	—	—
—180	—5,32	—	—5,261	—	—	—	—5,205	—	—	—	—	—
—200	—5,70	—	—5,603	—	—	—	—5,540	—	—	—	—5,54	—

Примечания. Маркировка: по ДИН 43710 — коричневый; по ASTM E230—72 и NF E18-001 — голубой.

## Б. Термопара железо—константан (железо—медь—никель). Краткое обозначение Fe—CuNi

Температура, °C	Основная величина, мВ (а) и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по											
	ДИН 43710		ASTM E230—72		BS 4937		NF E18-001 <sup>1</sup>		ГОСТ <sup>1</sup>		JIS <sup>1</sup>	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
0	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—	0	—
20	1,05	—	1,019	—	1,019	—	1,02	—	—	—	—	—
50	2,65	3,0	2,585	2,20	2,585	—	2,58	3,0	—	—	—	—
100	5,37	3,0	5,268	2,20	5,268	2,2	5,27	3,0	5,75	3,0	5,32	3,0
200	10,95	3,0	10,777	2,20	10,777	2,2	10,78	3,0	12,00	3,0	10,87	3,0
300	16,56	3,0	16,325	2,25	16,325	2,25	16,33	3,0	18,10	3,0	16,44	3,0
400	22,16	3,0	21,846	3,00	21,846	3,0	21,85	3,0	24,55	3,8	22,0	3,0
500	27,85	3,8	27,388	3,80	27,388	3,8	27,39	3,8	30,90	4,8	27,62	3,8
600	33,67	4,5	33,096	4,50	33,096	4,6	33,14	4,5	37,40	5,8	33,39	4,5
700	39,72	4,3	39,130	5,30	39,130	5,3	39,15	5,3	44,10	6,7	39,44	5,3
800	46,22	6,0	45,498	6,00	45,498	6,0	45,53	6,0	51,15	7,3	45,88	6,0
900	53,44	6,7	51,875	6,70	—	—	—	—	—	—	—	—
—20	—1,02	—	—0,955	—	—0,955	—	—	—	—	—	—	—
—40	—2,03	—	—1,960	—	—1,960	—	—	—	—	—	—	—
—60	—2,98	—	—2,892	—	—2,892	—	—	—	—	—	—	—
—80	—3,89	—	—3,785	—	—3,785	—	—	—	—	—	—	—
—100	—4,75	—	—4,632	—	—4,632	—	—	—	—	—	—	—
—120	—5,53	—	—5,426	—	—5,426	—	—	—	—	—	—	—
—140	—6,26	—	—6,159	—	—6,159	—	—	—	—	—	—	—
—160	—6,93	—	—6,821	—	—6,821	—	—	—	—	—	—	—
—180	—7,56	—	—7,402	—	—7,402	—	—	—	—	—	—	—
—200	—8,15	—	—7,890	—	—7,890	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Маркировка: по ДИН 43710 — голубой; по ASTM E230—72 — белый; по NF — черный.

DIN — промышленные стандарты ФРГ (ДИН)  
 NBS — стандартные величины Национального бюро стандартов (США)  
 ASTM — основные величины Американского общества испытаний материалов  
 IEC — основные величины, предложенные Международной электротехнической комиссией (МЭК)  
 BS — основные величины Британского института стандартов  
 NF — стандарт Франции  
 ГОСТ — ГОСТ СССР  
 JIS — промышленный стандарт Японии

В. Термопара никель—хром—никель (хромель—алюмель \*1). Краткое обозначение NiCr—Ni (ХА \*2)

Температура, °С	Основная величина, мВ (а) и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по												
	ДИН 43710			ASTM E230—72		BS 4937		NF E18-001 1		ГОСТ 1		JIS 1	
	а	б	б*	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
0	0	—	—	—	0	—	0	—	0	—	0	—	
20	0,798	—	—	2,20	0,798	2,20	0,80	—	0,80	—	0,80	—	
50	2,022	3,0	0,12	2,20	2,022	2,20	2,02	3,0	2,02	—	2,02	—	
100	4,095	3,0	0,12	2,20	4,095	2,20	4,10	3,0	4,10	4,0	4,10	3,0	
200	8,137	3,0	0,13	2,20	8,137	2,20	8,13	3,0	8,13	4,0	8,13	3,0	
300	12,207	3,0	0,13	2,25	12,207	2,25	12,21	3,0	12,21	4,0	12,21	3,0	
400	16,395	3,0	0,13	3,00	16,395	3,00	16,40	3,0	16,40	4,3	16,40	3,0	
500	20,640	3,8	0,16	3,8	20,640	3,8	20,65	3,8	20,65	4,8	20,65	3,6	
600	24,902	4,5	0,19	4,5	24,902	4,5	24,91	4,5	24,91	5,0	24,91	4,4	
700	29,128	5,3	0,22	5,3	29,128	5,3	29,14	5,3	29,15	5,8	29,14	5,3	
800	33,277	6,0	0,25	6,0	33,277	6,0	33,30	6,0	33,32	6,3	33,31	6,0	
900	37,325	6,8	0,27	6,8	37,325	6,8	37,36	6,8	37,37	7,0	37,36	6,8	
1000	41,269	7,5	0,29	7,5	41,269	7,5	41,31	7,5	41,32	7,5	41,31	7,5	
1100	45,108	8,3	0,31	8,3	45,108	8,3	45,16	8,3	45,16	8,5	45,16	8,3	
1200	48,828	9,0	0,33	9,0	48,828	9,0	48,89	9,0	48,87	9,4	48,89	9,0	
1300	52,398	9,8	0,34	9,8	52,398	9,8	52,46	9,8	52,43	10,3	52,47	9,8	
1370	54,807	—	—	10,3	—	—	—	—	—	—	—	—	

Примечание. Маркировка: по ДИН 43710 — зеленый; по ASTM E230—72 — желтый; по NF E18-001 — красный.

\*1 Принятое в США обозначение.

\*2 Принятое в СССР обозначение. (Прим. ред.)

Г. Термопара никель—хром—константан (хромель—копель \*1). Краткое обозначение Ni—Cr—конст. (NiCr—CuNi); (ХК) \*2. Серебро—константан. Краткое обозначение Ag—конст. (Ag—CuNi)

Температура, °С	Основная величина, мВ (а) и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по						ГОСТ 1		Негаус	
	ASTM E230-72			NiCr—CuNi			Ag—CuNi		Негаус	
	а	б	б*	а	б	б*	а	б	а	а
0										
20	1,192	—	—	0	—	—	1,25	—	0	0,81
50	3,047	—	—	3,06	—	—	3,06	—	—	2,07
100	6,317	—	—	6,21	—	—	6,21	—	6,95	4,26
						0,12				
200	13,419	1,7	0,12	13,08	1,7	0,12	13,08	14,66	9,16	
300	21,033	1,7	0,13	20,65	1,7	0,13	20,65	22,91	14,61	
400	28,943	2,0	0,17	28,60	2,0	0,17	28,60	31,49	20,56	
500	36,999	2,5	0,21	36,75	2,5	0,21	36,75	40,16	26,96	
600	45,085	3,0	0,25	44,94	3,0	0,25	44,94	49,02	33,75	
700	53,110	3,5	0,29	53,00	3,5	0,29	53,00	57,77	—	
800	61,022	4,0	0,32	60,90	4,0	0,32	60,90	66,42	—	
900	68,783	4,5	0,35	68,54	4,5	0,35	68,54	—	—	
1000	76,358	5,0	0,38	75,93	5,0	0,38	75,93	—	—	
—20	—1,151									
—40	—2,254									
—60	—3,306									
—80	—4,301									
—100	—5,237									
—120	—6,107									
—140	—6,907									
—160	—7,631									
—180	—8,273									
—200	—8,824									
—220	—9,274									
—240	—9,604									
—260	—9,797									
—270	—9,835									

Примечание. По ГОСТ основная величина при —50°С составляет —3,11 мВ.

\*1 Название, принятое в СССР.

\*2 Принятое в СССР краткое обозначение. (Прим. ред.)

Д. Термопара платина-родий (10%)—платина. Краткое обозначение PtRh10—Pt (ПП) \*1

Температура, °С	Основная величина, мВ (а) и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по														
	ДИН 43710			ASTM E230—72			BS 4937			NF E18-001 1			ГОСТ 1		
	а	б	б*	а	б	б	а	б	б	а	б	а	б	а	б
0	0	—	—	0	—	—	0	—	—	—	—	0	—	0	—
20	0,113	—	—	0,113	—	—	0,113	—	—	—	—	0,113	—	—	—
50	0,299	3,0	0,018	0,299	—	—	0,299	—	—	—	—	0,299	—	—	—
100	0,645	3,0	0,022	0,645	2,75	—	0,645	2,75	—	—	—	0,643	2,5	0,643	1,3
200	1,440	3,0	0,025	1,440	2,75	—	1,440	2,75	—	—	—	1,436	2,5	1,436	1,2
300	2,323	3,0	0,027	2,323	2,75	—	2,323	2,75	—	—	—	2,316	2,5	2,314	1,2
400	3,260	3,0	0,029	3,260	2,75	—	3,260	2,75	—	—	—	3,251	2,5	3,249	1,4
500	4,234	3,0	0,030	4,234	2,75	—	4,234	2,75	—	—	—	4,221	2,5	4,218	1,6
600	5,237	3,0	0,031	5,237	3,0	—	5,237	3,0	—	—	—	5,224	2,5	5,220	1,8
700	6,274	3,5	0,037	6,274	3,5	—	6,274	3,5	—	—	—	6,260	2,9	6,256	2,0
800	7,345	4,0	0,043	7,345	4,0	—	7,345	4,0	—	—	—	7,329	3,3	7,325	2,2
900	8,448	4,5	0,050	8,448	4,5	—	8,448	4,5	—	—	—	8,432	3,6	8,428	2,3
1000	9,585	5,0	0,058	9,585	5,0	—	9,585	5,0	—	—	—	9,570	4,0	9,564	2,4
1100	10,754	5,5	0,065	10,754	5,5	—	10,754	5,5	—	—	—	10,741	4,5	10,732	2,50
1200	11,947	6,0	0,073	11,947	6,0	—	11,947	6,0	—	—	—	11,935	4,8	11,923	2,75
1300	13,155	6,5	0,078	13,155	6,5	—	13,155	6,5	—	—	—	13,138	5,3	13,129	3,00
1400	14,368	7,0	0,084	14,368	7,0	—	14,368	7,0	—	—	—	14,337	5,6	14,338	3,25
1500	15,576	7,5	0,089	15,576	7,5	—	15,576	7,5	—	—	—	15,530	6,0	15,537	3,50
1600	16,771	8,0	0,096	16,771	8,0	—	16,771	8,0	—	—	—	16,716	6,4	16,714	3,7
1700	—	—	—	17,942	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1768	—	—	—	18,698	8,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—10	—	—	—	—0,053	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—20	—	—	—	—0,103	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—30	—	—	—	—0,150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—40	—	—	—	—0,194	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—50	—	—	—	—0,236	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Маркировка: по ДИН 43710 — белый; по ASTM E230—72 — черный; по NF E18-001 — зеленый.

\*1 Принятое в СССР краткое обозначение. (Прим. ред.)



Ж. Термопара платина (70%)-родий (30%)—платина (94%)-родий (6%). Краткое обозначение PtRh30—PtRh6 (ПР) \*1

Температура, °C	Основная величина, мВ (а) и ее допустимое отклонение, °С (б) и мВ (б*), по										ГОСТ:				
	Degussa					Heraeus					ASTM E230—72		а	б	
	а	б	б*	а	б	а	б	а	б	а	б				
0	0	—	—	0	—	—	—	0	—	0	—	0	—	—	—
20	-0,003	—	—	-0,003	—	—	—	-0,002	—	-0,002	—	-0,003	—	—	—
50	0,002	—	—	0,002	—	—	—	0,002	—	0,002	—	0,002	—	—	—
100	0,033	3,0	—	0,033	3,0	—	—	0,033	3,0	0,033	3,0	0,033	3,0	—	—
200	0,178	3,0	0,005	0,178	3,0	0,005	3,0	0,178	3,0	0,178	3,0	0,178	3,0	—	—
300	0,431	3,0	0,009	0,431	3,0	0,009	3,0	0,431	3,0	0,431	3,0	0,431	3,0	0,456	3,0
400	0,786	3,0	0,012	0,786	3,0	0,012	3,0	0,786	3,0	0,786	3,0	0,786	3,0	0,812	3,0
500	1,241	3,0	0,015	1,241	3,0	0,015	3,0	1,241	3,0	1,241	3,0	1,241	3,0	1,268	3,0
600	1,791	3,0	0,019	1,791	3,0	0,019	3,0	1,791	3,0	1,791	3,0	1,791	3,0	1,821	3,0
700	2,430	3,5	0,025	2,430	3,5	0,025	3,5	2,430	3,5	2,430	3,5	2,430	3,5	2,467	3,5
800	3,154	4,0	0,032	3,154	4,0	0,032	4,0	3,154	4,0	3,154	4,0	3,154	4,0	3,201	4,0
900	3,957	4,5	0,040	3,957	4,5	0,040	4,5	3,957	4,5	3,957	4,5	3,957	4,5	4,019	4,5
1000	4,833	5,0	0,047	4,833	5,0	0,047	5,0	4,833	5,0	4,833	5,0	4,833	5,0	4,913	5,0
1100	5,777	5,5	0,055	5,777	5,5	0,055	5,5	5,777	5,5	5,777	5,5	5,777	5,5	5,876	5,5
1200	6,783	6,0	0,064	6,783	6,0	0,064	6,0	6,783	6,0	6,783	6,0	6,783	6,0	6,902	6,0
1300	7,845	6,5	0,071	7,845	6,5	0,071	6,5	7,845	6,5	7,845	6,5	7,845	6,5	7,982	6,5
1400	8,952	7,0	0,080	8,952	7,0	0,080	7,0	8,952	7,0	8,952	7,0	8,952	7,0	9,109	7,0
1500	10,094	7,5	0,086	10,094	7,5	0,086	7,5	10,094	7,5	10,094	7,5	10,094	7,5	10,274	7,5
1600	11,257	8,0	0,092	11,257	8,0	0,092	8,0	11,257	8,0	11,257	8,0	11,257	8,0	11,471	8,5
1700	12,426	8,5	0,098	12,426	8,5	0,098	8,5	12,426	8,5	12,426	8,5	12,426	8,5	12,692	8,5
1800	13,585	9,0	0,105	13,585	9,0	0,105	9,0	13,585	9,0	13,585	9,0	13,585	9,0	13,927	9,0

\*1 Принятое в СССР краткое обозначение. (Лрим. ред.)

3. Термопары палладат (PtRh5—AuPd46Pt2) платинель II 1 (PdPt31Au24—AuPd35); вольфрам-рений (3%)—вольфрам-рений (25%) (WRe3—WRe25); иридий-родий (60%)—иридий (IrRh60—Ir)

Температура, °C	Основная величина, мВ, по		Температура, °C	Основная величина, мВ, по		Температура, °C	Основная величина, мВ, по	
	Heraeus	Engelhard Inc		WRe3—WRe25	IrRh60—Ir		WRe3—WRe25	IrRh60—Ir
0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,50	0,609	20	0,197	0,064	1600	29,408	8,583
50	1,30	1,572	50	0,525	—	1700	31,088	9,156
100	2,86	3,300	100	1,145	0,365	1800	32,703	9,745
200	6,50	7,12				1900	34,243	10,355
300	10,60	11,29	200	2,602	0,818	2000	35,708	10,995
400	15,05	15,67	300	4,290	1,334			
500	19,77	20,16	400	6,128	1,889			
600	24,72	24,66	500	8,097	2,464			
700	29,83	29,12				2100	37,065	11,654
800	35,09	33,44				2200	38,299	—
900	40,31	37,59	600	10,089	3,047	2300	39,361	—
1000	45,46	41,57	700	12,121	3,628	2400	40,222	—
			800	14,172	4,199	2500	40,978	—
			900	16,206	4,759			
1100	50,47	45,35	1000	18,227	5,308			
1200	55,39	48,94						
1300	60,29	52,31						
—20	—	—0,580	1100	20,211	5,850	2600	41,465	—
—40	—	—1,130	1200	22,157	6,388	2700	41,788	—
—60	—	—1,648	1300	24,030	6,922	2800	41,992	—
—80	—	—2,132	1400	25,876	7,461			
—100	—	—2,580	1500	27,668	8,013			

И. Термолары Cu—конст. (Cu—CuNi); Fe—конст. (Fe—CuNi); NiCr—Ni (XA); NiCr—AgAu28% (ат.); AuCo2,11% (ат.)—AgAu0,37% (ат.); AuFe0,03% (ат.)—NiCr (хромель)

Температура, °C = K	Основная величина, мВ, по					
	ASTM E230—72			NBS 124		
	Cu—CuNi	Fe—CuNi	NiCr—Ni	NiCr—AgAu28	AuCo2,11—AgAu0,37	AuFe0,03—NiCr
50	2,035	2,585	2,022			1,067
20	0,789	1,019	0,798			0,425
0	0	0	0	0	00	0
—20	—0,757	—0,995	—0,777	—0,450	—0,797	
—40	—1,475	—1,960	—1,527	—0,888	—1,598	
—60	—2,152	—2,892	—2,243	—1,311	—2,399	
—80	—2,788	—3,785	—2,920	—1,717	—3,199	
—100	3,378	—4,632	—3,553	—2,105	—3,995	
—120	—3,923	—5,426	—4,138	—2,471	—4,785	
—140	—4,419	—6,159	—4,669	—2,841	—5,564	
—160	—4,865	—6,821	—5,141	—3,129	—6,325	
—180	—5,261	—7,402	—5,550	—3,129	—7,057	
—200	—5,603	—7,890	—5,891	—3,659	—7,746	—3,709
—210	—5,753	—8,096	—6,035	—3,766	—8,067	—3,839
—220	—5,889		—6,158	—3,816	—8,370	—3,973
—230	—6,007		—6,262	—3,942	—8,646	—4,111
—240	—6,105		—6,344	—4,007	—8,890	—4,254
—250	—6,181		—6,404	—4,054	—9,097	—4,402
—260	—6,232		—6,441	—4,084		—4,555
—270	—6,258		—6,458	—4,096		—4,714

Для термопар, которые еще не были стандартизованы в ФРГ и у которых есть отличия от основных величин ASTM E 230—72, основные величины представлены в табл. 3.5Ж по данным фирм Degussa и W. C. Heraeus.

В табл. 3.5И представлены основные величины для термопар палладат и платинель II, которые более пригодны для измерений температур до 1300°С, чем хромель-алюмелевые термопары. Кроме того, приведены основные величины для некоторых термопар, которые можно использовать для измерения температур в интервале 1500—2100°С или до 2800°С.

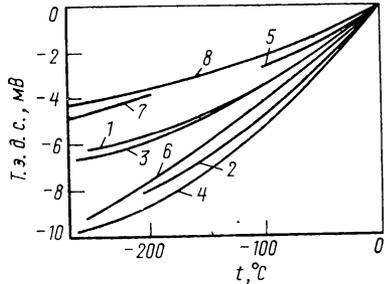


Рис. 3.27. Характеристики т. э. д. с. термопар для измерения температур ниже 0°С:

- 1 — Cu — константан NBS 125;
- 2 — Fe — константан NBS 125;
- 3 — хромель — алюмель NBS 125;
- 4 — хромель — константан NBS 125;
- 5 — платинель II;
- 6 — AuCo — AgAu;
- 7 — AuFe — хромель;
- 8 — хромель — AgAu NBS 124

низких температур достаточно линейную характеристику, т. е. почти постоянную чувствительность ( $\Delta E/\Delta T$ ). К таким относятся прежде всего термопары AgCo — AgAu и AuFe — хромель (табл. 3.6К и рис. 3.27).

По предложению ИЕС название «константан» должно быть заменено на «медь — никель» (CuNi).

По ДИН 43710 термопары должны быть замаркированы (вблизи мест подсоединения) краской, указанной в табл. 3.6. Положительный термоэлектрод обозначается знаком «+» или окрашивается в красный цвет.

### 3.2.1.3.2. Допустимые отклонения

Сопоставление допустимых отклонений для большинства применяемых термопар приведено в табл. 3.6. Из этих данных рассчитаны указанные в табл. 3.5 отклонения в °С. Эти отклонения для обычных термопар (см. табл. 3.5), учитывая их промышленное изготовление, даны такими большими, что при соответствующем отборе можно получить термопары с более узкими, примерно вдвое меньшими допустимыми отклонениями, если это вызвано потребностью производства. В США такое специальное исполнение термопар стандартизовано ASTM. В ФРГ термопары с более узкими пределами отклонений изготавливают по запросу потребителей. В стандарте США обычные и половинные допустимые отклонения для термопар медь — константан и железо — константан при низких температурах меньше, чем по существующим нормам ДИН.

Для оценки возможной погрешности при измерении температуры, незначительно отличающейся от опорной, равной примерно 20°С, следует учитывать, что т. э. д. с. равна нулю, если измеряемая и опорная температуры равны. Поскольку малые т. э. д. с. могут быть надежно измерены с помощью чувствительных измерительных приборов или измерительных преобразователей, низкие температуры или малые разности температур можно определять термопарами без особых затруднений и с более высокой точностью, чем термометрами сопротивления.

Таблица 3.6

Допустимые отклонения, °С или %, от измеряемой термопарой температуры по стандартам ФРГ, США и Франции

Термопара	Интервал температур, °С (а) и допустимое отклонение (б), по					
	ДИН 43710		ASTM E230—72		NF	
	а	б	а	б	а	б
Cu—CuNi	0—400	3,0° С	(-101)—(-59)	2%	(-100)—(-40)	2%
	>400	0,75%	(-59)—93 93—371	0,85° С 0,75%		
			(-184)—(-59)	1%	>100	0,75%
			(-59)—93 93—371	0,14° С 0,375%		
Fe—CuNi *1	0—400	3,0° С	0—277	2,2° С	0—400	3,0° С
	>400	0,75%	277—760	0,75%	>400	0,75%
NiCr—Ni *1	0—400	3,0° С	0—277	2,2° С	0—400	3,0° С
	>400	0,75%	277—1260	0,75%	>400	0,75%
NiCr—CuNi	—	—	0—316	1,7° С	—	—
			316—871	0,5%		
			0—316	1,25° С		
			316—871	0,375%		
PtRh10—Pt PtRh13—Pt	0—600	3,0° С	0—538	2,8° С	0—600	2,5° С
	>600	0,5%	538—1500	0,5%		
			0—538	1,4° С		
			538—1500	0,25%		

Примечание. Для термопары PtRh30—PtRh6 по специальному стандарту ASTM E230—72 в интервале температур 871—1705° С допустимое отклонение составляет 0,5%.

\*1 Для термопар специального изготовления отклонение составляет половину от отклонения термопар нормального исполнения.

В связи с введением новых рядов основных величин ИЕС рассматривает вопрос о новых классах точности. С 1/1 1975 г. термопары могут проходить государственную аттестацию. Аттестация проводится по трем классам точности. Допуски 3-го класса соответствуют ДИН 43710, допуски 2-го класса — половине и 1-го класса — только  $\frac{1}{3}$  допустимых отклонений по ДИН 43710. Аттестованные термопары 1-го класса изготавливаются только для определенных температурных интервалов. Их можно использовать, например, при приемных испытаниях энергетических установок [3.26]. Данные поверки действительны два года.

Приведенные допустимые отклонения могут быть гарантированы изготовителем только для состояния поставки, так как т. э. д. с. может измениться в процессе эксплуатации из-за таких воздействий, как недопустимая механическая нагрузка или химическое. Кроме того, гарантии действуют лишь при условии, что оба термоэлектроды термопары изготовлены на одном предприятии и что они

аттестованы как взаимно подходящие. В противном случае т. э. д. с. следует проверять. При высоких требованиях к точности рекомендуется поверять термопары сверкой с прецизионными термометрами через определенные промежутки времени.

### 3.2.1.3.3. Учет отклонения температуры свободных концов термопары от нормальной температуры ( $0^\circ\text{C}$ )

Температуру свободных концов термопары  $t_v$  не всегда поддерживают при опорной температуре  $t_b = 0^\circ\text{C}$ . Очень часто измерительные приборы градуируют для опорной температуры  $t'_b$ , равной преимущественно  $+20^\circ\text{C}$ , при применении термостатов  $+50^\circ\text{C}$ , а в некоторых случаях даже  $+60^\circ\text{C}$ . При этом величины т. э. д. с., приведенные в табл. 3.6, сдвигаются на величину т. э. д. с. для 20, 50 или  $60^\circ\text{C}$  относительно  $0^\circ\text{C}$ . Поэтому в общем случае каждая основная величина градуировочной таблицы или градуировочная кривая термопары должна быть понижена или повышена на разницу т. э. д. с., получающуюся из разницы температур  $t_v$  и  $t_b$  в зависимости от того, выше или ниже измеряемая температура  $t$  по сравнению с опорной  $t'_b$ , при которой был градуирован прибор.

### 3.2.1.4. СОСТАВ И СВОЙСТВА ТЕРМОПАР

#### 3.2.1.4.1. Диаметр термоэлектродной проволоки

Диаметр термоэлектродной проволоки следует выбирать не слишком большим для уменьшения погрешности вследствие теплоотвода по термоэлектроду и уменьшения инерционности показаний. Для термопар из благородных металлов обычно используют проволоку диаметром от 0,3 до 3 мм; для термопар из благородных металлов — диаметром 0,35 и 0,5 мм. В особых случаях, например при измерении температуры жидкой стали, используют проволоку диаметром до 0,08 мм.

#### 3.2.1.4.2. Общие сведения о составе, стабилизации, стабильности и интервале рабочих температур термопар

При выборе термопары для промышленных измерений следует исходить из условий ее эксплуатации. Ориентировочные значения верхних границ диапазонов температур, при которых наиболее распространенные термопары могут работать

на воздухе в течение длительного времени, приведены в табл. 3.7. Допустимые максимальные температуры в значительной мере зависят от диаметра термоэлектродной проволоки, а также от химического воздействия газов. В случае необходимости коррозию можно исключить путем заделки термопары в герметичный чехол или наполнением защитного чехла нейтральным газом.

При температурах ниже  $0^\circ\text{C}$  материал термоэлектродов не подвергается вредному воздействию. Выше  $400^\circ\text{C}$  на воздухе термопары из благородных металлов начинают активно окисляться. У большинства металлов возникает охруп-

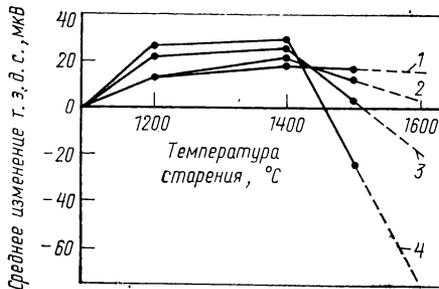


Рис. 3.28. Среднее изменение т. э. д. с. при  $1083^\circ\text{C}$  нестабилизированной термоэлектродной проволоки PtRh10 в зависимости от температуры и длительности стабилизации, ч:  
1 — 1; 2 — 5; 3 — 15; 4 — 25

чивание из-за отсутствия серы. У термопар из благородных металлов из-за увеличения размера зерна может снижаться механическая прочность и пластичность, в результате чего может произойти усталостное разрушение. Интервал рабочих температур и срок службы термопар зависят прежде всего от химического состава термоэлектродов (табл. 3.8). Только специально изготовленные термоэлектродные материалы дают гарантию безотказных температурных измерений в течение длительного времени.

Временные изменения т. э. д. с., которые могут возникнуть в процессе эксплуатации (в результате структурных изменений, влияния испарения, окисления, коррозии и примесей), подробно изучены в лабораторных исследованиях [3.27а, б]. Влияние стабилизации на PtRh—Pt термопары показано на рис. 3.28 [3.28]. Для этих термопар проводят стабилизацию длительностью от 1

Т а б л и ц а 3.7

**Предельные рабочие температуры термопар при длительной работе в чистом воздухе по данным стандартов ФРГ и США**

Стандарт	Предельные рабочие температуры термопары							
	Cu—CuNi		Fe—CuNi		NiCr—Ni		NiCr—CuNi	
	Ø, мм	°C	Ø, мм	°C	Ø, мм	°C	Ø, мм	°C
ДИН 43712	0,5	400	3,0	700	3,0 (2,0)	1000	—	—
	—	—	1,0	600	1,38	900	—	—
ASTM	1,63	371	3,26	760	3,26	1260	3,26	871
	0,81	260	1,63	593	1,63	1093	1,63	649
	0,51	204	0,81	482	0,81	928	0,81	538
	0,32	204	0,51	371	0,51	871	0,51	427
			0,32	371	0,32	871	0,32	427

Примечание. Для термопар PtRh10—Pt, PtRh13—Pt, PtRh30—PtRh6, PtRh5—AuPd46Pt при диаметре 0,35 и 0,50 мм предельные рабочие температуры составляют соответственно 1300, 1400, 1500 и 1200° С.

Т а б л и ц а 3.8

**Состав сплавов для термоэлектродов**

Термоэлектрод	Краткое обозначение	Состав
Медь	Cu	Чистая электролитическая медь
Железо	Fe	Технически чистое безуглеродистое железо (примеси составляют ~0,05% С; 0,2% Mn; Si; S; Ni; Cr; P от 0,005 до 0,02% каждого)
Константан	Конст.	53—55% Cu; 45% Ni с малыми добавками Mn и Fe и с примесями С, Si, Co, Mg
Никель хром (хромель, кантал Р, тофель)	NiCr	89—90% Ni; 9—10% Cr; добавки до 2% Si, Mn, Fe; следы Co, Al, Mg, С
Никель (алюмель, кантал N, нияль)	Ni	93—98% Ni; 1—2,4% Si; 1,3—2,5% Al; 1,8—3,25% Mn; до 0,5% Fe, Co; следы Mg
Платинородий 10	PtRh10	90% Pt, 10% Rh
Платина	Pt	Физически чистая платина

Примечание. Изготовители: хромель и алюмель — Hoskins Mfg Company; кантал Р и кантал N — The Kanthal Corporation; тофель и нияль Wilburg, B. Driver Company.

до 4 ч. Выше 1400°С их т. э. д. с. резко снижается вследствие испарения родия. Из рис. 3.29 видно изменение т. э. д. с. платины и платинородиевого сплава с увеличением времени выдержки в процессе отжига при температуре 1400°С в защитном чехле из чистого глинозема или алюмосиликата в атмосфере водорода или на воздухе [3.29].

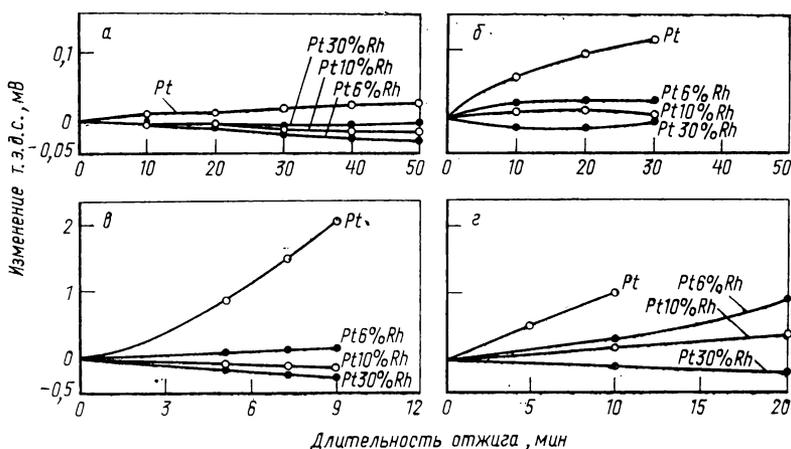


Рис. 3.29 Изменение т. э. д. с. платины и платинородиевого сплава в зависимости от длительности отжига на воздухе или в водороде при 1400°С: а — отжиг на воздухе в изоляторе из чистого глинозема; б — то же, в изоляторе из алюмосиликата; в — отжиг в водороде в изоляторе из чистого глинозема; г — то же, в изоляторе из алюмосиликата

Для того чтобы отклонение т. э. д. с. термопар не превышало допустимой величины, их следует изготавливать очень тщательно, и материал должен проходить проверку на различных этапах изготовления. Готовый сплав должен быть совершенно гомогенным и очень точно соответствовать заданному химическому составу. Из продольного и поперечного сечений слитка отбирают пробы, которые затем протягивают в проволоку, по всей длине которой измеряют колебания т. э. д. с. Эти колебания не должны превышать  $1/10$  допустимых отклонений (рис. 3.30) [3.30а].

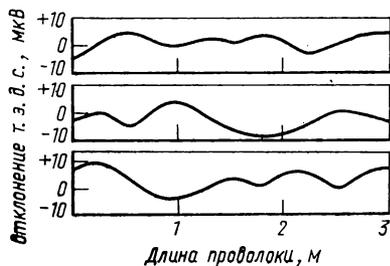


Рис. 3.30. Проверка гомогенности слитков хромеля... Колебания т. э. д. с. проволоки, изготовленной из образцов, отобранных от трех плавов

При оценке стойкости и надежности термопар в эксплуатации [3.24, 3.31] следует различать срок службы, зависящий от вида нагружения и требуемой при этом точности измерений, и живучесть, которая определяется более или менее быстро наступающим разрушением термоэлектродов в результате окисления, охрупчивания или иных химических реакций. Несмотря на подробные исследования поведения термопар в отношении изменения т. э. д. с. под влиянием различных факторов при разных температурах и диаметрах термоэлектродной проволоки, нельзя дать надежных прогнозов об их сроке службы при тех или иных конкретных условиях эксплуатации.

### 3.2.1.4.3. Термопары из неблагородных металлов

Для измерений температуры между 0 и 1000°С иногда даже до 1300°С обычно используют термопары из неблагородных металлов [3.26, 3.30, 3.32, 3.33].

*Медь — константан и подобные им термопары.* Термопару медь — константан (Cu — конст.) с интервалом рабочих температур от (—250°С) —200°С до 400°С (600°С) используют в основном для измерений в диапазоне ниже 200°С, так как при более высокой температуре медь окисляется. В восстановительной атмосфере можно измерять температуру до 600°С в течение длительного времени.

Термопары мангантан — константан и нейзильбер — константан дают примерно такую же величину т. э. д. с. Благодаря их низкой теплопроводности их используют для измерений температурных малых объектов, чтобы погрешность из-за теплоотвода была возможно меньше. Для измерений в ядерных реакторах термопары с медным или константановым термоэлектродом не применимы, так как медь под воздействием нейтронного облучения превращается в цинк и никель [3.34, 3.35].

Термопара серебро — палладий может быть использована до 600°С. Ее т. э. д. с. при 600°С составляет 13,114 мВ. Эта термопара отличается высокой стабильностью; паразитные т. э. д. с. в ней не могут возникнуть, так как ее термоэлектроды представляют собой чистые металлы.

*Железо—константановая термопара.* Эти термопары применяют в диапазоне температур (—250°С) —200 до 700 (900°С).

Выше 700°С железо сильно окисляется, однако в восстановительной атмосфере его коррозия минимальна. Во влажных средах железный электрод подвержен ржавлению. В серосодержащих промышленных газах, в мазутных топках или при использовании серосодержащего топлива при содержании серы только 0,01%, константан может охрупчиваться из-за образования сульфидов никеля; т. э. д. с. при этом почти не изменяется. Для измерений в соляных закалочных ваннах термопары выполняют в виде трубчатых термоэлементов, у которых константановый термоэлектрод заключен внутри тонкостенной железной трубки, являющейся вторым термоэлектродом. Таким способом можно измерять температуру соляной закалочной ванны до 960°С. При заключении термопары в защитный чехол воздействие серы на термопару и ее окисление значительно уменьшаются (см. 3.2.1.5).

*Никель-хром — никелевые термопары.* Эти термопары, называемые в США хромель-алюмелевыми, обладают наилучшей температуростойчивостью среди термопар из неблагородных металлов. Их рабочий диапазон находится между 0°С (—250°С) и 1000°С (1300°С). Для уменьшения окисления никеля на воздухе в него добавлен алюминий, благодаря чему образуется плотный окисный слой. Кроме того, добавки марганца и кремния защищают никелевый термоэлектрод от воздействия серы, так как эти элементы связывают серу на поверхности в сульфиды. Никельхромовый термоэлектрод менее подвержен влиянию окисления и сульфуризации [3.26, 3.30]. При более высокой температуре и повышенной концентрации серы следует считаться с возможностью охрупчивания. Может приводить к охрупчиванию и наличие остатков серосодержащих масс на поверхности. Как и у всех термопар из неблагородных металлов, многократная смена окислительной и восстановительной атмосферы приводит к изменению т. э. д. с., которое для NiCr — Ni термопар при температуре выше 1000°С уже за короткое время может достигь заметной величины. Повторное растворение окисного слоя, образовавшегося в окислительный период эксплуатации, в последующий восстановительный период приводит к сильному обеднению никельхромового термоэлектрода хромом. В почти нейтральной или восстановительной среде, в содержащих СО печных газах, с высоким содержанием водяных паров, в интервале температур от 800 до 1000°С наблюдается избирательное окисление хрома в NiCr, которое в конце концов приводит к разрушению никельхромового термоэлектрода. Из-за светло-зеленого цвета поверхности излома этот дефект называют «зеленой хрупкостью». NiCr — Ni термопары практически нечувствительны к нейтронному облучению, поэтому их часто применяют в ядерных реакторах [3.34—3.36].

*Никель-хром—константановые термопары.* Эти термопары (NiCr — CuNi), называемые в СССР хромель-копелевыми, можно использовать до 700°С. Они

мало чувствительны к окислительному воздействию. Серусодержащие и восстановительные атмосферы разъедают термопару. Благодаря высокой т. э. д. с. и малой теплопроводности обоих термоэлектродов эти термопары используют в основном как приемники излучения в пирометрах излучения и для измерения малых градиентов температуры.

*Термопара-нагреватель.* Термопарами-нагревателями являются такие, у которых один или оба термоэлектрода состоят из электронагревательных материалов. Так, например, термопара из нихрома для нагревателей (по ДИН 17410) и никеля показывает высокую окислительность и вместе с тем хорошую стабильность т. э. д. с. При  $1000^{\circ}\text{C}$  ее т. э. д. с. составляет около  $24\text{ мВ}$  [3.24].

### 3.2.1.4.4. Термопары из благородных металлов

Термопары из благородных металлов пригодны для измерений температуры в диапазоне от  $1000$  до  $1800^{\circ}\text{C}$  [3.26, 3.33, 3.37—3.39].

*Платинородий—платиновые термопары.* *Термопара платина-родий (10%)—платина* (PtRh10—Pt), интервал рабочих температур  $0$ — $1300^{\circ}\text{C}$  ( $1600^{\circ}\text{C}$ ) (Ле-Шателье), применяется в основном для очень точных измерений высоких температур. Эта термопара лежит в основе Международной температурной шкалы в интервале между точкой затвердевания сурьмы и точкой затвердевания золота (см. 2.2.2). Она обладает достаточной устойчивостью в окислительной атмосфере до  $1300^{\circ}\text{C}$ . Водород-, серу- и углеродсодержащие газы, металлические примеси (свинец, цинк, медь, железо), а также фосфор, кремний и мышьяк приводят к изменению т. э. д. с. или к охрупчиванию. Наиболее сильно охрупчивают платиновый термоэлектрод даже малые примеси кремния. Поэтому для защиты платиновых термопар нельзя применять никаких кремнийсодержащих изолирующих трубок или защитных чехлов. Двоокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в восстановительной атмосфере выше  $1100^{\circ}\text{C}$  превращается в летучий монооксид кремния ( $\text{SiO}$ ), который диффундирует в платину и реагирует с ней с образованием интерметаллического соединения. Это соединение располагается по границам зерен и тем самым охрупчивает платину. Подобная же причина вызывает коррозию термопары, заключенной в кремнийсодержащий защитный чехол, в атмосфере, содержащей серу (например, в мазутных печах), вследствие образования летучего соединения  $\text{SiS}_2$ . Поэтому следует применять защитные трубки из чистого глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). При высокой температуре т. э. д. с. может уменьшаться из-за того, что из платинородиевого термоэлектрода испаряется родий и осаждается на платиновом электроде. Поэтому оба термоэлектрода должны быть хорошо изолированы друг от друга многоканальной защитной трубкой до самого рабочего спая. Платинородиевый термоэлектрод значительно меньше подвержен влиянию примесей (рис. 3.29). Механическая прочность платиновой проволоки в результате рекристаллизации при высокой температуре снижается.

Под действием нейтронного облучения родий превращается в палладий. Поэтому термоэлектроды, содержащие родий, не следует применять в ядерных реакторах. Платина же очень устойчива против нейтронного облучения [3.34—3.36].

*Термопара платина-родий (13%) — платина* (PtRh13—Pt) используется в англосаксонских странах. Имеет почти такие же свойства, как и термопара PtRh10—Pt, однако может длительное время работать на воздухе при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$ .

*Термопара платина-родий (30%) — платина-родий (6%)* (PtRh30—PtRh6) имеет диапазон рабочих температур  $0$ — $1500^{\circ}\text{C}$  ( $1800^{\circ}\text{C}$ ) (Degussa Pt 18, Heraeus PtRhE118) [3.40] и несколько меньшую т. э. д. с., чем термопара PtRh—Pt. Между  $0$  и  $100^{\circ}\text{C}$  т. э. д. с. изменяется очень полого (см. рис. 3.26), так что изменение опорной температуры в этом интервале практически не оказывает влияния на результаты измерения (отклонение  $0,3$ — $0,4\text{ К}$ ). С помощью такой комбинации сплавов можно измерять более высокие температуры, чем термопарой PtRh—Pt, так как их точки плавления лежат выше  $1800^{\circ}\text{C}$ . Поэтому эти термопары используют прежде всего в сталеплавильной промышленности для измерений температуры расплавов. Другие преимущества состоят в том, что эти сплавы значи-

тельно менее склонны к укрупнению зерна и к охрупчиванию и что малые примеси других металлов оказывают на т. э. д. с. значительно меньшее (почти на порядок) влияние. Испарение родия, который может осаждаться на другом термоэлектроде, также мало изменяет т. э. д. с., но при температуре выше 1000°С испарение металла изменяет т. э. д. с. Термопару нельзя подвергать воздействию восстановительной атмосферы (например, водорода) при температуре выше 1200°С.

Разработанные в США и Англии термопары, содержащие родий в обоих термоэлектродах (40/20%, 20/5% или 13/1%), отличаются более высокой стабильностью при высоких температурах и большей устойчивостью к механическому и химическому воздействию. Их т. э. д. с. чаще всего ниже, чем термопары PtRh30 — PtRh6 [3.41].

#### *Другие термопары из благородных металлов*

Хорошие результаты измерения в нейтральной или слабоокислительной атмосфере до температуры 2100°С дают термопары иридий-родий (60%) — иридий [3.33, 3.42]. При длительной работе в восстановительной атмосфере они становятся хрупкими, в сильно окислительных средах охрупчиваются очень быстро. Эти термопары менее чувствительны к примесям железа, чем платинородий-платиновые. В ядерных реакторах неработоспособны.

*Термопары из молибденплатиновых сплавов* пригодны для измерений в ядерных реакторах до 1500°С в течение многих часов, если они заключены в графитовые защитные чехлы. Уже в слабо окислительной атмосфере т. э. д. с. их существенно изменяется. Обычно используют термопары PtMo01, — PtMo5 [3.43].

*Термопары платина — рутений — платина* с содержанием рутения около 6% также рекомендованы для измерений в ядерных реакторах до 1600°С в неокислительной атмосфере. Т. э. д. с. при этой температуре составляет 28,82 мВ [3.44].

Термопары PtRh5 — AuPd46Pt2 (паллаплат-Негаeus), диапазон применения 0—1300°С и PdPt31Au14 — AuPd35 (платинель II — Engelhardt), диапазон применения (—100)—1300°С [3.45] используют для измерения температуры выше 1000°С вместо термопар NiCr — Ni, если последние из-за условий эксплуатации и прежде всего в окислительных газах имеют недостаточный срок службы.

Паллаплат имеет более высокую т. э. д. с., чем NiCr — Ni. Механически устойчивый к нагружению многократным изгибам платинель II имеет характеристику, близкую к термопаре NiCr — Ni (максимальное отклонение 10 К).

#### **3.2.1.4.5. Термопары из тугоплавких металлов и сплавов**

Для измерения температуры в высокотемпературных реакторах, реактивных двигателях, ракетах и спутниках, а также для регулирования высокотемпературных печей необходимо иметь термопары с диапазоном рабочих температур выше 2000°С. Для этой цели пригодны такие тугоплавкие металлы, как вольфрам, молибден, рений и их сплавы [3.39, 3.39а, 3.46, 3.47].

Вольфраммолибденовые термопары при 2000°С развивают т. э. д. с. всего около 6 мВ. При 1300°С изменяется знак т. э. д. с. Так же ведут себя и термопары из вольфраммолибденовых сплавов. В инертных газах и в водороде эти термопары не корродируют. Воздействие углерода, углеродсодержащих газов и серы на молибден становится заметным при более низких температурах, чем их воздействие на вольфрам. Уже после нескольких нагревов до высокой температуры может произойти разрушение термоэлектродной проволоки.

*Термопары из вольфрамрениевого сплава* с высоким содержанием рения (до 26%) изготовить легче, чем из чистого вольфрама. Этот сплав менее склонен, чем вольфрам, к разрушению после нагрузки при высокой температуре в водороде или после сварки. Вольфрамрениевый сплав с 25% рения применяют в качестве отрицательного термоэлектрода. Положительным термоэлектродом служит чистый вольфрам или вольфрамрениевый сплав с небольшим содержанием рения, чтобы величина т. э. д. с. была достаточно большой. Эти сплавы после отжига при 1800°С становятся достаточно устойчивыми к разрушению благодаря введению

в вольфрамовый порошок присадок калия, кремния или алюминия, которые испаряются при дальнейшей обработке сплава.

*Термопары WRe3 — WRe25* хорошо работают в нейтральной и слабо восстановительной атмосфере и при циклическом изменении температуры. В окислительной атмосфере термопара разрушается, так же как и в присутствии углерода и углеродсодержащих газов из-за образования карбидов вольфрама. Термопары могут разрушаться и загрязняться из керамического защитного чехла [3.48]. В тепловыделяющих элементах ядерных реакторов измерения проводят в защитном газе. Т. э. д. с. этих термопар воспроизводится настолько хорошо, что основные величины стандартизованы NBS или изготовителем. Отклонения между 400 и 2300°С не превышают  $\pm 1\%$ .

### 3.2.1.4.6. Термопары из тугоплавких неметаллических соединений (полупроводников)

Термопары, состоящие из тугоплавких неметаллов [3.33, 3.39, 3.39а, 3.49, 3.50], устойчивы при температуре выше 1500°С в углеродсодержащих газах, даже при измерениях выше 1700°С не требуется защитной арматуры. Карбид

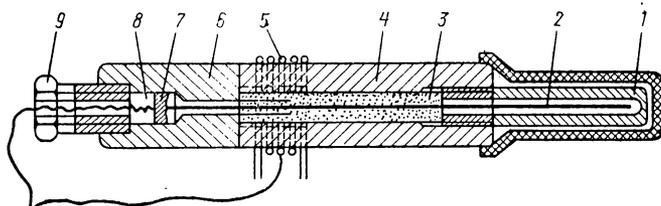


Рис. 3.31. Графитвольфрамовый термоэлектрический термометр: 1 — графитовый наконечник; 2 — вольфрамовый стержень; 3 — окись алюминия; 4 — графитовая трубка; 5 — охлаждающий; 6 — изолятор; 7 — контактная гильза; 8 — прижимная пружина; 9 — нажимной винт

кремния (SiC) устойчив при такой температуре и в окислительной атмосфере. Недостатками являются плохая воспроизводимость свойств, не позволяющая построить единую термоэлектрическую характеристику, и низкая механическая прочность материала. Кроме того, большинство термометров неудобно в эксплуатации. Однако благодаря улучшению технического исполнения и развитию сортамента тонких труб и проволоки эта задача может быть решена.

*Графитвольфрамовая термопара* [3.50] (рис. 3.31) может быть изготовлена с относительно небольшим наружным диаметром. При исключении влияния влаги в неокислительной атмосфере она имеет стабильную т. э. д. с. (45 мВ при 2100°С). Отклонения от характеристики в процессе эксплуатации могут достигать  $\pm 10$  К. Поскольку характеристики т. э. д. с. отдельных термоэлементов могут различаться, погрешность при замене одной термопары на однотипную другую надо считать равной 5% от измеряемой температуры [3.33]. Эти термопары с успехом используют в качестве погружаемых термометров для измерений температуры жидкой стали.

*Термопара графит — графит-бор* (1%) [3.51] при 2000°С развивает т. э. д. с. около 90 мВ. Погрешность можно считать равной  $\pm 10$  К, а при замене одной термопары на однотипную другую — до  $\pm 35$  К. Время установления показаний составляет только 5 с. Термопара стабильна в нейтральной и восстановительной атмосферах до 2600°С и применяется как термометр погружения для измерения температуры жидкой стали, а также для измерения температуры в вакуумных плавильных печах и в печах для изготовления тугоплавких огнеупорных материалов.

*Термопара графит — карбид кремния (C — SiC)* по Фиттереру [3.52] (рис. 3.32) имеет т. э. д. с. 508 мВ при 1700°С и работоспособна до 2700°С. Срок службы составляет около 115 ч, погрешность  $\pm 10$  К, а при замене ее на однотип-

ную — до 1% от измеряемой температуры. В окислительной атмосфере графитовый стержень, заключенный в чехол из карбина кремния, корродирует из-за пористости защитного чехла из SiC и его проницаемости для этих газов. В этом случае результаты измерения неудовлетворительны. Для предохранения графита от окисления его поверхность покрывают окисью алюминия или карбидом бора, а пространство между защитным чехлом и стержнем заполняют графитовым порошком. При измерениях выше 1800°С защитный чехол должен быть наполнен нейтральным газом.

*Термопара из карбида кремния ( $nSiC - pSiC$ ), легированного различными примесями, дает при 1700°С т. э. д. с. около 100 мВ. Эта термопара применяется для измерения температуры в окислительных средах в камерах сгорания и реактивных соплах со сроком службы до 100 ч и выдерживает временную перегрузку до 2000°С.*

*Термопара вольфрам — окись тория (2%) —  $n$ -карбид кремния [3.53] имеет при 2000°С т. э. д. с. около 500 мВ. При тщательной подготовке исходных материалов разброс по температуре для термопар различных партий не превышает  $\pm 1\%$  от измеряемой температуры. Отклонения от усредненной характеристики лежат в пределах 0,5% от измеряемой температуры в интервале до 1200°С; изменение т. э. д. с. после 25 ч эксплуатации при температурах от 1500 до 2000°С составляет менее 0,5%. Время установления показаний в газах равно 1—5 с в зависимости от скорости газа.*



Рис. 3.32. Термоэлектрический термометр с термопарой  $Si-SiC$ : 1 — уплотнение из окиси алюминия; 2 — металлизированные контакты; 3 — графитовый стержень; 4 — трубка из карбида кремния; 5 — пробка из карбида кремния

*Термопара молибден—силицид молибдена ( $Mo-MoSi_2$ ) [3.54] изготавливается из молибденового стержня и трубки из силицида молибдена. Оба термоэлектрода защищены чехлом из окиси циркония. Чтобы молибденовый стержень не окислялся, его покрывают слоем силицида молибдена. Такая термопара выдерживает на воздухе и в кислороде температуру до 1700°С, а в восстановительной среде — до 1850°С. При 1800°С т. э. д. с. равна 24,18 мВ; выше 200°С она изменяется практически линейно.*

*Термопара силицид молибдена — силицид вольфрама ( $MoSi_2 - WSi_2$ ) может быть использована до 1700°С в расплавах стекла, солей и металлов. С помощью термопары *графит — карбид ниобия* или еще лучше *карбид ниобия — карбид циркония* ( $NbC - ZrC$ ) можно измерять температуры в пределах от 3000 до 3500°С [3.50].*

### 3.2.1.4.7. Термопары для низкотемпературных измерений<sup>1</sup>

Для низкотемпературных измерений (до  $-200^{\circ}C$ ) могут быть использованы (согласно рис. 3.27 и табл. 3.5А—3.5Г) обычные термопары, применяемые для измерения высоких температур:  $Cu - CuNi$ ,  $Fe - CuNi$ ,  $NiCr - Ni$ ,  $NiCr - константан$ .

*Термопара платинель* (табл. 3.53). Ею можно измерять температуры до  $-100^{\circ}C$ . Как видно из рис. 3.27, а, б и г, чувствительность (мкВ/К) этой термопары при температурах ниже  $-200^{\circ}C$  становится очень малой. В отличие от нее термопара  $AuCo - AgAu$  [3.55—3.56] имеет в этой области температур почти линейную характеристику. Однако эта термопара склонна к хрупкости при холодной деформации. Для длительных производственных измерений между  $-220$  и  $-270^{\circ}C$  лучше всего подходит термопара  $AuFe - NiCr$  [3.57], которая имеет достаточно линейную характеристику при хорошей стабильности. Ее чувствительность между  $-200$  и  $270^{\circ}C$  изменяется только от 0,013 до 0,016 мкВ/К.

<sup>1</sup> См. также 2.2.5 и 2.2.6.

Поэтому для того, чтобы при температурных измерениях вблизи абсолютного нуля получать достаточно надежные данные (см. табл. 3.5 и рис. 3.27), чаще всего достаточно проводить поверку в двух фиксированных точках, а иногда только в одной, например в точке кипения водорода или гелия (см. 2.2.5). В таблицах NBS приведены значения т. э. д. с. в интервале температур от 0,15 до 280 К для NiCr (хромеля), никеля, меди, константана и сплава серебра с 28% (ат.) золота по отношению к платине по Международной температурной шкале МПТШ-68; кроме того, в таблицах даны значения коэффициентов Томсона  $\sigma = dE/dT$  и  $dc/dT = d^2E/dT^2$  в зависимости от температуры для этого интервала. Исходя из этих данных, получены табулированные ряды основных величин для различных комбинаций термоэлектродов (например, ряд основных величин по NBS 124 приведен в табл. 3.5 и на рис. 3.27) [3.57a].

### 3.2.1.4.8. Термопары для пирометров излучения

В пирометрах излучения чаще всего используют металлические термопары NiCr — константан из-за их высокой чувствительности (около 60 мкВ/К). Значительно более высокую т. э. д. с. дают термопары теллур — висмут [3.58] и теллур — платина [3.59] (400 мкВ/К), которые можно применять до температуры 300°С. Термопара сурьма — висмут — сурьма (3%) [3.60 и 3.61] имеет чувствительность 110 мкВ/К. Очень высокую т. э. д. с. развивают полупроводники — кремний или  $A^{III}B^V$ , скомбинированный из полупроводников с *p*- и *n*-типами проводимости [3.62] (до 700 мкВ/К). Последний является соединением из элементов третьей и пятой групп Периодической системы, как антимонид индия, арсенид индия, антимонид сурьмы и т. д. Из-за своей хрупкости эти термоэлектродные материалы применяют почти исключительно в пирометрах излучения (см. 9.7.3.2.3).

### 3.2.1.5. КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

#### 3.2.1.5.1. Армированные и неармированные термоэлектрические термометры

Термоэлектрическими термометрами называют все термометры, снабженные защитной арматурой или без нее, термоприемником которых является рабочий конец термопары. Поэтому незащищенные термопары, которые применяют без защитной арматуры, тоже называют термоэлектрическими термометрами. Из всех контактных термометров термоэлектрические благодаря точечной форме их рабочего спая наиболее легко могут быть приспособлены к конкретным условиям использования. Поэтому они нашли наиболее широкое применение в практике технических измерений.

При изготовлении и применении термоэлектрических термометров следует учитывать, что они должны быть устойчивыми к механическим нагрузкам и химическому воздействию газов и паров, соляных ванн, металлических расплавов и т. д. (см. 6.2) и что погрешность измерения из-за отвода тепла наружу должна быть возможно меньшей. При быстро изменяющейся температуре показания термометра должны достаточно быстро следовать за изменениями температуры объекта (см. 7.3).

Неармированные термопары можно использовать, если нет опасности их повреждения вследствие химических воздействий или механической нагрузки. Если к возможным воздействиям устойчив только один из двух термоэлектродов, то второй термоэлектрод из коррозионностойкого материала можно выполнить в виде трубки, а первый вставить внутрь трубки и приварить. Такие трубчатые термометры отличаются малой тепловой инерционностью.

### 3.2.1.5.2. Изолирующие материалы для термоэлектродов

Необходимо обратить внимание на то, что термоэлектроды нигде, кроме рабочего спая, не должны соприкасаться, чтобы не было замыкания электрической цепи и связанных с этим погрешностей измерения. Поэтому термоэлектроды должны быть хорошо электрически изолированы друг от друга. Изолирующие материалы не должны терять своих диэлектрических свойств из-за поглощения

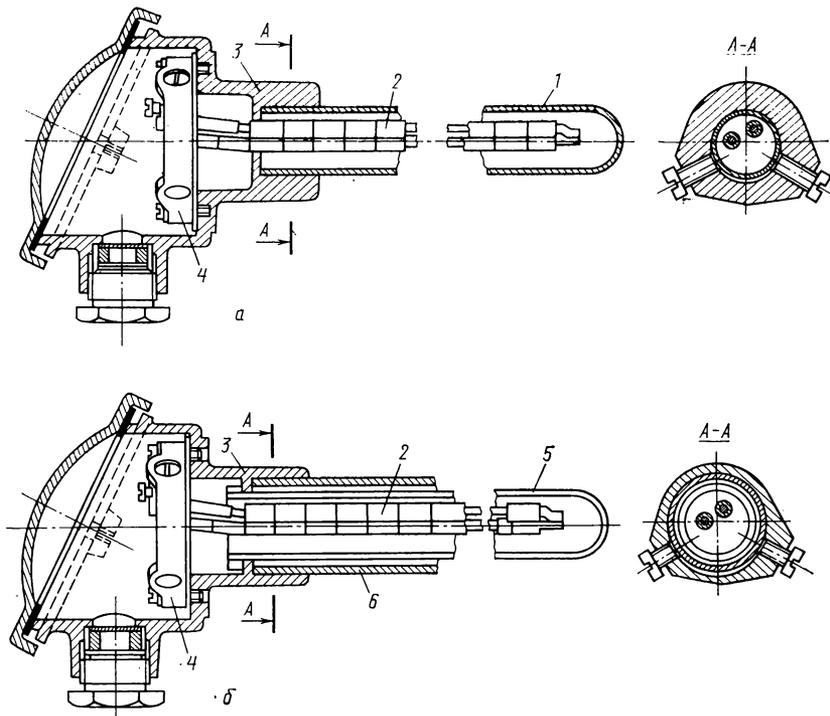


Рис. 3.33. Термоэлектрический термометр с термопарой из благородных металлов: *a* — в металлическом защитном чехле и с одноканальной изолирующей трубкой; *б* — в керамическом чехле с предохранительной трубкой; *1* — металлический защитный чехол; *2* — термопара с изолирующими трубками; *3* — головка термометра; *4* — соединительная колодка; *5* — керамический чехол; *6* — предохранительная трубка

влаги из окружающей среды. Для температур от  $-10$  до  $70^{\circ}\text{C}$  термоэлектроды, так же как и удлинительные (компенсационные) провода (см. 3.2.1.6.2), можно изолировать оболочкой из термопластичных пластмасс; для температур  $(-40)$ — $200^{\circ}\text{C}$  и кратковременно до  $250^{\circ}\text{C}$  — оболочкой из термостойкой пластмассы. Часто для температур до  $200^{\circ}\text{C}$  используют лакирование термоэлектродов, особенно медных и константановых. Термоэлектродная проволока в стеклянной обмотке выдерживает температуру до  $450^{\circ}\text{C}$ , в кварцевой — до  $800^{\circ}\text{C}$ . Для измерения температуры обшивки космических кораблей разработано покрытие, устойчивое до  $1800^{\circ}\text{C}$ .

При заделке в защитные чехлы, в которые вставляют термопары для защиты от сильных механических нагрузок, термоэлектроды изолируют от чехла и друг от друга короткими керамическими трубками-изоляторами (ДИН 43725). При использовании металлических чехлов надо изолировать оба термоэлектрода, при использовании керамических чехлов достаточно изолировать только один термоэлектрод (рис. 3.33). Термопары из благородных металлов изолируют при помощи

одной длинной изолирующей трубкой с несколькими, например четырьмя, каналами (многоканальные изолирующие трубки, рис. 3.34). Для защиты рабочего спая от повреждений нижний конец изолирующей трубки снабжен выемкой.

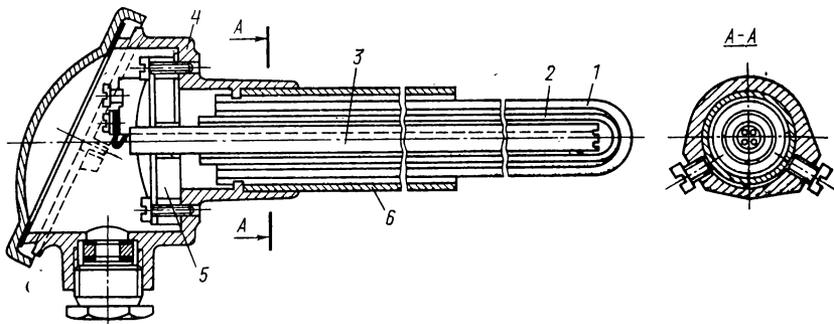


Рис. 3.34. Термоэлектрический термометр с термопарой из благородных металлов с изолирующей четырехканальной трубкой, с внутренним и наружным керамическими чехлами и с предохранительной трубкой: 1 — наружный защитный чехол; 2 — внутренний газонепроницаемый чехол; 3 — термопара в четырехканальном изоляторе; 4 — головка термометра; 5 — соединительная колодка; 6 — предохранительная трубка

Термопары в защитном патроне из никеля или стали St 35.8, применяемые в качестве легко заменяемых измерительных вставок, также изолированы с помощью длинных керамических трубок. Такие измерительные вставки изготавливают с одной или двумя термопарами для простых или двойных термоэлектрических термометров и вставляют в металлический защитный чехол, защищающий измерительную вставку от воздействия высокого давления или напора потока измеряемой среды.

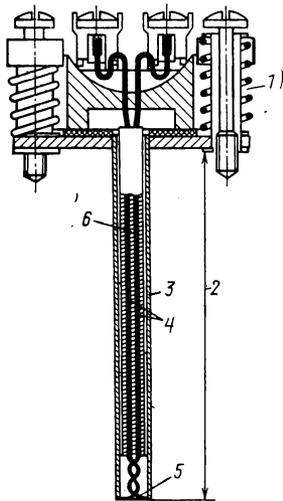


Рис. 3.35. Измерительная вставка термоэлектрического термометра, термоэлектроды приварены или припаяны ко дну вставки: 1 — соединительная колодка; 2 — длина вставки; 3 — оболочка вставки; 4 — термопара; 5 — дно вставки; 6 — двухканальная трубка-изолятор

Время установления показаний термометра тем меньше, чем лучше теплопередача от защитного чехла к рабочему спая термопары. Поэтому для обеспечения хорошего теплового контакта вставка своим дном должна плотно прилегать ко дну чехла, что обеспечивается с помощью пружины, расположенной в головке термометра (рис. 3.35).

Чтобы уменьшить потери тепла от рабочего спая термопары через ее оболочку, последнюю изготавливают из легированной стали X10CrNiMoTi1810, обладающей низкой теплопроводностью. Благодаря этому уменьшается не только погрешность вследствие отвода тепла через теплопроводность (см. 7.1), но и инерционность термометра (см. 7.3).

Изолирующие трубки изготавливают из плотных керамических материалов (ДИН 40685). Для термопар из благородных металлов до температуры 1200°С используют трубки из магнезиальносиликатной керамики (KER 220, Стеатит). Изолирующий материал из кордиеритовой керамики (KER 410) может применяться до 1400°С, а такая же керамика с содержанием окиси алюминия от 50 до 80% (KER 610) — до 1500°С. При температурах выше 1000°С изолирующие трубки должны состоять из того же материала, что и защитный чехол.

Для термопар из благородных металлов при измерениях в интервале 900—1600 °С необходимо использовать высокожаропрочную окисную керамику (КЕР 710, содержание окиси алюминия >99%). В восстановительной атмосфере срок службы термопар может снижаться из-за присутствия тяжелых металлов и кремния. Кремнезем восстанавливается в водороде и в окиси углерода до кремния, который, как и тяжелые металлы, насыщает термоэлектроды и охрупчивает их. Следы серы могут заметно изменять т. э. д. с., так же как и остатки масел и металлической пыли, которые при неаккуратном обращении попадают в изолирующую трубку.

### 3.2.1.5.3. Оболочковые термоэлектрические термометры, <sup>1</sup> их конструкция, размеры и применение

Оболочковые термометры [3.22, 3.63, 3.64] состоят из одной или нескольких термопар, заключенных в металлическую оболочку, наполненную сильно спрессованной порошкообразной оксидной изолирующей массой — окислами магния

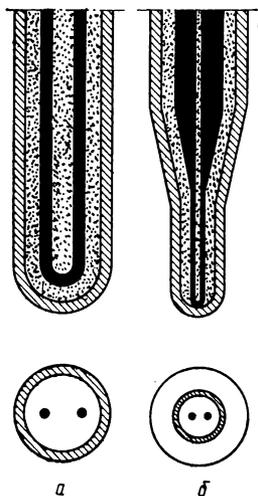


Рис. 3.36. Оболочковый термоэлектрический термометр (разрез):  
а — в нормальном исполнении, рабочий спай термопары изолирован;  
б — с сужением, рабочий спай термопары соединен с оболочкой

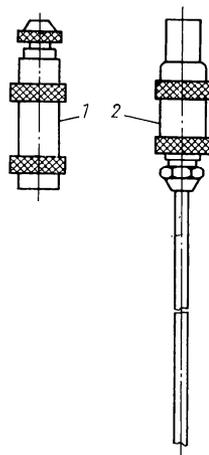


Рис. 3.37. Оболочковый элемент со штеккерным разъемом:  
1 и 2 — детали разъема

или алюминия, в особых случаях для очень высоких температур — окислами циркония, тория или бериллия. Оболочка защищает термопару от химических и механических воздействий. Ее изготавливают чаще всего из нержавеющей стали, а также из медноникелевых сплавов, из инконеля или из платинородия. Рабочий спай термопары в общем случае изолирован от оболочки (рис. 3.36, а). Для того чтобы у оболочковых термометров, заполненных окисью магния, обеспечить достаточно высокое сопротивление изоляции при длительной эксплуатации во влажной атмосфере и чтобы газы, вызывающие коррозию, не проникали внутрь термометра, открытый конец оболочки герметизируется синтетической смолой. Тем самым обеспечивается высокая стабильность оболочковых термометров. Свободные концы термоэлектродов могут быть подключены к соединительной колодке в головке термометра или соединены с разъемом (рис. 3.37). В случае, если, например, в трубопровод должна быть введена только часть оболочкового термометра, в любом месте по его длине могут быть укреплены фланец, передвижная колодка с клеммами и т. д.

Если выступающий конец термометра слишком длинен, то его можно изогнуть и соответствующим образом уложить. Оболочковые термометры с термопарами

<sup>1</sup> Чаще такие термометры называют бронированными, иногда термометрами (термопарами) кабельного типа. (Прим. ред.)

из благородных металлов могут быть изготовлены длиной до 400 м, с термопарами из благородных металлов — до 10 м. Их наружный диаметр лежит в пределах от 0,15 до 8 мм; преимущественно используют оболочковые термометры диаметром 3 мм. Оболочковые термометры с термопарами Fe — CuNi и NiCr — Ni с оболочками из стали X10CrNiTi189 применяются для измерений температуры до 870°С, с оболочками из инконеля (72% Ni, 14—17% Cr, 6—10% Fe, <10% Mn) — до 1150°С, термопары PtRh — Pt с оболочками из инконеля — до 1300°С.

Благодаря своей конструкции оболочковые термометры обладают малой инерционностью, минимальной погрешностью, связанной с теплопроводностью, высокой устойчивостью к циклическим изменениям температуры, прочностью при ударных нагрузках и давлении и самое главное хорошей гибкостью. Время установления полупоказания в воде (см. 7.3) составляет 10—700 мс при диаметре термоэлемента от 0,25 до 3 мм. При скачкообразном изменении температуры изме-

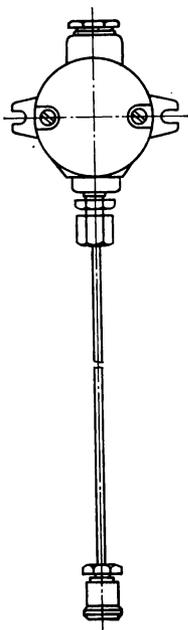
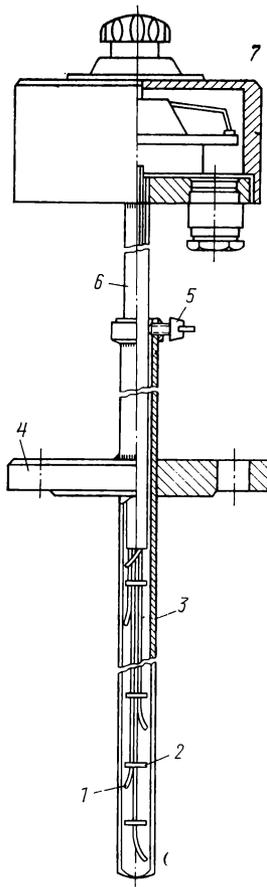


Рис. 3.38. Оболочковый термоэлектрический термометр для измерений температуры поверхностей

Рис. 3.39. Оболочковые термоэлектрические термометры в общем защитном чехле с фланцем. Рабочие спай распределены по длине чехла. Переключатель свободных концов термопар расположен в головке термометра:

1 — оболочковый термоэлектрический термометр, термопара изолирована от оболочки; 2 — разделительная шайба; 3 — защитный чехол; 4 — фланец; 5 — упорный винт; 6 — выводная трубка; 7 — головка термометра с переключателем для 11 термопар



ряемого объекта временная зависимость изменения сигнала соответствует приблизительно экспоненциальной функции. Если термоэлектроды приварены непосредственно к оболочке (см. рис. 3.36, б), то время полупоказания уменьшается еще на 20%. Изоляция термопары не разрушается при скручивании, растяжении, плоскостной или изгибе, пока остается целой оболочка. Допустимый радиус изгиба составляет один или два диаметра оболочки.

Благодаря гибкости оболочковые термометры можно укладывать в труднодоступных местах, приваривать, припаивать, приклеивать или просто прижимать при измерениях температуры поверхностей до 800°С, а также измерять температуры подшипников, турбин и т. д. (рис. 3.38). При измерениях в ядерных реакторах или в автоклавах высокого давления можно сравнительно просто ввести большое число оболочковых термометров через один общий ввод с герметичным уплотнением. Допускаются статические давления до 1000 бар. С помощью таких термо-

метров можно измерять температуры в проходных печах, когда рабочий спай термопары введен в измеряемый объект и вместе с ним протягивается через печь. Они пригодны также для измерения температуры подвижных деталей машин и механизмов, таких как клапаны поршневых двигателей. При высоких температурах, давлениях или скоростях потока оболочковые термометры, снабженные соединительной колодкой и прижимной пружиной, вставляют в защитные чехлы. Благодаря малому диаметру этих термометров можно уменьшить диаметр и длину защитных чехлов по сравнению с обычными стандартными чехлами настолько, что время полуоказания (см. 7.3) станет меньше на  $1/3$ . Для измерений температуры на различной высоте, например по высоте дистилляционной колонны, в длинный защитный чехол встраивают большое число оболочковых термометров, рабочие спаи которых равномерно распределены по длине чехла (рис. 3.39).

### 3.2.1.5.4. Прямые термоэлектрические термометры

Прямые термометры (ДИН 43733) в металлических или керамических защитных чехлах (см. рис. 3.33 и 3.34) применяют для измерения температуры в трубопроводах и емкостях, в различных нагревательных печах, в расплавах сталей и металлов. Для ограничения глубины погружения могут быть использованы передвижные фланцы (ДИН 43734) или резьбовые муфты. Для измерений в доменных печах удобны клиновые стяжки с конусным уплотнителем, которые привариваются к трубопроводам или монтажным плитам (рис. 3.40).

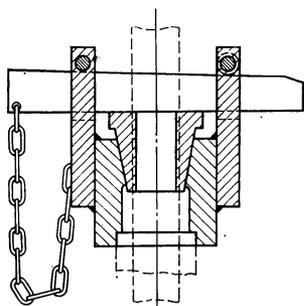
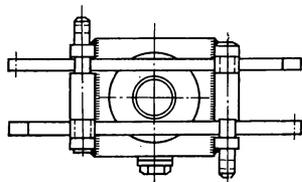


Рис. 3.40. Клиновая стяжка с конусным уплотнением



Для обеспечения хорошей теплопередачи и уменьшения инерционности применяют трубчатые термометры или приваривают термопару к доньшку металлического защитного чехла. Так как при таком соединении измерительная цепь может получить некоторый электрический потенциал относительно земли, нарушение изоляции и возникновение шунтирующего соединения могут привести к неконтролируемой

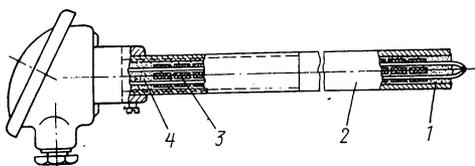


Рис. 3.41. Термоэлектрический термометр для доменных фурм:  
1 — цемент; 2 — защитный чехол; 3 — керамический изолятор; 4 — заливка

погрешности. Если термопара устойчива к коррозионному воздействию измеряемой среды, то можно допустить, чтобы ее рабочий спай выступал из защитного чехла. Благодаря этому значительно уменьшается время установления показаний. Такие устройства (рис. 3.41) оправдали себя при измерении температуры в фурмах доменных печей. Керамические защитные чехлы из-за их газонепроницаемости могут применяться без дополнительного внутреннего защитного чехла только в случае, если термопара устойчива к контролируемому газу. Обычно используют газонепроницаемые керамические внутренние защитные чехлы, дополнительно защищенные устойчивыми к колебаниям температуры керамическими или металлическими наружными чехлами (см. рис. 3.34). Это приводит к увеличению времени установления показаний. Его можно снизить, оставив небольшую часть внутренней газонепроницаемой оболочки, выступающей из наружного защитного чехла.

### 3.2.1.5.5. Угловые термоэлектрические термометры

Температуру соляных ванн часто определяют с помощью *угловых термометров*. Для измерений до  $960^{\circ}\text{C}$  применяют трубчатые термометры, у которых одним термоэлектродом является трубка (чехол) из чистого железа с толщиной стенки около 5 мм, а другим — расположенная внутри нее константановая проволока диаметром 3 мм. Однако при длительной эксплуатации константановая проволока разъедается проникающими в чехол соляными парами. Поэтому часто используют угловые термометры со сменным внутренним керамическим чехлом и изолированной термопарой (рис. 3.42). Фланец должен быть хорошо уплотнен, чтобы через него внутрь чехла не проникали газы. В соляных ваннах для закалки быстрорежущей стали срок службы такого термометра не более 10—15 ч. Износ защитного чехла может быть уменьшен при нанесении защитной окраски из

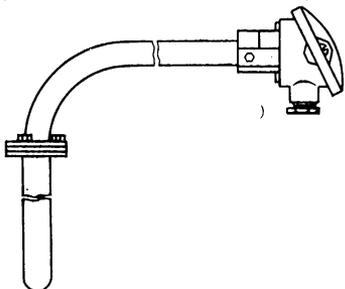


Рис. 3.42. Угловой термоэлектрический термометр с фланцем

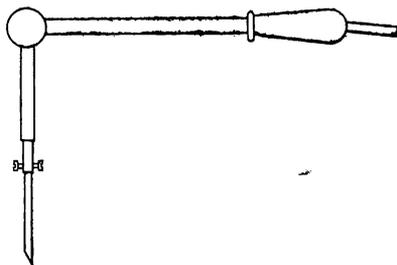


Рис. 3.43. Термоэлектрический термометр для кратковременных измерений в металлических расплавах

алюминиевой бронзы или кокильной краски. Так как наибольшее разъедание чехла наблюдается у поверхности ванны, чехол в этом месте дополнительно защищается обмоткой асбестом с жидким стеклом. В некоторых случаях, если термоэлектроды легко заменяемы, при кратковременных испытаниях можно погружать термометр в очень агрессивные расплавы без защитного чехла (рис. 3.43). В металлических расплавах, например в расплаве алюминия, благодаря их хорошей электропроводности можно получить надежные результаты измерения, даже если рабочий спай термопары разрушен. Однако термоэлектроды вблизи места их погружения должны быть окрашены кокильной краской, чтобы не происходило их контактирования у поверхности, так как в противном случае измерялась бы только температура поверхности расплава.

### 3.2.1.5.6. Другие виды конструкций для различных промышленных применений<sup>1</sup>

В черной металлургии для измерения температуры расплавов стали и жидких шлаков разработаны наиболее целесообразные конструкции термометров.

Разработаны проточные термометры для определения температуры продуктов сгорания и отходящих газов, а также схемы их размещения для построения температурных профилей колошниковых газов в доменных печах. Конструкции термометров, созданных для таких измерений, а также используемые схемы их размещения описаны в [3.65].

Для измерения температуры отходящих газов дизельных двигателей применяют термопары из благородных металлов в защитных чехлах из обычной или нержавеющей стали с передвижным штуцером с конической резьбой. К головке термометра присоединены компенсационные провода длиной 1 м в оплетке из стальной проволоки (рис. 3.44).

<sup>1</sup> См. также 8.

При производстве искусственных волокон [3.66] температуру в цилиндре экструдера регулируют так, чтобы достичь оптимальных условий для обработки синтетической массы. Поэтому термометр устанавливают в цилиндре экструдера таким образом, что от синтетической массы его отделяет только стенка минимальной толщины, которую выбирают из соображений механической прочности. С помощью подпружиненного байонетного соединения торец термометра плотно прижимается к поверхности стенки (рис. 3.45). Температура самой массы может

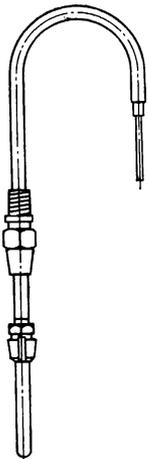


Рис. 3.44. Термoeлектрический термометр для измерения температуры отработанных газов дизельного двигателя



Рис. 3.45. Термометр-вставка с байонетным соединением и прижимной пружиной (устроен так же, как и термометр сопротивления)

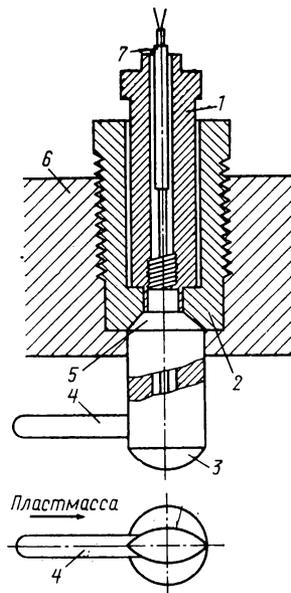


Рис. 3.46. Термoeлектрический термометр для измерения температуры пластмассы в экструдере: 1 — резьбовое приспособление; 2 — втулка; 3 — держатель обтекаемой формы; 4 — термопара в чехле; 5 — конусное уплотнение; 6 — стенка корпуса экструдера; 7 — термоэлектроды

быть определена с помощью термопары, изолированной стекловолокном и укрепленной в держателе легко обтекаемой формы (рис. 3.46). Благодаря малой инерционности такая система позволяет хорошо следить за колебаниями температуры во времени. Действительная температура массы по результатам измерений может отличаться от температуры стенок цилиндра на  $\pm 50$  К [3.67].

Для измерения температуры подшипников турбин [3.68] оболочковые термометры плотно прижимают к баббитовым вкладышам. Чтобы предупредить возникновение в корпусе турбины высокого давления недопустимо высоких тепловых напряжений, два оболочковых термометра плотно вставляют в гнезда, высверленные вблизи наружной и внутренней стенок корпуса турбины. Таким образом можно измерять градиент температур.

Для калориметрических измерений методом дифференциального термического анализа разработаны тонкопленочные термопары, напыляемые на тонкие кварцевые подложки для измерений температур от  $-125$  до  $500^\circ\text{C}$  [3.69].

Термометр очень малой теплоемкости при относительно высокой механической прочности получается при напылении двух металлических термоэлектродов на тонкую стеклянную иглу. При диаметре острия  $0,1$  мм время установления показания равно  $10^{-6}$  с [3.70].

Термометры в виде поверхностных термопар в разнообразном конструктивном исполнении используют для измерения температуры в технике и медицине (например, для измерения температуры кожи). Для правильного определения температуры в скоростном потоке газов термометры делают в виде Г-образного газоотвода или диффузора (см. 8.4).

### 3.2.1.6. КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СВОБОДНЫХ КОНЦОВ ТЕРМОПАРЫ

#### 3.2.1.6.1. Расчет влияния температуры свободных концов термопары

Поскольку термопарами измеряют разницу температур, измеренная т. э. д. с. зависит не только от температуры рабочего спая, но и от температуры свободных концов термопары. Измеренная температура  $t$  равна температуре, определенной по градуировке термопары, если температура свободного конца термопары  $t_v$  равна опорной температуре  $t_b$ , которая положена в основу градуировки термопары, или если температура свободных концов колеблется вокруг нее в допустимых пределах. Если измерительный прибор имеет шкалу в градусах Цельсия, то необходимо температуру свободных концов термопары  $t_v$  поддерживать возможно ближе к опорной температуре  $t_b$ , (0 или 20°С).

При отклонении температуры свободных концов  $t_v$  от опорной  $t_b$ , измеренное значение т. э. д. с.  $E_a$  должно быть скорректировано на величину  $\Delta E$ , соответствующую этому отклонению. Для температуры свободных концов от 0 до 60°С т. э. д. с.  $E$  изменяется практически линейно разности температур  $t_v - t_b$ . Поэтому в соответствии с рис. 3.47 измеренное значение т. э. д. с.  $E_a$  должно быть увеличено на  $\Delta E = k(t_v - t_b)$ . При этом т. э. д. с.  $E$ , соответствующая температуре  $t$ , равна

$$E = E_a + \Delta E = E_a + k(t_v - t_b). \quad (3.23)$$

† Среднее значение  $k$  для интервала температур от 0 до 60°С можно рассчитать по табл. 3.9. В ней же даны величины т. э. д. с., на которые надо уменьшать основные величины т. э. д. с. термопар по ДИН 43710, если опорная температура равна 20, 50 или 60°С.

Т а б л и ц а 3.9

Средние значения  $k$  для температуры свободных концов термопары от 0 до 60°С и изменение ее т. э. д. с.

Термопара	$k$ , мВ/К	$\Delta E_b$ , мВ, при $t_b$ , °С		
		20	50	60
Cu—CuNi	0,040	0,80	2,05	2,48
Fe—CuNi	0,052	1,05	2,65	3,19
NiCr—Ni	0,040	0,80	2,02	2,43
PtRh10—Pt	0,00583	0,113	0,299	0,364

Показание измерительного прибора с температурной шкалой правильно в случае, если  $t_v = t_b$ . При отклонении температуры свободных концов  $t_v$  от опорной температуры измеряемая температура  $t$  может быть получена из отсчитанного значения  $t_a$  при введении коэффициента коррекции  $C$ :

$$t = t_a + C(t_v - t_b). \quad (3.24)$$

Так как  $E - E_a = \Delta E$  в интервале температур, близком к температуре свободных концов, пропорциональна  $k(t_v - t_{b'})$ , а вблизи измеряемой температуры пропорциональна  $k'(t - t_a)$ , то должно быть

$$k(t_v - t_{b'}) = k'(t - t_a)$$

$$\text{и } t - t_a = k/k'(t_v - t_{b'}) = C(t_v - t_{b'}).$$

Поэтому  $C$  может быть рассчитан из соотношения изменения т. э. д. с. от температуры при опорной температуре  $t_{b'}$  к изменению т. э. д. с. при измеряемой температуре  $t$ :

$$C = k/k' = (\Delta E_{b'}/\Delta t)/(\Delta E_a/\Delta t). \quad (3.25)$$

Коэффициент коррекции  $C$  зависит от типа термопары и значения измеряемой температуры (рис. 3.48). В общем случае с повышением температуры коэффициент  $C$  уменьшается. Если характеристика термопары линейна, то  $C = 1$ ,

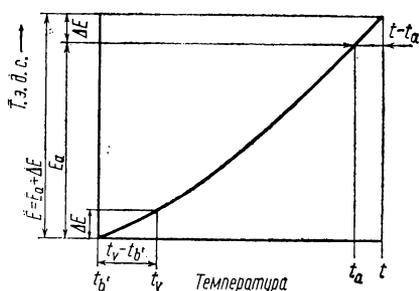


Рис. 3.47. Определение температуры объекта при отклонении температуры свободных концов термопары  $t_{b'}$  от опорной  $t_{b'}$ :  $t$  — действительная температура;  $t_a$  — измеренная температура;  $E_a$  — измеренная т. э. д. с.;  $E$  — действительная т. э. д. с. при температуре  $t_a$

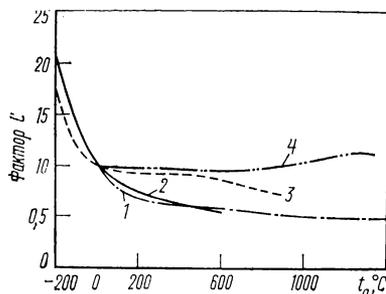


Рис. 3.48. Корректирующий фактор  $C$  для различных термопар в зависимости от измеренной температуры  $t_a$  при опорной температуре  $t_{b'} = t_b = 0^\circ\text{C}$  1 — PtRh10—Pt; 2 — медь—константан; 3 — железо—константан; 4 — хромель—алюмель

что приблизительно выполняется для термопары хромель — алюмель. У термопары PtRh30 — PtRh6 т. э. д. с. от 0 до  $70^\circ\text{C}$  изменяется не более чем на 0,01 мВ (см. рис. 3.26), поэтому при температуре свободных концов, лежащей в этих пределах, коэффициент коррекции практически равен нулю. Измеренная температура независимо от изменения температуры свободных концов всегда достаточно точно соответствует температуре рабочего спая термопары.

### 3.2.1.6.2. Компенсационные провода (материал, конструкция и погрешности измерения)

Если термоэлектроды подключены непосредственно к измерительному прибору (рис. 3.49, а), клеммы которого имеют равную и известную температуру, то они образуют свободные концы термопары. При измерении т. э. д. с. или температуры необходимо учитывать в соответствии с (3.23) или (3.24) температуру свободных концов. Если свободные концы термопары очень удалены от рабочего спая, то при измерении т. э. д. с. целесообразно использовать компенсационный метод измерения (см. 4.1.1.1), а короткие термоэлектроды удлинять соответствующими компенсационными (удлинительными) проводами до термостатированного объема с известной температурой. Далее для соединения с измерительным или регулирующим прибором можно использовать обычные провода.

У применяемых в промышленности термоэлектрических термометров термоэлектроды тянутся от рабочего спая до соединительной колодки в головке термометра.

При измерении высоких температур температура головки может доходить до 200°С. Для того чтобы на результаты измерений не влияли величина и частые колебания температуры головки термометра, используют компенсационные провода, которые ведут от головки к объему с известной, лучше с постоянной, температурой (рис. 3.49, б). В этом объеме допустимы колебания температуры от 0 до 50°С, если их влияние устраняется с помощью компенсаторов напряжения (см. 3.2.1.6.3).

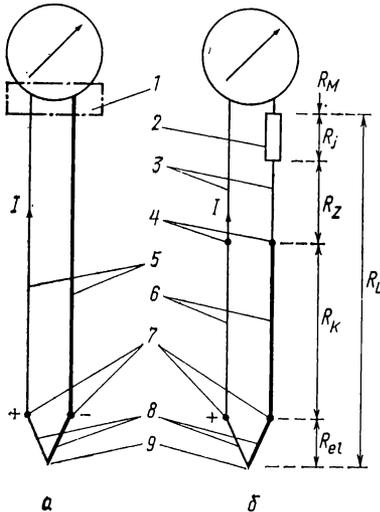


Рис. 3.49. Схемы включения термопар:

**а** — непосредственно к измерительному прибору; **б** — через компенсационные и соединительные провода; 1, 2 — свободные концы термопары; 3 — соединительные провода; 4 — термостатируемый объем (свободные концы термопары); 5 — термоэлектроды; 6 — компенсационные провода; 7 — соединительная колодка; 8 — термопара; 9 — рабочий спай термопары

**Материалы и метрологические требования.** Для термопар из благородных металлов, таких как железо — константан и хромель — алюмель, используют компенсационные провода из аналогичных сплавов, однако с возможно более низким сопротивлением. Компенсационные провода для термопар из благородных металлов, а также часто и для хромель-алюмелевых термопар изготавливают из специальных сплавов. Эти сплавы должны давать т. э. д. с. и допустимые отклонения той же величины, что и термоэлектроды в пределах значений температуры примерно от 0 до 200°С (ДИН 43173). Для этого состав сплавов для компенсационных проводов выбирают таким образом, чтобы каждый из двух проводов не давал т. э. д. с. с соответствующим термоэлектродом (например, компенсационный провод из меди с 0,1% Ni не дает при 100°С т. э. д. с. с PtRh10, а из меди с 1% никеля — с чистой платиной). Можно также использовать сплавы, которые развивают точно такую же т. э. д. с., что и термопара, хотя между каждым из компенсационных проводов и соответствующим термоэлектродом существует разность т. э. д. с. Например, т. э. д. с. NiCr — Ni при 200°С равна т. э. д. с. компенсационных проводов из Fe — Cu = 18% Ni, а именно 8,14 мВ. Соответствующий термоэлектроду NiCr компенсационный провод из железа, а также термоэлектроду Ni компенсационный провод из меди с 18% Ni дают по отношению к ним т. э. д. с. —2,14 мВ. В этом случае оба места соединения термопары с компенсационными проводами (в общем случае обе клеммы соединительной колодки) должны иметь одинаковую температуру, чтобы возникающие в этих местах т. э. д. с. взаимно компенсировались. В каждом случае следует применять только специальные компенсационные провода, поставляемые одним изготовителем, так как их состав может различаться. Эти провода имеют наименования SoNiCr, SoNi, SoPtRh и SoPt.

Сведения о составе компенсационных проводов, температурных диапазонах применения и допустимых отклонениях даны в табл. 3.10. Для термопар медь — константан в США и Франции допускаются большие отклонения, чем по ДИН в ФРГ; для термопар PtRh — Pt, наоборот, большие отклонения.

**Виды технических компенсационных проводов.** Компенсационные провода по ДИН 43713 изготавливают в виде проволоки диаметром 1,38 мм или в виде многожильного провода с диаметром отдельной жилы 0,2 мм. Количество спле-

Т а б л и ц а 3.10

Состав, интервалы рабочих температур и допустимые отклонения компенсационных (удлинительных) проводов по стандартам ФРГ, США, Франции. Отклонения, указанные в скобках, относятся к специальному исполнению

Термопара	Компенсационные провода	Диапазон рабочих температур, °С (а) и допустимое отклонение, °С (б) по					
		ДИН 43713		ISA		NF	
		а	б	а	б	а	б
Cu—CuNi	Cu—CuNi	0—200	3,0	(—60)—(—93)	0,85 (0,42)	(—20)—100	1,0
Fe—CuNi	Fe—CuNi	0—200	3,0	0—220	2,2 (1,1)	0—100	3,0
NiCr—Ni	NiCr—Ni SoNiCr—SoNi а) Fe—CuNi <sup>1</sup> б) Cu—CuNi	— 0—200 0—100 —	— 3,0 — —	(—18)—220 24—204 24—93 —	3,5 (2,2) 3,5 3,5 —	0—200 0—200 0—80 —	3,0 3,0 3,0 —
PtRh10—Pt	SoPtRh—SoPt а) CuNi—CuNi <sup>2</sup> б) Cu—CuNi	— 0—200 0—100	— 3,0 3,0	— 24—104 —	— ~6 при 200°С —	— 0—100 —	— ~7 при 100°С —

Примечание. Отклонения, указанные в скобках, относятся к специальному исполнению.

<sup>1</sup> В зависимости от диапазона температур состав CuNi разный.

<sup>2</sup> Состав CuNi разный для положительного и отрицательного проводов.

тентных жил выбирают так, чтобы сопротивление 1 м многожильного провода было равно сопротивлению проволоки с номинальным диаметром 1,38 мм. Конструкция компенсационных проводов определяется условиями эксплуатации. Для температур от  $-10$  до  $70^{\circ}\text{C}$  провода покрывают изоляцией из термопластичных пластмасс, для температур от  $-40$  до  $190^{\circ}\text{C}$  — из термостойких пластмасс. Одножильный компенсационный провод может быть дополнительно снабжен стеклянной или асбестовой оплеткой (рис. 3.50, а). Двух- или четырехжильные компенсационные кабели со свитыми проводами или жилами имеют оболочку из пластмассы (рис. 3.50, б). Для эксплуатации в сухих горячих помещениях оба изолированных компенсационных провода дополнительно покрывают стекловолоконной оплеткой. Затем такие или просто изолированные провода обматывают двойной шелковой обмоткой, оплеткой из стекловолокна или асбеста и оплеткой из стальной проволоки (рис. 3.50, в). Для влажных помещений используют кабель в свинцовой оболочке, который может быть дополнительно защищен стальной оплеткой (рис. 3.50, г). Такой кабель можно применять только до  $150^{\circ}\text{C}$ , так как из-за отсутствия доступа воздуха пластмасса деполимеризуется, в результате чего ее прочность и пластичность резко снижаются. Сопротивление изоляции компенсационных проводов должно составлять при  $20^{\circ}\text{C}$  минимум  $1\text{ МОм}$ , при  $70$  или  $200^{\circ}\text{C}$  для термопластичных и термостойких пластмасс — не менее  $10\text{ КОм}$ .

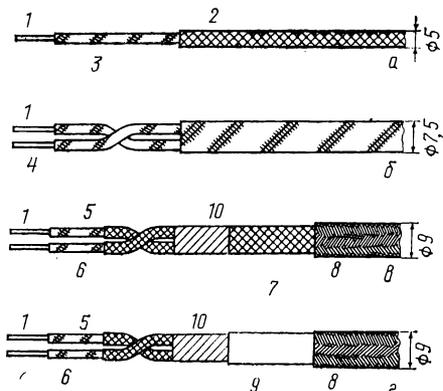


Рис. 3.50. Компенсационные провода для термоэлектрических термометров по ДИН 43714:

а — одножильный для открытой прокладки в сухих помещениях, изготавливается без оплетки; б — двухжильный, свитый из двух проволок или многопроволочных жил для прокладки в сухих и влажных помещениях; в — двухжильный из двух свитых проволок для прокладки в сухих горячих помещениях; г — двухжильный из двух свитых проволок для прокладки во влажных помещениях, изготавливается без стальной оплетки; 1 — проводник; 2 — оплетка из стекловолокна или асбеста; 3 — изоляционное покрытие из термостойкой пластмассы; 4 — изолирующие покрытия и оболочка из термопластичной пластмассы; 5 — оплетка из стекловолокна; 6 — изоляционное покрытие из термостойкой пластмассы; 7 — оплетка; 8 — оплетка из стальной проволоки; 9 — свинцовая оболочка; 10 — вторичная обмотка

ДИН 43714 красная или содержит красную нить. Компенсационные провода для самокомпенсирующейся измерительной цепи по VDE 0165 должны быть замаркированы светло-голубым цветом.

*Погрешность из-за несоответствия или неправильного подключения полюсов компенсационных проводов.* При подключении компенсационных проводов надо особенно внимательно следить за тем, чтобы компенсационные провода соответствовали данному типу термопары, а полярность их подключения была правильной, так как в противном случае в результате измерения может быть внесена повышенная погрешность [3.71, 3.72]. Компенсационные провода маркируют теми же цветовыми обозначениями, что и соответствующие термоэлектроды. В США, например, в отличие от ДИН 43710 красным цветом маркируют отрицательный термоэлектрод.

*Погрешность из-за неправильной полярности:*

1) компенсационный провод подключен с обратной полярностью в одном месте (на свободных концах или в головке термопары). Тогда

указатель измерительного прибора отклоняется в обратном направлении;

2) компенсационный провод подключен с обратной полярностью и в головке и на свободных концах. Погрешность в градусах в этом случае будет равна

$$f = -2(E_{kA} - E_{vA}) \frac{1}{\Delta E/\Delta t}, \quad (3.26)$$

где  $E$  — т. э. д. с. при опорной температуре  $t_b$ ;  $E_m$  — измеренная т. э. д. с. при температуре рабочего спая  $t$ ;  $E_{kA}$ ,  $E_{vA}$  — т. э. д. с. компенсационного провода при температуре головки термометра  $t_k$  и температуре свободных концов  $t_v$  соответственно;  $\Delta E/\Delta t$  — изменение т. э. д. с. при изменении температуры рабочего спая термопары при температуре  $t$ .

Пример 1. Термопара PtRh10 — Pt.

$$t_b = t_b = 0^\circ\text{C};$$

$$t = 1200^\circ\text{C}; E_m = 11,935 \text{ мВ};$$

$$t_k = 90^\circ\text{C}; E_{kA} = 0,571 \text{ мВ};$$

$$t_v = 30^\circ\text{C}; E_{vA} = 0,173 \text{ мВ};$$

$$\Delta E/\Delta t = 0,012 \text{ мВ/К}.$$

Погрешность по (3.26)  $f = -2(0,571 - 0,173) 1/0,012 = -66,4 \text{ К}$ .

Погрешность  $f$  вдвое больше той погрешности, которая получилась бы без компенсационных проводов при непосредственном подключении медных проводов к головке термометра.

Погрешность из-за неправильного выбора компенсационных проводов:

1. При правильной полярности подключения погрешность равна:

$$f = [(E'_{kA} - E'_{vA}) - (E_{kA} - E_{vA})] \frac{1}{\Delta E/\Delta t}, \quad (3.27)$$

где  $E'_{kA}$  и  $E'_{vA}$  — т. э. д. с. несоответствующих компенсационных проводов при температурах  $t_k$  и  $t_v$ .

Пример 2. Термопара и числовые данные те же, что в примере 1. При подключении компенсационного провода железо — константан, для которого  $E'_{kA} = 4,82 \text{ мВ}$  при  $t_k = 90^\circ\text{C}$  и  $E'_{vA} = 1,58 \text{ мВ}$  при  $t_v = 30^\circ\text{C}$ , погрешность равна

$$f = [(4,82 - 1,58) + (0,571 - 0,172)] 1/0,012 = 237 \text{ К}.$$

2. При неправильном подключении полюсов и в головке, и на свободных концах получается погрешность

$$f = -[(E'_{kA} - E'_{vA}) + (E_{kA} - E_{vA})] \frac{1}{\Delta E/\Delta t}. \quad (3.28)$$

Пример 3. При числовых данных примера 2 погрешность составляет

$$f = -[(4,82 - 1,58) + (0,571 - 0,172)] 1/0,012 = -303 \text{ К}.$$

Таким образом, из-за неправильного выбора компенсационных проводов погрешность может быть очень большой.

Погрешность из-за различных т. э. д. с. компенсационных проводов и термопары в головке термометра.

Эта погрешность составляет

$$f = (E_{kA} - E_{kTh}) (t - t_b) \frac{1}{E_m}, \quad (3.29)$$

где  $E_{kTh}$  — т. э. д. с. термопары при температуре головки термометра  $t_k$ ;  $E_{kA}$  — т. э. д. с. компенсационных проводов при температуре  $t_k$ ;  $E_m$  — измеренная т. э. д. с. при температуре рабочего спая  $t$ ;  $t_b$  — опорная температура.

Наибольшая погрешность измерения получается в том случае, когда компенсационные провода и термопара в головке термометра имеют максимально

допустимые отклонения по ДИН 43710 (см. табл. 3.5) в противоположных направлениях.

Если  $E_{kA}$  или  $E_{kTh}$  при  $t_k = 100^\circ\text{C}$  — напряжения, которые по таблицам основных величин соответствуют  $100^\circ\text{C} \pm 3\text{K}$  (опорная температура  $t_b, t = 0^\circ\text{C}$ ), то для термопары железо — константан с подключенными соответствующими компенсационными проводами не всегда можно пренебречь возникающей погрешностью для различных температур  $t$ :

$t, ^\circ\text{C}$	100	200	400	600	800
$f, \pm\text{K}$	6,14	6,02	5,97	5,88	5,71

Для того чтобы рассчитать погрешность по уравнению (3.29), нужно из характеристик температуры — т. э. д. с. для используемых термометра и компенсационных проводов определить значения т. э. д. с.  $E_m, E_{kTh}$  и  $E_{kA}$ . Если по этим характеристикам термопара и компенсационные провода при температуре головки термометра  $t_k$  имеют одинаковую величину т. э. д. с., то погрешности не возникает.

### 3.2.1.6.3. Компенсация влияния температуры свободных концов термопары

*Компенсация при кратковременных измерениях.* Чтобы устранить влияние температуры свободных концов на результаты измерения [3.73], можно с помощью регулируемого эксцентрика установить начальное положение указателя измерительного прибора, соединенного с термопарой, в выключенном состоянии на известную температуру окружающей среды. Таким образом, влияние температуры свободных концов точно корректируется с помощью магнитоэлектрического измерительного прибора, так как отклонение его указателя изменяется линейно с температурой.

В переносных приборах для измерения температуры температуры свободных концов можно учитывать с помощью встроенного в прибор биметаллического термометра. Такие приборы изготавливают с переключением на несколько диапазонов, например  $(-100) - 50^\circ\text{C}$ ,  $0 - 150^\circ\text{C}$  и  $0 - 450^\circ\text{C}$ .

Переключатель диапазонов включает при этом соответствующее сопротивление (рис. 3.51). Термометр соединен с клеммами прибора с помощью компенсационных проводов. Поскольку разность температур между клеммами приводит к погрешности, они должны быть закрыты при измерении.

Целесообразно подводить компенсационные провода непосредственно к измерительной схеме показывающего прибора.

При точных измерениях в лабораториях и на производстве температуру свободных концов поддерживают постоянной. Оба термоэлектрода термопары или компенсационные провода соединены с медными проводниками, которые ведут к измерительному прибору (рис. 3.52, а).

При контрольных измерениях для стабилизации температуры свободных концов термопары служит тающий лед (смесь воды со льдом) в сосуде Дьюара (см. 5.3). Если сосуд наполнен водой или маслом, температура свободных концов должна быть измерена с помощью ртутного термометра и ее влияние учтено в соответствии с формулами (3.23) или (3.24). При этом во избежание возникновения погрешности из-за шунтирования или возникновения гальванических пар проводники, погруженные в воду или лед, должны быть хорошо изолированы. При очень точных измерениях и прежде всего при проверке термопар для установления температуры свободных концов используют тройную точку воды (см. 5.3).

Если в сосуд Дьюара или в другой термостат вводят вспомогательный термоэлектрический термометр, один из термоэлектродов которого соединен с термоэлектродом или компенсационным проводом той же полярности основного термоэлектрического термометра (см. рис. 3.52, б), то в термостат вместо четырех нужно вводить только два провода. Места соединения должны иметь одинаковую темпе-

ратуру, которая может, однако, изменяться вместе с температурой окружающей среды. Такую схему соединения для устройств поддержания постоянной температуры используют чаще всего в тех случаях, когда большое число термопар должно иметь общие свободные концы.

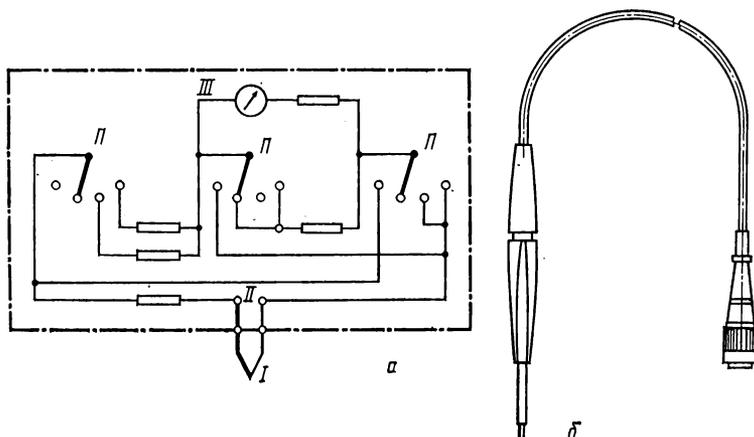


Рис. 3.51. Схема переносного прибора для измерения температуры термоэлектрическим термометром (а) и сам термометр с компенсационными проводами и разъемом (б): I — термопара; II — свободные концы термопары; III — измерительный прибор; П — переключатель измерительного моста

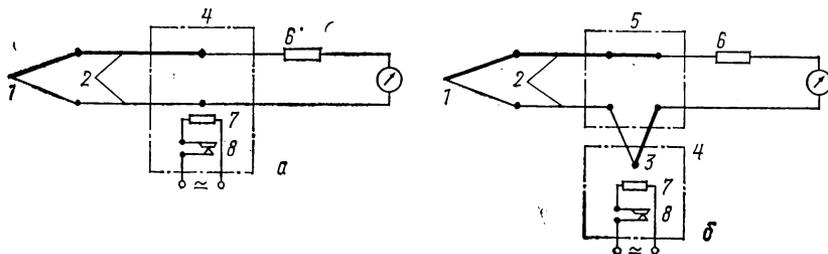


Рис. 3.52. Схемы поддержания постоянной температуры свободных концов термопары: а — свободные концы одной или нескольких термопар или компенсационных проводов и соединительных проводов помещены в объем с постоянной температурой (на каждую термопару приходится 4 ввода в термостат); б — одна или несколько вспомогательных термопар поддерживаются при постоянной температуре, соединительные провода — при любой, но одинаковой температуре; 1 — термопара; 2 — компенсационные провода; 3 — вспомогательная термопара; 4 — термостатированный объем с опорной температурой; 5 — то же, с любой температурой; 6 — подстроечное сопротивление; 7 — нагреватель; 8 — биметаллический терморегулятор

**Компенсация при длительных технических измерениях.** Влияние непостоянства температуры свободных концов можно существенно уменьшить, если свободные концы поместить под землю. На глубине 4 м температура в течение года колеблется в пределах 4 К. Свободные концы должны быть хорошо защищены от воздействия влаги.

Влияние непостоянства температуры свободных концов можно непрерывно корректировать с помощью термобиметаллического элемента, который механически изменяет положение нуля измерительного прибора. При использовании такой схемы коррекции термоэлектроды или компенсационные провода следует подводить непосредственно к измерительному прибору. В зависимости от конструкции устройства погрешность можно считать равной 1—3 К.

**Термостаты.** Для измерений в промышленных установках для поддержания постоянной температуры свободных концов термопар служат термостаты, в которых может быть установлен  $0^{\circ}\text{C}$  или любая другая температура, предпочтительнее  $50^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 0,05\text{--}1\text{ K}$  в зависимости от конструкции. Термостаты используют также для подключения термоэлектродных проводов от нескольких термопар или несколько пар компенсационных проводов по схеме рис. 3.52. При соединении по схеме рис. 3.52, б для каждого типа подсоединяемой термопары предусмотрена соответствующая вспомогательная термопара. В этом случае через переключатель можно соединить большое число термопар различных типов. При такой схеме уменьшается (по сравнению со схемой 3.52, а) погрешность

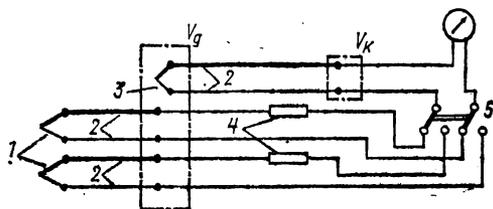


Рис. 3.53. Подключение нескольких термоэлектрических термометров к одному измерительному прибору через переключатель с общими компенсационными проводами от термостатированного объема  $V_g$ , вспомогательной термопарой к термостатированному объему  $V_k$ : 1 — термопара; 2 — компенсационные провода; 3 — вспомогательная термопара; 4 — подстроечное сопротивление; 5 — переключатель свободных концов термопар

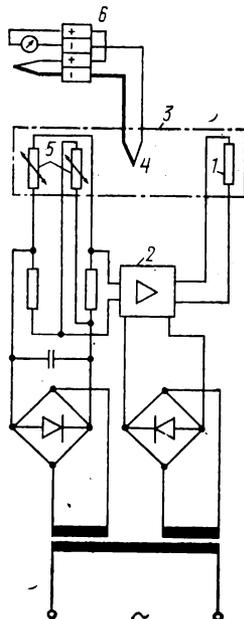


Рис. 3.54. Термостат для свободных концов термопары, регулируемый с помощью терморезистора:

1 — нагреватель; 2 — блок регулирования; 3 — металлический блок-термостат; 4 — вспомогательные термопары (до 24 шт.); 5 — терморезистор; 6 — соединительная колодка (до 24 термометров)

из-за теплоотвода из термостата через компенсационные или соединительные провода, так как через вспомогательную термопару из тонких термоэлектродов отводится относительно мало тепла.

Если несколько термометров должно быть подключено через переключатель свободных концов к общему измерительному прибору, то можно отказаться от длинных компенсационных проводов и провести от головки термометра более короткие компенсационные провода до термостатированного объема с любой, но постоянной температурой  $V_g$  (рис. 3.53). От вспомогательной термопары к термостатирующему устройству также можно провести одну пару компенсационных проводов. Для остальных соединений можно использовать медные провода.

В термостатах, поддерживающих  $50^{\circ}\text{C}$  (иногда  $60^{\circ}\text{C}$ ), регулирование температуры осуществляется с помощью двух терморезисторов, соединенных по мостовой схеме (рис. 3.54). Напряжение с диагонали моста передается на транзисторный пропорциональный регулятор. Выходной ток регулятора через нагревательный элемент поддерживает температуру металлического блока постоянной, например  $50 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от числа подключаемых термопар изготавливают термостаты на 6, 12 или 24 вспомогательные термопары. Регулируемая температура почти не зависит от температуры окружающей среды. При изменении последней на  $10^{\circ}\text{C}$  температура в термостате изменяется только на  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Допустимая температура окружающей среды до  $40^{\circ}\text{C}$ .

Для поддержания температуры  $\cdot 0^{\circ}\text{C}$  используют холодильники Пельтье [3.74]. В охлажденный теплоизолированный металлический блок можно поместить до 12 термопар или вспомогательных термометров. Используемый для терморегулирования терморезистор, заключенный в металлический блок, является плечом измерительного моста. Напряжение с диагонали моста усиливается дифференциальным усилителем, который в свою очередь управляет усилителем постоянного тока так, что сила тока в холодильнике Пельтье изменяется пропорционально отклонению температуры блока от заданной. При колебаниях напряжения в сети от 160 до 220 В и окружающей температуры от 10 до  $30^{\circ}\text{C}$  достигается постоянство температуры с точностью  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . Разность температур между отдельными гнездами для термопар не превышает  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ .

У термостатов с двумя нормальными термометрами и блоком элементов Пельтье, служащих для нагрева и охлаждения, временная и пространственная нестабильность температуры менее 0,01 К. Эти термостаты используют для проверки нормальных элементов Вестона [3.74в].

В других конструкциях термостатов с холодильником Пельтье для регулирования используются объемные изменения при превращении воды в лед. С помощью сильфонного чувствительного элемента включается или выключается ток, питающий элементы Пельтье. Колебания температуры при таком регулировании составляют  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  [3.75, 3.76].

Используя монокристалл двуокиси ванадия, можно изготовить простой стабилизатор для температур от  $-30$  до  $60^{\circ}\text{C}$  с нестабильностью  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ , который может служить эталоном температуры. Двуокись ванадия является полупроводником, сопротивление которого при  $65,5^{\circ}\text{C}$  изменяется почти в  $10^6$  раз. Ниже этой температуры двуокись ванадия представляет собой полупроводник и имеет высокое сопротивление, выше обладает металлической проводимостью и малым сопротивлением. С помощью простой транзисторной схемы этот скачок сопротивления используют для стабилизации температуры [3.77].

*Компенсация напряжением.* Влияние непостоянной температуры свободных концов можно устранить путем компенсации напряжением с помощью соответствующей схемы. По уравнению (3.23) (см. рис. 3.47) при отклонении температуры свободных концов  $t_v$  от опорной  $t_b$ , измеряемому т. э. д. с.  $E_a$  нужно изменить на величину  $\Delta E$ , пропорциональную  $t_v - t_b$ , чтобы получить т. э. д. с.  $E$ , соответствующую температуре  $t$ . Это добавочное напряжение, снимаемое с включенной в измерительную цепь мостовой схемы с одним или двумя терморезисторами, компенсирует влияние колебаний температуры свободных концов термопары на показания термометра.

При измерении температуры термоэлектрическим термометром в комплекте со стрелочным измерительным прибором, измеряющим т. э. д. с. термопары непосредственно или через измерительный преобразователь, используют компенсацию напряжением (компенсационный блок на рис. 3.55). Мостовая схема, питаемая через полупроводниковый выпрямитель, рассчитана так, что при опорной температуре  $20^{\circ}\text{C}$  добавочного напряжения не возникает, однако при отклонении  $t_v$  от  $t_b$ , (от 0 до  $60^{\circ}\text{C}$ ) напряжение на диагонали моста по величине и знаку компенсирует изменение т. э. д. с. В скомпенсированном состоянии сопротивления моста по величине равны друг другу и малы по сравнению с общим сопротивлением цепи (0,7 Ом). Величина температурнозависимых сопротивлений  $R$  из меди или никеля рассчитывается приблизительно из условия что  $\Delta R = 4\Delta E/I$ , где  $\Delta R$  — изменение сопротивления между  $t_v$  и  $t_b$ , например между  $20^{\circ}\text{C}$  и произвольно выбранной температурой  $40^{\circ}\text{C}$ . Ток моста  $I$  рассчитывается из величины требуемого для этой температуры добавочного напряжения. Чтобы компенсатор напряжения можно было применять для различных термопар, предусмотрено несколько вариантов подключения моста через дополнительные сопротивления. Если в два противоположных плеча моста включено по одному терморезистору, то в соответствии с  $\Delta R = 2\Delta E/I$  можно уменьшить вдвое сопротивление или ток моста.

Неправильное подключение полюсов термопары или компенсационных проводов к компенсатору напряжения приведет к возникновению погрешности в измерении. Чтобы выявить неправильное подключение полюсов, надо слегка подо-

греть компенсатор, включенный в измерительную цепь. При неправильном подключении полюсов показания прибора изменяются.

При расчете параметров схемы компенсатора влияние температуры свободных концов точно компенсируют только для температур  $t_b$ , и  $t_v$ , для которых рассчитан мост [3.78]. При всех других температурах свободных концов возникает погрешность, которая зависит от типа термопары и материала терморезистора (рис. 3.56). В некоторых случаях погрешность измерения должна быть умножена на коэффициент коррекции  $C$  (см. рис. 3.48).

Кроме этих погрешностей, следует обратить внимание на то, что при номинальном токе питания моста допуск на компенсацию составляет около  $\pm 1^\circ \text{C}$ .

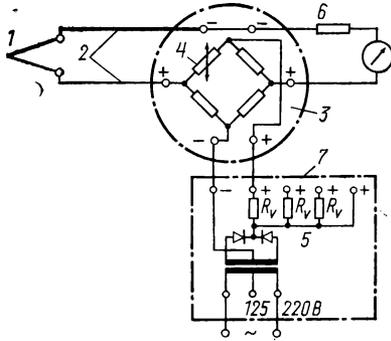


Рис. 3.55. Схема компенсатора напряжения (компенсационный блок): 1 — термопара; 2 — компенсационные провода; 3 — термостатированный объем с любой температурой от 0 до  $60^\circ \text{C}$ ; 4 — терморезистор; 5 — сопротивление для установки рабочего тока моста при подключении термопар разных типов; 6 — подстроечное сопротивление; 7 — выпрямитель

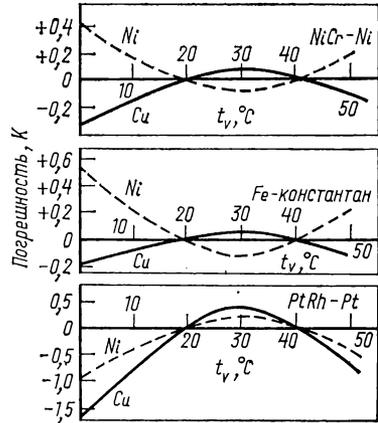


Рис. 3.56. Погрешность компенсации для термопар разных типов при использовании медного или никелевого терморезисторов [3.73]

При колебаниях напряжения сетевого выпрямителя на  $\pm a\%$  возникает дополнительная погрешность,  $^\circ \text{C}$ :

$$f = \pm \frac{a}{100} C (t_v - t_b), \quad (3.30)$$

где  $C$  — коэффициент коррекции (см. рис. 3.48).

Для хромель-алюмелевой термопары при колебаниях напряжения на  $\pm 10\%$  и при  $t_b = 20^\circ \text{C}$ ,  $t_v = 40^\circ \text{C}$  для всех температур погрешность составляет  $+2 \text{ K}$ , так как  $C = 1$ . При высоких требованиях к точности ток моста  $I$  должен поддерживаться постоянным.

Если к общему измерительному прибору нужно поочередно подключить несколько термопар, то можно, аналогично измерению со вспомогательной термопарой и общим термостатом (см. рис. 3.53), сократить длину компенсационных проводов, если компенсатор напряжения поместить в термостатированный объем с любой, но постоянной температурой (рис. 3.57).

**Самоуравновешивающиеся (компенсационные) приборы.** При измерении температуры с помощью самоуравновешивающихся (компенсационных) приборов (см. 4.1.1.2.1) не нужен компенсатор напряжения, так как эти приборы уже имеют стабильный вспомогательный источник тока. Один или два термочувствительных резистора из меди или никеля включены в мостовую схему согласно рис. 4.5. Как и в компенсаторах напряжения, сопротивление медного или никелевого резистора зависит только от отношения добавочной э. д. с.  $\Delta E$ , требующейся для подключаемой термопары, к величине тока моста. Так как уравнивать сопротивление медных или никелевых резисторов труднее, чем марганциновых, рассчиты-

вают так, что сопротивление медных или никелевых резисторов остается одним и тем же независимо от типа подключаемой термопары. Согласование с заданным диапазоном измерения и подключаемой термопарой осуществляется путем подключения соответствующего манганинового резистора. Ток в плечах моста  $R_3$  и  $R_4$  (медных или никелевых резисторах) определяется величиной, требуемой для данной термопары добавочной э. д. с.  $\Delta E$ . При этом если отношение токов в нижней и верхней ветвях моста не изменится с температурой, сопротивления левой половины моста с медным резистором становятся малыми по сравнению с сопротивлениями правой половины, в которых течет тот же ток.

Термочувствительный резистор должен быть расположен в термостатированном объеме с любой, но постоянной температурой. Его помещают в клеммную коробку самоуравновешивающегося измерительного прибора, к которой подводят компенсационные провода. Если к прибору нужно подсоединить через переключатель большое число термопар, то целесообразно, по аналогии с рис. 3.53, проложить компенсационные провода только до термостатированного объема с постоянной температурой  $V_g$ . В этом объеме не обязательно поддерживать строго постоянную температуру, так как ее колебания будут уравновешиваться компенсационным мостом.

О температурной корректировке т. э. д. с. при измерениях температуры пирометрами излучения с термобатареями см. 9.5.3.

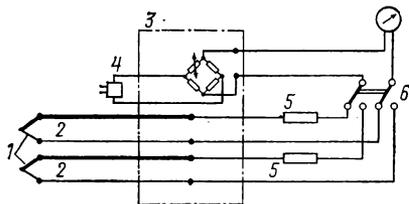


Рис. 3.57. Подключение нескольких термопар через переключатель к одному измерительному прибору с использованием схемы компенсации: 1 — термопары; 2 — компенсационные провода; 3 — термостатированный объем с любой температурой и компенсатором напряжения; 4 — выпрямитель; 5 — подстроечное сопротивление; 6 — переключатель

### 3.2.1.7. УЧЕТ И КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Т. э. д. с. измеряют гальванометрическим или компенсационным методами. Для получения ограниченного безнулевого диапазона измерения используют метод частичной компенсации в сочетании с гальванометрическим. В некоторых случаях гальванометр включают через измерительный преобразователь (усилитель). О применяемых для этого измерительных приборах и усилителях, допустимых диапазонах измерения и величинах сопротивления соединительных проводов для снижения погрешностей измерения см. 4.1.

#### 3.2.1.7.1. Метод гальванометра

Как показано на рис. 3.49, т. э. д. с. можно измерять без вспомогательного источника тока непосредственно электроизмерительными приборами, предпочтительно магнитоэлектрического типа. Вследствие протекания тока  $I$  через измерительный прибор напряжение на его клеммах  $E_1$  несколько меньше, чем измеряемая т. э. д. с.  $E$ .

При сопротивлении гальванометра  $R_1$  и сопротивлении внешней цепи  $R_L$  получаем

$$I = \frac{E}{R_1 + R_L} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{E - E_1}{R_L} \quad \text{и} \quad E_1 = \frac{ER_1}{R_1 + R_L} = E - IR_L. \quad (3.31)$$

Сопротивление внешней цепи складывается из сопротивлений термопары  $R_{EL}$ , компенсационных проводов  $R_k$ , соединительных проводов  $R_Z$  и подстроечного сопротивления  $R_j$  (см. рис. 3.49). В сопротивление внешней цепи может входить также сопротивление вспомогательной термопары, включенной в изме-

Таблица 3.11

Расчет сопротивления  $R_L$  длины  $l$  термометрической проволоки, терморезистора и компенсационных проводов, а также максимально допустимые температуры длительной эксплуатации в чистом воздухе в зависимости от сечения проволоки и температуры по ДИН 43712

Материал	Удельное электросопротивление $\rho$ при 20°С, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Диаметр $d$ , мм	Сечение $S$ , мм <sup>2</sup>	Сопротивление 1 м при 20°С, Ом	Температурный коэффициент от 20 до 200°С	$R_t/R_{20}^*$ при $t$ , °С						Максимальная температура длительной эксплуатации, °С			
						100	200	400	600	800	1000		1200	1400	1600
Cu	0,017	0,50	0,196	0,0890	—	1,330	1,73	2,55	3,37	—	—	—	—	400	
		1,38	1,500	0,1130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Fe	0,113 (0,11—0,13)	1,00	0,785	0,1500	—	1,600	2,18	4,05	6,76	10,39	—	—	—	—	600
		1,38	1,50	0,0730	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		3,00	7,069	0,0165	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	700
CuNi константан	0,49 (0,48—0,50)	0,50	0,196	2,5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	400
		1,00	0,785	0,6200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		1,38	1,50	0,3270	—	1,000	1,00	1,00	1,03	1,06	—	—	—	—	600
		2,00	3,142	0,1600	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	700
3,00	7,069	0,0690	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	700		
NiCr	0,72 (0,70—0,75)	1,38	1,50	0,4800	—	1,030	1,06	1,13	1,18	1,22	1,27	—	—	—	900
		3,00	7,069	0,1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000
Ni	0,28 (0,25—0,35)	1,38	1,50	0,2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	900
		3,00	7,069	0,0420	—	1,230	1,42	1,63	1,82	2,00	2,17	—	—	—	1000
Pt	0,106	0,35	0,096	1,1100	—	1,290	1,65	2,31	2,97	3,56	4,06	4,52	4,91	5,25	1400
		0,50	0,196	0,5400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

PtRh10	0,201	0,35 0,50	0,096 0,196	2,0900 1,0200	—	1,150	1,33	1,59	1,97	2,18	2,39	2,60	2,82	3,03	1300
PtRh13	0,194	—	—	—	—	1,140	1,29	1,57	1,87	2,08	2,31	2,55	2,77	2,94	1400
PtRh6	0,170	—	—	—	—	1,150	1,35	1,77	2,17	2,41	2,64	2,88	3,12	3,35	1500
PtRh30	0,194	—	—	—	—	1,100	1,20	1,42	1,65	1,88	2,10	2,35	2,59	2,84	1500
PtRh5	0,169	—	—	—	—	1,150	1,35	1,75	2,08	2,40	2,71	2,97	—	—	1200
AuPd46Pt2 (палладий)	0,295	—	—	—	—	1,030	1,07	1,14	1,21	1,27	1,35	1,42	—	—	—
SoNiCr (ДИН)	0,11	1,38	1,50	0,0730	6,20	1,500	2,12	—	—	—	—	—	—	—	—
SoNi (D, V) (V)	0,50 0,25	1,38 —	1,50 —	0,3400 0,2000	0,30	1,024 1,024	1,05 —	—	—	—	—	—	—	—	—
SoPtRh10 (D) (V) (V)	0,035 0,026 0,017	— 1,38 —	— 1,50 —	0,0230 0,0170 0,0113	2,20 2,60 4,30	1,180 1,210 1,340	1,40 1,47 —	—	—	—	—	—	—	—	—
SoPt (D) (V) (V)	0,056 0,040 0,026	— 1,38 —	— 1,50 —	0,0410 0,0270 0,0173	1,35 1,70 2,60	1,100 1,140 1,210	1,24 1,31 —	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu—CuNi	0,507	—	—	—	—	1,010	1,02	1,05	1,11	—	—	—	—	—	—
Fe—CuNi	0,605	—	—	—	—	1,100	1,23	1,58	2,14	2,86	—	—	—	—	—
NiCr—Ni	1,00	—	—	—	—	1,080	1,16	1,27	1,35	1,44	1,52	—	—	—	—
PtRh10—Pt	0,307	—	—	—	—	1,190	1,41	1,84	2,31	2,66	2,97	3,26	3,52	3,78	—
SoNiCr—Ni (D, V) (V)	0,61 0,36	— —	— —	— —	— —	1,110 1,170	1,24 —	—	—	—	—	—	—	—	—
SoPtRh10—Pt (D) (V) (V)	0,091 0,066 0,043	— — —	— — —	— — —	— — —	1,130 1,170 —	1,30 1,37 1,250	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. D — изготовитель Degussa, V — изготовитель Vakuumschmelze.

\* Для всех материалов  $R_{20} = 1,0$ .

рительную цепь, или компенсатора напряжения. Величины этих отдельных сопротивлений зависят от их температуры. Кроме того, происходит изменение сопротивления термопары из-за уменьшения сечения термоэлектродов в результате окисления. Для уменьшения возникающей при этом погрешности сопротивление измерительного прибора  $R_1$  должно быть большим по сравнению с сопротивлением внешней цепи, по меньшей мере  $R_1 > 10R_L$ , а лучше, если  $R_1 > 100R_L$ .

При использовании низкоомного измерительного прибора мощность, отдаваемая термопарой, больше, чем при использовании высокоомного измерительного прибора. По сравнению с оптимальным согласованием ( $R_1 = R_L$ ) при  $R_1 = 10R_L$  мощность, отдаваемая термопарой, снижается до 33%, при  $R_1 = 100R_L$  — до 4%. Однако влияние сопротивления внешней цепи и его изменения значительно заметнее, чем при использовании высокоомного прибора.

Если т. э. д. с. отсчитывается по гальванометру и его шкала должна быть градуирована в единицах температуры (в °C), то градуировку измерительного прибора следует проводить при определенной заданной величине сопротивления внешней цепи, например 20 Ом (ДИН 43709). Действительное значение сопротивления внешней цепи должно быть приведено к заданному значению  $R_{Ls} = R_L + R_j$  путем включения в цепь подстроечного сопротивления  $R_j$  которое по схеме рис. 3.49, б включено в соединительный провод.

*Расчет сопротивления внешней цепи.* Величина сопротивления внешней цепи может быть рассчитана с помощью табл. 3.11, в которой приведены удельное сопротивление при 20°С, сопротивление одного погонного метра проволоки при 20°С и температурная зависимость  $R_1/R_{20}$  для распространенной термоэлектродной проволоки, для термопар, стандартизованных ДИН 43710 (см. также ДИН 43712), и компенсационных проводов (ДИН 43713). Данные для компенсационных проводов до 200 или до 100°С предоставлены фирмами Degussa и Heraeus. Кроме того, для различных диаметров термоэлектродной проволоки приведены по ДИН 43712 допустимые температуры при длительной эксплуатации на воздухе. Для обычных термопар и компенсационных проводов удельное сопротивление в зависимости от температуры и сопротивления погонного метра проволоки  $R$  (Ом/м) для любого диаметра и площади поперечного сечения проволоки можно определить по номограмме (рис. 3.58) [3.79, 3.80]. Зная удельное электросопротивление, по этой номограмме можно определить сопротивление погонного метра любой проволоки. Значения сопротивления представлены для средних значений температуры. В частности, для расчета сопротивления компенсационных проводов нельзя брать за основу температуру в месте их соединения с головкой термометра.

*Примеры определения сопротивления термоэлектродной проволоки, компенсационных и соединительных проводов при использовании номограммы 3.58.*

1. Медная проволока диаметром 1 мм при 400°С имеет удельное сопротивление  $\rho = 0,0534$  Ом·мм<sup>2</sup>/м и сопротивление погонного метра  $R = 0,054$  Ом/м.

2. Действительное значение сопротивления цепи  $R_L$ , состоящей из хромель-алюмелевой термопары с компенсационными проводами SoNiCr—Ni100 и медными соединительными проводами:

Проволока . . . . .	NiCr—Ni	SoNiCr—Ni100	Cu
Сечение, мм <sup>2</sup> . . . . .	1,5	1,5	1,5
Длина, м . . . . .	2	20	2×200
Средняя температура, °C	800	80	30
Удельное сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м . . . . .	0,06	0,4	0,01
Сопротивление $R$ , Ом . . . . .	1,92	8,20	2,20

Таким образом, общее сопротивление цепи  $R_L = 12,32$  Ом.

*Подстройка сопротивления измерительной цепи.* В технических термометрах подстройку сопротивления измерительной цепи лучше всего проводить в рабочем состоянии. Для этого измеряют омметром общее сопротивление цепи  $R_L = (R_{el} + R_k + R_z)$  и вводят подстроечный резистор  $R_j$  с сопротивлением  $R_{Ls} - R_L$ . Чтобы в измеренное значение  $R_L$  не внести погрешность за счет остаточной т. э. д. с., измерение проводят дважды с переменной полярностью и затем определяют среднее значение.

Благодаря малому сопротивлению термопар из благородных металлов достаточно провести подстройку сопротивления цепи в холодном состоянии термометра (при комнатной температуре). Если термометр с термопарой PtRh—Pt настроен при комнатной температуре, то в измеренные значения т. э. д. с. необ-

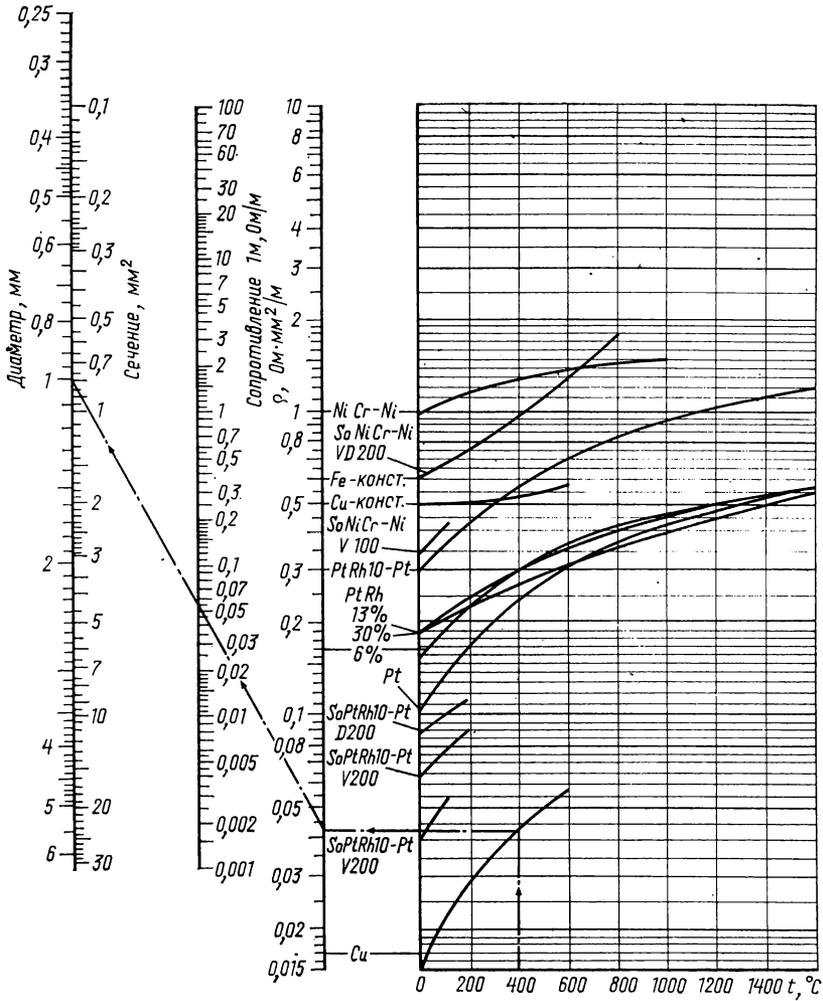


Рис. 3.58. Номограмма для определения сопротивления 1 м длины термопар, термоэлектродной проволоки, компенсационных проводов и меди (*D* — изготовитель De-gussa, *V* — Vakuumschmelze)

ходимо вносить поправку, так как сопротивление такой термопары при нагреве ее до высокой температуры может недопустимо сильно изменяться из-за относительно высокого по сравнению с термопарами из благородных металлов сопротивления и температурного коэффициента сопротивления [3.81]. Поскольку в большинстве случаев термопара не полностью вставлена в объем с измеряемой температурой, ее сопротивление зависит от отношения длины нагретой части тер-

модары  $l'$  к ее общей длине  $l$ . Тогда сопротивление термопары в условиях эксплуатации  $R_{el(B)}$  составляет

$$R_{el(B)} = R_{el(20)} \left[ 1 + \left( \frac{R_{el(t)}}{R_{el(20)}} - 1 \right) \frac{l'}{l} \right], \quad (3.32)$$

где  $R_{el(20)}$  — сопротивление термопары при 20°С. Величину  $R_{el(t)}/R_{el(20)}$  находят по табл. 3.11, как  $R_t/R_{20}$  термопары PtRh10—Pt для температуры  $t$ , соответствующей длине  $l'$ .

Измеренное при комнатной температуре сопротивление равно  $R_{L(20)} = R_t + R_k + R_{el(20)}$ . Отсюда величина подстроечного сопротивления  $R_j$  равна

$$R_j = R_{Ls} - R_{L(B)} = R_{Ls} - R_{L(20)} - R_{el(20)} \left[ \left( \frac{R_t}{R_{20}} - 1 \right) \frac{l'}{l} \right], \quad (3.33)$$

где  $R_{L(B)}$  — сопротивление внешней цепи в условиях эксплуатации. Величину сопротивления  $R_j$  можно найти из разности заданного значения сопротивления внешней цепи  $R_{Ls}$  и измеренного при комнатной температуре сопротивления  $R_{L(20)}$ , уменьшенной на поправку

$$R_{el(20)} \left[ \left( \frac{R_t}{R_{20}} - 1 \right) \frac{l_1}{l} \right].$$

При этом величина сопротивления  $R_{el(20)}$  должна быть измерена или рассчитана.

В табл. 3.12 приведены значения сопротивления стандартных PtRh10—Pt термопар диаметром 0,35 и 0,5 мм в зависимости от их длины (по ДИН 43732). Они справедливы для прямых термометров с номинальной длиной  $l_1$  в металлических или керамических чехлах (ДИН 43720 и ДИН 43724).

Т а б л и ц а 3.12

Сопротивление термопар, Ом,  
стандартных термометров при комнатной температуре

Диаметр проволоки, м	Длина термопары $l$ по ДИН 43732, мм						
	230 (180)	300 (250)	405 (335)	580 (500)	790 (710)	1080 (1000)	1480 (1400)
0,5	0,36	0,47	0,63	0,90	1,23	1,68	2,30
0,35	0,74	0,96	1,29	1,86	—	—	—

П р и м е ч а н и е. В скобках приведена номинальная длина  $l_1$ , мм, по ДИН 43733.

Из-за возможного изменения сопротивления термопары вследствие окисления подстройку следует производить не только при первой установке термопары, но и периодически в процессе эксплуатации.

Подстройку сопротивления измерительной цепи удобно проводить с помощью делителя напряжения [3.81] (применяют также для подстройки термометров сопротивления в двухпроводной схеме см. 3.2.2.3.). Если нужно провести измерение в холодном состоянии или после извлечения термометра из чехла, то при включенном заданном номинальном сопротивлении  $R_{Ls}$  (рис. 3.59) стрелку амперметра устанавливают в каком-то определенном положении. После переключения на измерительную цепь  $R_L$  подбирают  $R_j$  до установления стрелки амперметра в том же положении. Подобным же образом можно провести подстройку в условиях эксплуатации при помощи делителя напряжения с нуль-гальванометром

(рис. 3.60) или технического компенсатора (потенциометра). К делителю напряжения подключают с одной стороны измерительный прибор с заданным номинальным сопротивлением  $R_{Ls}$ , с другой — термометр с компенсационными и соединительными проводами ( $R_L$ ) и включенным последовательно нуль-гальванометром и подстроечным сопротивлением  $R_j$ . После установления нуль-гальванометра на нуль производят отсчет температуры. Затем термометр включается обычным образом и показание измерительного прибора с помощью изменения сопротивления  $R_j$  приводится к прежнему значению.

**Погрешность при неправильной подстройке.** При неправильной подстройке или изменении сопротивления измерительной цепи в процессе эксплуатации, например, из-за окисления термопары или из-за изменения температуры соеди-

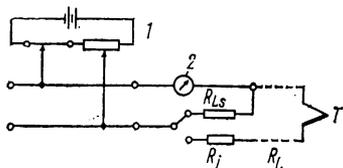


Рис. 3.59. Подстройка сопротивления термоэлектрического термометра с помощью делителя напряжения;  $R_{Ls}$  и  $R_L$  — номинальное и фактическое значения сопротивления цепи;  $R_j$  — подстроечное сопротивление; 1 — делитель напряжения; 2 — гальванометр (амперметр)

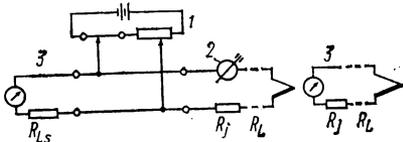


Рис. 3.60. Подстройка сопротивления термоэлектрического термометра в условиях эксплуатации с помощью делителя напряжения; 1 — делитель напряжения; 2 — нуль-гальванометр; 3 — измерительный прибор;  $R_{Ls}$  и  $R_L$  — номинальное и фактическое значения сопротивления цепи;  $R_j$  — подстроечное сопротивление

тельных проводов по сравнению с предшествующей подстройкой возникающая погрешность измерения температуры приблизительно равна (К)

$$f \approx \frac{R_{Ls} - R_{Lsf}}{R_1 + R_{Lsf}} (t - t_A), \quad (3.34)$$

где  $R_{Ls}$  — заданное номинальное сопротивление измерительной цепи;  $R_{Lsf}$  — неправильно установленное сопротивление измерительной цепи;  $R_1$  — сопротивление измерительного прибора;  $t$  — отсчитанная температура и  $t_A$  — температура начала шкалы измерительного прибора.

П р и м е р:

$$R_{Ls} = 20 \text{ Ом}, \quad R_{Lsf} = 19 \text{ Ом}, \quad R_1 = 40 \text{ Ом},$$

$$t = 600^\circ \text{С}, \quad t_A \approx 0^\circ \text{С},$$

$$f = \frac{20 - 19}{40 + 19} 600 = 10,3 \text{ К}.$$

Действительная температура равна  $589,7^\circ \text{С}$ .

**Погрешность из-за изменения сопротивления измерительного прибора.** Изменение температуры измерительного прибора также влияет на результаты измерения вследствие наличия зависимости сопротивления катушки гальванометра от ее температуры (см. 4.1). Чтобы уменьшить эту погрешность, к сопротивлению измерительной катушки  $R_w$ , температурная зависимость которого составляет примерно 4% на 10 К, подключают последовательно возможно большее, не зависящее от температуры сопротивление  $R_v$ , так что  $R_1 = R_w + R_v$ . Отношение  $R_1/R_w$  выбирают в зависимости от конструкции равным от 2 до 10. Тем самым уменьшается чувствительность прибора, однако температурная погрешность снижается до 0,4–2% на каждые 10 К изменения окружающей температуры. При

изменении окружающей температуры и температуры прибора на  $\pm \Delta t_u$  температурная погрешность  $f$  (К) равна

$$f \approx 0,004 \Delta t_u \frac{R_u}{R_1 + R_{Ls}} (t - t_A), \quad (3.35)$$

где  $t$  — измеренная температура;  $t_A$  — температура, соответствующая началу шкалы.

Если к измерительной катушке прибора подключить терморезистор (см. 3.2.2.1.2), сопротивление которого с температурой изменяется противоположно сопротивлению катушки, то сопротивление прибора  $R_1$  не будет зависеть от температуры. Чувствительность прибора при этом уменьшается незначительно. Из-за очень значительного изменения сопротивления терморезистора от температуры это постоянство  $R_1$  может быть достигнуто только в узком интервале температур, однако интервал может быть расширен путем подключения параллельно терморезистору добавочного сопротивления.

Величина температурной погрешности из-за влияния температуры окружающей среды на измерительный прибор зависит также от сопротивления внешней цепи  $R_{Ls}$ , которое следует учитывать как дополнительное сопротивление к сопротивлению измерительной катушки гальванометра.

*Максимально допустимое сопротивление измерительной цепи.* Максимально допустимое сопротивление измерительной цепи зависит от величины т. э. д. с.  $E$ , соответствующего ей тока  $I$  через измерительный прибор и допустимой погрешности, %:  $f = - [(E_1 - E)/E] 100$ .

Из уравнения (3.31) рассчитывают максимально допустимое сопротивление измерительной цепи:

$$R_{L \max} = Ef/I \cdot 100. \quad (3.36)$$

Чем больше т. э. д. с.  $E$  и чем меньше ток  $I$ , тем больше максимально допустимое значение сопротивления измерительной цепи при заданной величине погрешности.

Для того чтобы можно было поверять измерительный прибор, на шкале или на корпусе прибора по ДИН 43701 лист 3 должно быть нанесено сокращенное обозначение термопары (ДИН 43710) с номером ДИН. При использовании нестандартной термопары необходимо, чтобы в надписи было указано: тип термопары, значение т. э. д. с., соответствующее конечному делению шкалы, а у безнулевых приборов (например, для интервала 200—600°С) и значение т. э. д. с., соответствующее началу шкалы. Затем должно быть указано собственное сопротивление прибора, а также номинальное сопротивление измерительной цепи  $R_{Ls}$ . Кроме того, на приборе должна быть предписанная VDE<sup>1</sup> 0410 и 0170/71 надпись, указывающая класс прибора и влияние температуры на прибор.

*Включение нескольких измерительных приборов.* Если к одной термопаре должно быть подключено несколько измерительных приборов [3.80, 3.83], например если температуру надо показывать на табло и регистрировать самописцем, то при параллельном включении увеличивается токовая нагрузка на общий для двух приборов провод и одновременно увеличивается падение напряжения на участке от термопары до места разветвления. Величина тока, проходящего через первый прибор, снижается с  $I_1$  до  $I'_1$ , а через второй — с  $I_2$  до  $I'_2$ . При подключении второго прибора  $M_2$  к первому  $M_1$  получается погрешность для обоих приборов (в процентах от измеряемой величины):

$$f_1 = - \frac{100}{1 + R_{M_2}/R_{M_1} + R_{M_2}/R_x}$$

и

$$f_2 = \frac{R_{M_2}}{R_{M_1}} f_1. \quad (3.37)$$

<sup>1</sup> VDE — Союз немецких электротехников (ФРГ).

Если второй прибор подключен к клеммам первого, то  $R_M$  является сопротивлением прибора,  $R_x$  — действительное сопротивление цепи. Если же цепь разветвляется у свободных концов термопары или на клеммах в головке термометра, тогда часть сопротивления проводов от точки разветвления до измерительного прибора действует как добавочное сопротивление к прибору, в то время как  $R_x$  является сопротивлением проводов до разветвления (по рис. 3.49  $R_L = R_{el} + R_k + R_z + R_j$ ).

Пример:  $R_{M_1} = 762 \text{ Ом}$ ,  $R_{M_2} = 156 \text{ Ом}$ ,  $R_x = R_L = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_k = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_{el} = 0,5 \text{ Ом}$  и  $R_z + R_j = 14,5 \text{ Ом}$ . При ответвлении от клемм прибора  $f_1 = -11,1\%$  и  $f_2 = -2,27\%$ . При разветвлении на свободных концах термопары  $R_{M_1} = 762 + 14,5 \text{ Ом}$ ,  $R_{M_2} = 156 + 14,5 \text{ Ом}$ ,  $R_x = 5,5 \text{ Ом}$ ,  $f_1 = -3,1\%$  и  $f_2 = -0,68\%$ . При разветвлении на клеммах головки термометра  $R_{M_1} = 762 + 19,5 \text{ Ом}$ ,  $R_{M_2} = 156 + 19,5 \text{ Ом}$ ,  $R_x = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $f_1 = -0,285\%$ ,  $f_2 = -0,064\%$ .

Чем больше сопротивление одного прибора по сравнению с другим, тем больше погрешность первого прибора по сравнению со вторым. Погрешность при разветвлении на клеммах прибора, а также на свободных концах термопары может быть недопустимо большой.

Чтобы при подключении второго прибора не возникало погрешности, это надо предусмотреть еще при калибровке прибора. Для этого к постоянно включенному прибору подключают параллельное сопротивление, эквивалентное сопротивлению второго прибора. Можно также вместо этого в измерительную цепь включить сопротивление, которое отключается при включении второго прибора с таким же сопротивлением.

Так как при подключении второго гальванометра оба прибора должны быть тщательно сличены и в связи с необходимостью учитывать дополнительные погрешности из-за температурных изменений сопротивления цепи и приборов, следует по возможности избегать такого параллельного включения. Если нужно одновременно регистрировать температуру одного измеряемого объекта двумя приборами, например выводить показание на табло и на самописец, то лучше использовать двойные термометры. Такие термометры содержат две электрически изолированные термопары в одной измерительной вставке или в одном защитном чехле. Если надо использовать только один термометр, то можно к его выводам подключить измерительный преобразователь с токовым выходом. Тогда к выходу преобразователя можно присоединить несколько измерительных приборов, не опасаясь влияния на их показания такого рода вмешательства.

### 3.2.1.7.2. Компенсационный метод и измерительный усилитель

Согласно уравнениям (3.34) и (3.35) погрешность измерения методом гальванометра существенно зависит от величины диапазона измерения  $t - t_A$ . Так как температура начала шкалы  $t_A$  равна температуре свободных концов  $t_0$ , то при высокой температуре  $t$  получается большая, часто недопустимая погрешность измерения.

При более высоких требованиях к точности измерения т. э. д. с. измеряют преимущественно компенсационным методом (см. 4.1.1.2). В этом случае результаты измерения совершенно не зависят от величины и температурных изменений сопротивления цепи термопары. Поэтому подстройка сопротивления этой цепи не требуется. Кроме того, можно проводить измерения в значительно более узких диапазонах с произвольно выбранной температурой начала шкалы.

Если класс точности магнитоэлектрического прибора и определяемый им предел допустимой погрешности удовлетворяют целям измерения, но желателен более узкий диапазон измерения или если расстояние между местом установки термометра и измерительным прибором слишком велико, можно применять измерительные усилители или измерительные преобразователи (см. 4.1.1.2.3). Благодаря их высокому входному сопротивлению подстройка сопротивления цепи термопары почти всегда оказывается излишней.

### 3.2.1.7.3. Метод гальванометра с частичной компенсацией

При всех измерениях т. э. д. с. с помощью магнитоэлектрических приборов температура начала шкалы равна температуре свободных концов термопары  $t_0$ .

Так как погрешность измерения зависит от величины измеряемой т. э. д. с., то можно повысить точность измерения, если подавить часть т. э. д. с. (рис. 3.61). Например, если для термопары железо—константан надо ограничить диапазон измерения температурами 300—600°С или соответственно величинами т. э. д. с. 16,56—33,67 мВ, то на термопару должно быть подано постоянное компенсирующее напряжение  $E_k = 16,56$  мВ, чтобы напряжение на клеммах прибора, соответствующее началу шкалы, равнялось нулю.

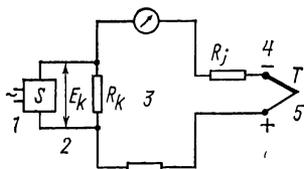


Рис. 3.61. Схема измерения т. э. д. с. методом частичной компенсации:

$S$  — стабилизатор тока;  $E_k$  — напряжение компенсации;  $R_k$  — компенсационное сопротивление;  $R_j$  — подстроечное сопротивление;  $T$  — термопара

Ток в схеме компенсации должен быть стабильным и равным заданному значению, так как при колебаниях тока или напряжения возникают пропорциональные им погрешности измерения. Эти погрешности тем больше, чем больше компенсирующее напряжение. Если, например, при колебаниях напряжения в сети  $\pm 10\%$  изменение тока составляет  $\pm 3\%$ , то при смещении начала шкалы на 300°С возникает дополнительная погрешность 0,9 К, а при смещении на 900°С 2,7 К.

Поэтому смещение начала шкалы не должно быть слишком большим. При использовании стабилизатора напряжения на двух стабилизаторах можно добиться стабильности противонапряжения  $\pm 0,13\%$  при колебаниях напряжения сети  $\pm 20\%$ .

Колебание температуры свободных концов термопары может быть скомпенсировано с помощью термочувствительных резисторов точно так же, как в компенсаторах напряжения и самокомпенсирующихся приборах с мостовой схемой (см. 3.2.1.6.3). Сопротивление цепи, включая эффективное сопротивление схемы частичной компенсации, в простом исполнении без усиления необходимо подстраивать. Если сделать противонапряжение равным по величине значению т. э. д. с. для температуры середины шкалы, то погрешность из-за подстройки сопротивления цепи термопары и из-за влияния температуры на измерительный прибор будет для середины шкалы равна нулю. В начале и в конце шкалы эта погрешность равна только половине своего нормального значения. Таким образом с помощью простой схемы частичной компенсации, например для термопары хромель—алюмель, можно получить диапазон измерения от 100 до 1000°С. При использовании измерительных усилителей диапазон измерения можно сделать существенно меньше.

### 3.2.1.8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Большую чувствительность в малом диапазоне температур, которая требуется например, при термическом анализе или калориметрических измерениях, получают последовательным соединением нескольких термопар в термобатарею (рис. 3.62). Батарея из  $n$  термопар дает  $n$ -кратную т. э. д. с. У отдельных термопар должны быть особенно хорошо изолированы рабочие спаи и свободные концы. Вместе с тем, конечно, инерционность термобатареи больше, чем отдельной термопары. Если требуется малая инерционность, то подключают только одну термопару к прибору для измерения компенсационным методом или к измерительному усилителю.

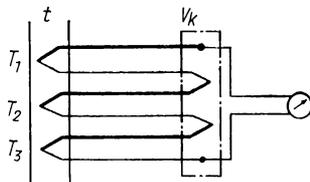


Рис. 3.62. Термобатарея из трех последовательно соединенных термопар  $T_1, T_2, T_3$ :  $t$  — измеряемая температура;  $V_k$  — постоянная температура термостата

### 3.2.1.8.1. Измерение градиентов температур, скорости и направления изменения температуры

Так как термопары в принципе измеряют разность температур, они особенно удобны для измерения температурных градиентов (рис. 3.63). Т. э. д. с. является постоянной мерой для градиента температур в том случае, если она изменяется линейно с температурой. Поэтому для таких измерений при больших изменениях температуры преимущественно применяют хромель-алюмелевые термопары с их прямолинейной характеристикой. При недостаточно линейной характеристике термопары за основу калибровки прибора следует принимать среднюю температуру. Однако при других температурах возникает погрешность. Малые градиенты температур могут быть измерены с помощью термопары (см. 4.1.2.3.1).

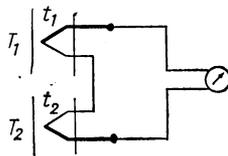


Рис. 3.63. Измерение градиента температур ( $t_2 - t_1$ ) двумя включенными навстречу термопарами  $T_1$  и  $T_2$

Для регулирования температуры часто желательно дополнить показания температуры характером ее изменения, для чего определяют направление и скорость изменения температуры. Для этого один из спаев дифференциальной термопары зачеканивают в металлический чехол, а другой помещают в теплоизоляции вблизи первого спая. При изменении температуры из-за разной инерционности обоих спаев возникает т. э. д. с. разбаланса, которая может быть наложена на т. э. д. с. простого термоэлектрического термометра. Дополнительное изменение т. э. д. с. во времени влияет на регулятор таким образом, что при изменении температуры регулирующее воздействие следует быстрее.

### 3.2.1.8.2. Переключение термопар

Если необходимо следить за большим числом термопар, температура которых очень быстро изменяется, можно подключать отдельные термопары с помощью переключателя с моторным приводом в определенной последовательности через достаточно малые интервалы времени к измерительному прибору, имеющему соответственно малое время установления показаний. С помощью цифровой счетно-измерительной техники температура может быть за очень короткий промежуток времени индигирована в цифровой форме или напечатана (см. 4.2).

### 3.2.1.8.3. Сигнализация обрыва цепи термопары

При разрушении термоэлектродов термопары от коррозии или других причин опасности подвергается в первую очередь установка, температура которой регулируется. Поэтому применяют различные устройства, которые сигнализируют об обрыве цепи термопары и управляют через реле подводом энергии так же, как и при превышении заданного значения регулируемой температуры. Для этой цели на термометр через высокоомный резистор подается вспомогательное напряжение, которое из-за малого сопротивления термопары не будет оказывать заметного влияния на измеренную т. э. д. с. При разрушении термопары весь вспомогательный ток пойдет через измерительный прибор и переместит стрелку прибора в зависимости от схемы соединения ниже или выше деления шкалы, соответствующего заданному значению. В обоих случаях конечный регулирующий орган займет безопасное для установки положение.

В новых конструкциях параллельно или последовательно с термометром включается генератор на транзисторах. Выполненная в виде трансформатора индуктивность колебательного контура содержит дополнительно демпфирующую обмотку, которая подключена через конденсатор. Тем самым она отделена по постоянному току от измерительной цепи и при нормальной работе термопары не оказывает влияния на ее т. э. д. с.

При включенной термопаре генератор не работает. Однако он включается, как только сопротивление цепи термопары из-за ее разрушения превысит определенное значение.

Можно очень легко приспособить компенсатор напряжения, автоматически корректирующий влияние изменения температуры свободных концов  $t_p$  (см. 3.2.1.6.3 и рис. 3.55), для одновременного контроля за целостностью термопары. Для этого настраивают мост компенсатора не на комнатную температуру ( $20^\circ\text{C}$  или  $0\text{ мВ}$ ), а на  $-10^\circ\text{C}$  или при PtRh—Pt термопаре на  $-0,5\text{ мВ}$ . При разрушении термопары стрелка прибора устанавливается в крайнем левом положении, левее начала шкалы, соответствующего, например,  $0^\circ\text{C}$ . При этом концевой выключатель сигнализирует о разрушении термопары.

При использовании измерительного преобразователя, преобразующего измерительный сигнал в постоянный ток, изменяющийся в пределах от  $0$  до  $20\text{ мА}$ , можно с помощью корректора нуля задать положительное или отрицательное в зависимости от требований смещение нуля. Разрыв входной цепи преобразователя приведет к появлению на выходе сигнала, знак которого зависит от знака смещения нуля. Этот сигнал через транзисторный усилитель включает реле сигнализации.

### 3.2.1.9. ПОГРЕШНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

При оценке погрешностей, возникающих при измерении температуры термоэлектрическими термометрами, в связи с вышеизложенным необходимо учитывать:

1. Предел допустимой погрешности термопары (табл. 3.5 и 3.6), которая иногда поставляется с более узкими допусками. Термопары должны быть изготовлены из термоэлектродов, которые поставляются изготовителями как взаимосоответствующие.

2. Отличать предел допустимой погрешности от погрешности конкретной термопары, которая определяется ее характеристикой (градуировочной кривой).

3. Погрешность и предел допустимой погрешности компенсационных проводов, к которым применимы те же самые основные требования, что и для термопар (см. табл. 3.10). Дополнительно необходимо учитывать: погрешности из-за неправильного подключения полюсов, из-за неправильного выбора и различной т. э. д. с. термопар и компенсационных проводов (см. 3.2.1.6.2).

4. Влияние температуры свободных концов термопары:

а) при расчете по формулам 3.2.1.6.1;

б) при использовании термостатов, биметаллических и мостовых компенсаторов учитывать погрешности измерения, обусловленные снижением тока питания компенсационных мостов, колебаниями напряжения сетевого питания, изменениями температуры свободных концов термопары (рис. 3.56) и из-за неправильного подключения полюсов компенсационных проводов и термопары (см. 3.2.1.6.3).

5. Погрешность вследствие изменения сопротивления цепи термопары:

а) при измерении методом гальванометра из-за неточной подстройки сопротивления цепи и его температурного изменения в эксплуатации, а также из-за параллельного подключения нескольких термопар к одному измерительному прибору (см. 3.2.1.7.1).

б) при измерении методом гальванометра с частичной компенсацией или без нее в сочетании с измерительным усилителем, а также при измерении компенсационным методом погрешностью, обусловленной изменением сопротивления цепи термопары, можно пренебречь.

6. Погрешность из-за неточной установки или нестабильности тока потенциометра в схемах со смещением нуля, а также при компенсационном (потенциометрическом) методе, а в некоторых случаях и погрешность, которая возникает при корректировке влияния температуры свободных концов в измерительных схемах, представленных на рис. 3.56, при нестабильности температуры  $t_p$ .

7. Погрешность измерительного прибора, определяемая его классом точности и температурной погрешностью.

8. Другие, чаще всего незначительные погрешности, обусловленные чувствительностью нуль-гальванометра, погрешностью подгонки манганиновых сопротивлений в измерительной схеме, погрешностью настройки потенциометра. Точно так же можно учесть погрешность электрического фильтра или выпрямителя (аналого-цифрового преобразователя).

### 3.2.1.9.1. Обзор возможных погрешностей измерения

Обзор значений погрешностей измерения, могущих возникнуть при различных методах и диапазонах измерения, в зависимости от типа термопар дан в табл. 3.13 [3.85; 3.86]. Для расчета погрешностей при измерении методом гальванометра использованы допустимые отклонения по ДИН 43710, для компенсационных приборов и преобразователей взяты половинные допуски. Для милливольтметров учтены класс точности и температурные погрешности. Колебания температуры окружающей среды и температуры свободных концов приняты  $\pm 5$  К, изменение сопротивления измерительной цепи  $\pm 5$  Ом. Для компенсационного метода с измерительными преобразователями и цифровыми приборами температура свободных концов  $t_0$  принята постоянной. Для компенсационного метода с потенциометром должна быть дополнительно учтена погрешность, связанная с величиной диапазона измерения, и для безнулевых диапазонов — погрешность начала шкалы; при использовании цифровых приборов следует учитывать только последнюю, так как у таких приборов погрешность не зависит от диапазона измерения (см. 4.2). В таблице приведены статистические пределы допустимой погрешности измерения температуры (см. 1.2.6).

Т а б л и ц а 3.13

**Статистические пределы допустимой погрешности термопар, К, при различных методах и диапазонах измерения**

Термопара	Диапазон температур, °С	Измерительный прибор				
		стрелочный милливольтметр		потенциометр с токовой компенсацией или измерительный преобразователь (класс 0,5)	потенциометр с компенсацией напряжения	цифровой прибор
		класс 1,0	класс 1,5			
Fe—CuNi	20—400	9/10,6	—/—	3,5/6,6	1,8/5,9	1,5/5,8
	20—800	17/17,8	19/—	6,5/8,1	3,6/6,0	3,0/5,75
	600—800	—	—	—	3,1/5,7	3,02/5,67
NiCr—Ni	20—600	10	—	4	2,7	2,25
	20—1000	16	20	7	4,4	3,75
	700—1000	—	—	—	3,84	3,78
PtRh10—Pt	20—1000	15	—	6,3	3,5	2,5
	20—1500	27	—	8,1	5,3	3,75
	1000—1500	—	—	—	4,0	3,8

Пр и м е ч а н и е. В числителе приведена погрешность при одинаковой т. э. д. с. в знаменателе — при максимально допустимом различии т. э. д. с. между термопарой и компенсационными проводами в головке термометра.

Погрешности измерения существенно уменьшаются при использовании термопар с половинным допуском (при длительной эксплуатации их надо проверять чаще!) и бестоковых методов измерения т. э. д. с.

Величина погрешности, которая возникает при различии т. э. д. с. термопары и компенсационных проводов в головке термометра [см. уравнение (3.29)], относительно мала при измерении методом гальванометра и заметно больше при бестоковых методах (сравнить числитель и знаменатель в табл. 3.13). Погрешность цифровых приборов и потенциометрического компенсационного метода определяется в основном отклонением т. э. д. с. термопары от градуировочной кривой. Ясно видно влияние использования безнулевого диапазона.

### 3.2.1.9.2. Влияние помех на точность измерения в технических установках

Дополнительно могут возникнуть еще некоторые погрешности измерения, которыми нельзя пренебрегать и которые обусловлены в основном шунтированием термопары из-за плохой изоляции ее термоэлектродов, компенсационных и соединительных проводов, а также из-за возникновения гальванических пар.

Если при подключении нескольких термоэлектрических термометров через переключатель к общему измерительному прибору они имеют общий полюс, то при недостаточной электрической изоляции термопар от измеряемого объекта могут возникнуть гальванические токи помех, поскольку термопары электролитически связаны друг с другом через заземление. Из-за сильно снижающегося с температурой сопротивления керамических изоляторов погрешность при высоких температурах может быть довольно большой. Поэтому переключение термопар должно быть двухполюсным.

Компенсационные и соединительные провода также должны быть хорошо изолированы друг от друга и от земли. Соединительные провода должны быть изолированы в соответствии с требованиями VDE для изолированных проводов сильноточных установок. Прежде всего места соединения компенсационных проводов в головке термометра и в термостате свободных концов должны быть хорошо защищены от сырости, соляных паров и кислотных флюсов для пайки, чтобы не могли возникнуть гальванические пары [3.82]. Высокая по сравнению с т. э. д. с. гальваническая э. д. с. может приводить к заметной погрешности измерения, как и образование проводящих перемычек. Погрешность измерения будет увеличиваться с увеличением расстояния между рабочим спаем термопары и такой перемычкой.

При высокой температуре, если материал изолятора становится при этом электролитически проводящим, между двумя изолированными друг от друга термоэлектродами может образовываться гальваническая разность потенциалов.

При этом измеряемая температура может быть занижена, как при простом шунтировании, но может быть и завышена. Такие погрешности могут встречаться у термопар, изолированных чистым асбестом, стеклянной или кварцевой пряжей в интервале температур 200—800°С как в окислительной, так и в восстановительной атмосферах. Большие погрешности наблюдаются в том случае, если температура вдоль термоэлектродов до места крепления термометра выше температуры рабочего спая. При отжиге рулонов широкой металлической ленты на термометрах, введенных внутрь рулона, при температуре 200—700°С были зафиксированы отклонения температуры от —80 до +80°С [3.87, 3.88].

При измерении температуры в электрических печах, нагреватели которых чаще всего заземлены, в измерительном приборе могут возникнуть токи помех через заземление [3.89]. При температуре нагрева выше 1000°С после выключения печи показание прибора внезапно резко увеличивается или уменьшается. Это явление наблюдается при питании нагревателей как переменным, так и постоянным током. Погрешность измерения вызвана ухудшением изоляции при высокой температуре. Ток от нагревателя может протекать через термоэлектрод к земле, в результате чего на т. э. д. с. термопары накладывается положительное или отрицательное падение напряжения. Эту погрешность можно устранить при помощи экранировки термометра внешним заземленным защитным чехлом.

Точно так же необходимо учитывать погрешность измерения из-за неправильной установки термометра или больших градиентов температуры (см. 7.1 и 7.3).

### 3.2.2. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В разнообразных устройствах для измерения температуры используется явление изменения электрического сопротивления металлов, электролитов и полупроводников в зависимости от температуры.

Платиновые термометры сопротивления, термоприемниками в которых являются платиновые сопротивления, не только приняты для воспроизведения Международной практической температурной шкалы (см. 2.2.2), но и нашли широкое применение в промышленности, преимущественно в химическом производстве. Термометры сопротивления отличаются прежде всего очень высокой точностью измерений (при весьма тщательных измерениях можно получить погрешность не более  $\pm 0,001$  К) и тем, что при использовании гальванометра с помощью простых схем без добавочных измерительных преобразователей можно легко получить малый диапазон измерений с началом шкалы в любой точке.

С термоэлектрическими термометрами такую чувствительность измерений можно получить только в сочетании с измерительными усилителями. При этом дополнительно нужно поддерживать постоянную температуру свободных концов термопары или учитывать ее. Однако при измерениях термометрами сопротивления требуется вспомогательный источник тока. Термоприемники полупроводниковых термометров сопротивления могут быть изготовлены очень малых размеров.

#### 3.2.2.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве материалов для термометров сопротивления пригодны только те, физические и химические свойства которых не изменяются с течением времени в измеряемом диапазоне температур. Сопротивление такого материала должно

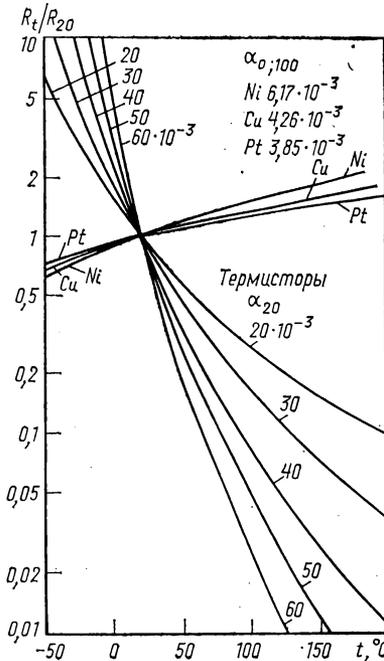


Рис. 3.64. Отношение сопротивлений  $R_t/R_{20}$  в зависимости от температуры металлических термометров сопротивления и термисторов с температурным коэффициентом  $\alpha_{20}$  от  $20 \cdot 10^{-3}$  до  $60 \cdot 10^{-3}$  ( $\alpha_{20}$  электролитов составляет примерно  $20 \times 10^{-3}$ )

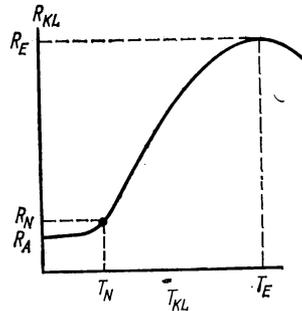


Рис. 3.65. Зависимость сопротивления  $R_{kL}$  термистора от температуры  $T_{kL}$ :

$R_A$  — выходное сопротивление;  $R_N$  и  $R_E$  — номинальное и критическое сопротивления соответственно;  $T_N$  и  $T_E$  — номинальная и критическая температуры соответственно

хорошо воспроизводиться и с изменением температуры монотонно снижаться или повышаться. Кроме того, внешние воздействия, такие как давление, влажность и коррозия, а также деформация и структурные изменения в точках пре-

вращения не должны оказывать влияния на сопротивление термометра. Чтобы избежать воздействий, вносящих погрешности, и получить хорошую временную стабильность отношения входного и выходного сигналов, термометры сопротивления должны быть хорошо стабилизированы (искусственно состарены). Температурный коэффициент сопротивления термометра должен быть возможно больше, так же как и удельное электросопротивление (особенно у металлической проволоки) для того, чтобы терморезистор занимал возможно меньший объем.

Сопротивление металлов в общем случае повышается с температурой, так же как и сопротивление материалов с положительным температурным коэффициентом сопротивления, тогда как сопротивление электролитов и материалов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления уменьшается при повышении температуры (рис. 3.64 и 3.65). Показателем изменения сопротивления с температурой служит температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_{0; 100}$ , который дает среднее относительное изменение сопротивления на один градус в интервале температур  $0-100^\circ\text{C}$ , или характеристическое отношение сопротивлений  $R_{100}/R_0$  при  $100$  и  $0^\circ\text{C}$ .

$$\alpha_{0; 100} = \frac{R_{100} - R_0}{\Delta t R_0} \quad \text{или} \quad \frac{R_{100}}{R_0} = 1 + \alpha_{0; 100} \Delta t, \quad (3.38)$$

где  $R_{100}$  и  $R_0$  — сопротивление при  $100$  и  $0^\circ\text{C}$  соответственно;  $\Delta t = 100\text{ K}$ , температурный интервал от  $0$  до  $100^\circ\text{C}$ .

Так как сопротивление почти никогда не изменяется линейно с изменением температуры, соотношение между температурой и сопротивлением определяют или по математическим формулам, или по экспериментально определенным градуировочным кривым, устанавливающим взаимосвязь между температурой и сопротивлением термочувствительного элемента.

### 3.2.2.1.1. Металлические термометры сопротивления

Требованиям, предъявляемым к материалам для термометров сопротивления больше всего соответствует платина. Платина высокой чистоты с  $\alpha_{0; 100} = 3,9250 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  служит для воспроизведения Международной практической температурной шкалы (МПТШ) с использованием интерполяционных формул (см. 2.2.2). Платиновые термометры используют для лабораторных и производственных измерений от  $-220$  до  $850^\circ\text{C}$ , а также условно от  $-250$  до  $1000^\circ\text{C}$ . При более высокой температуре платина склонна к испарению, при этом ее сопротивление изменяется. При высокотемпературных измерениях очень жесткие требования предъявляют к изоляции платинового сопротивления.

В некоторых странах для технических термометров сопротивления используют платину высокой чистоты с отношением сопротивлений  $R_{100}/R_0 = 1,3910$ . В ФРГ для обычных термометров применяют легированную небольшим количеством добавок платину с меньшей величиной отношения  $R_{100}/R_0 = 1,385$  (табл. 3.14). Температурный коэффициент сопротивления такой проволоки изменяется из-за влияния загрязняющих примесей значительно меньше, чем чистой платины, и поэтому при изготовлении технических термометров с каркасами из стекла или керамики легче получить нормальную и стабильную градуировку. Это преимущество особенно важно потому, что при изготовлении термометров сопротивления часто применяют термическую обработку при температурах, лежащих значительно выше диапазона использования платиновых термометров [3.91; 3.92, 3.117, ДИН 43760].

Для термометра сопротивления, изготовленного из проволоки с  $R_{100}/R_0 = 1,3910$ , можно использовать ряд основных величин термометра из платиновой проволоки с  $R_{100}/R_0 = 1,385$ , если его сопротивление принять равным  $98,47 \text{ Ом}$  при  $0^\circ\text{C}$ , а в соединительные провода включить дополнительное сопротивление величиной  $1,53 \text{ Ом}$ . Отклонением значений сопротивления такого термометра от основных величин по ДИН 43760 для технических измерений можно пренебречь. Оно составит для температур от  $-220$  до  $600^\circ\text{C}$  максимум  $0,1^\circ\text{C}$  и до  $850^\circ\text{C}$  только  $0,2^\circ\text{C}$ , что значительно меньше допустимых отклонений по ДИН 43760.

Т а б л и ц а 3.14

Стандартные основные величины термометров сопротивления с номинальным сопротивлением 100 Ом при 0° С и их характеристическое отношение сопротивлений  $R_{100}/R_0$

А. Платиновые термометры сопротивления

Температура, °С	Стандартная основная величина, Ом, по		Температура, °С	Стандартная основная величина, Ом, по	
	ISO/OIML $R_{100}/R_0 =$ = 1,391	ДИН $R_{100}/R_0 =$ = 1,385		ISO/OIML $R_{100}/R_0 =$ = 1,391	ДИН $R_{100}/R_0 =$ = 1,385
-220	9,05	10,41	400	249,38	247,06
-200	17,29	18,53	420	256,36	253,93
-180	25,97	27,05	440	263,23	260,75
-160	34,54	35,48	460	270,18	267,52
-140	43,01	43,80	480	277,01	274,25
-120	51,37	52,04			
-100	59,65	60,20	500	283,80	280,93
-80	67,84	68,28	520	290,55	287,57
-60	75,96	76,28	540	297,25	294,16
-40	84,03	84,21	560	303,90	300,70
-20	92,04	92,13	580	310,50	307,20
0	100,00	100,00	600	317,06	313,65
20	107,91	107,79	620	323,61	320,05
40	115,78	115,54	640	330,1	326,41
60	123,60	123,24	660	336,9	332,72
80	131,37	130,89	680	342,9	338,99
100	139,10	138,50	700	349,3	345,21
120	146,78	146,06	720	355,5	351,38
140	154,41	153,57	740	361,8	357,51
160	162,00	161,04	760	367,9	363,59
180	169,54	168,47	780	374,1	369,62
200	177,03	175,84	800	380,1	375,61
220	184,48	183,17	820	386,2	381,55
240	191,88	190,46	840	392,2	387,45
260	199,23	197,70	860	398,1	
280	206,53	204,88	880	404,0	
300	213,79	212,03	900	409,8	
320	221,00	219,13	920	415,6	
340	228,17	226,18	940	421,3	
360	235,29	233,19	960	427,0	
380	242,36	240,15	980	432,6	
			1000	438,2	

## Б. Никелевые и медные термометры сопротивления

Температура, °C	Стандартная основная величина, Ом		Температура, °C	Стандартная основная величина, Ом	
	никеля (ДИН) $R_{100}/R_0 =$ = 1,617	меди (OIML) $R_{100}/R_0 =$ = 1,426		никеля (ДИН) $R_{100}/R_0 =$ = 1,617	меди (OIML) $R_{100}/R_0 =$ = 1,426
—60	69,5		60	135,3	125,56
—40	79,1		80	148,2	134,08
—20	89,3		100	161,7	142,60
0	100,00	100,00	120	175,9	151,12
20	111,3	108,52	140	190,9	159,64
40	123,0	117,04	160	206,7	168,16
			180	223,1	176,68

Зависимость между температурой и сопротивлением платины в области выше 0°С может быть описана многочленом

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2), \quad (3.39)$$

где  $R_t$  и  $R_0$  — сопротивление проводника при температуре  $t$  и 0°С соответственно. Для термометра сопротивления, соответствующего ДИН 43760 с характеристическим отношением сопротивлений  $R_{100}/R_0 = 1,385$ ,  $A = 3,90784 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и  $B = -0,578408 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ . С помощью этой интерполяционной функции может быть рассчитана градуировка в области 0—850°С.

Для диапазона от 0 до —200°С зависимость между температурой и сопротивлением можно представить выражением

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - t_{100})^3], \quad (3.40)$$

где  $A$  и  $B$  имеют те же значения, что и в выражении (3.39), и  $C = -4,481924 \times 10^{-12} \text{ K}^{-4}$ . Величина  $t_{100}$  равна 100°С. Отклонение от стандартных значений составляет в пределах этого диапазона максимум 0,7 Ом, что соответствует примерно 0,17 К. Оно лежит в пределах допустимых отклонений (табл. 3.15). Однако ниже —200°С отклонение от стандартных значений сильно возрастает (при —220°С оно составляет 0,71 Ом или 1,8 К).

Для термометров с характеристическим отношением сопротивлений  $R_{100}/R_0 = 1,391$  градуировка для диапазона температур 0—600°С рассчитывается по формуле (3.39) при  $A = 3,96847 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и  $B = -0,5847 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ . Для диапазона 0—(—183°)С градуировка рассчитывается по формуле (3.40) при этих же значениях  $A$  и  $B$  и  $C = -4,3558 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$ .

Для платиновых термометров сопротивления с платиной, имеющей  $R_{100}/R_0 = 1,385$ , основные величины по ДИН 43760 даны в табл. 3.14 и в приложении. Кроме того, в табл. 3.14 приведены основные величины для 100-Ом термометра с платиной по ISO/OIML, имеющей  $R_{100}/R_0 = 1,391$  [3.91, 3.92]. В то время как по стандарту ФРГ для каждой основной величины дается только одно значение допустимого отклонения, по рекомендации OIML (см. табл. 3.15) термометры сопротивления 1-го класса имеют меньшие допустимые отклонения, чем термометры 2-го класса. Изготовитель может поставлять термометры с более узкими допусками путем экспериментального построения градуировочных кривых с представлением протокола испытаний.

Номинальное значение сопротивления, т. е. сопротивление при 0°С, металлических термометров обычно равно 100,00 Ом. При использовании термометров с более высоким сопротивлением, например 500,00 Ом, и небольшой длиной соединительных проводов подгонкой проводов при помощи подстроечного сопротив-

Т а б л и ц а 3.15

Допустимые отклонения сопротивления ( $a$ , Ом)  
и температуры ( $b$ , °С) термометров сопротивления

## А. Платиновые термометры сопротивления

Температура, °С	Допустимые отклонения по					
	ДИН		OIML			
	$a$	$b$	класс 1		класс 2	
			$a$	$b$	$a$	$b$
-220	0,7	1,8				
-200	0,5	1,2				
-100	0,3	0,7				
0	0,1	0,3	0,06	0,15	0,12	0,30
100	0,25	0,6	0,17	0,45	0,28	0,75
200	0,45	1,2	0,27	0,75	0,44	1,20
300	0,65	1,8	0,37	1,05	0,59	1,65
400	0,85	2,4	0,46	1,35	0,73	2,1
500	1,0	3,0	0,55	1,65	0,85	2,55
600	1,2	3,6	0,63	1,95	0,96	3,00
700	1,35	4,2				
800	1,45	4,8				
850	1,5	5,1				

## Б. Никелевые и медные термометры сопротивления

Температура, °С	Допустимые отклонения					
	никеля (ДИН)		меди (OIML)			
	$a$	$b$	класс 2		класс 3	
			$a$	$b$	$a$	$b$
-60	1,0	2,1				
-30	0,56	1,15				
0	0,1	0,2	0,13	0,30	0,13	0,30
30	0,3	0,45	0,17	0,41	0,21	0,48
60	0,5	0,75	0,22	0,51	0,28	0,66
100	0,8	1,1	0,28	0,65	0,38	0,90
130	0,98	1,25	0,32	0,76	0,47	1,10
160	1,16	1,38	0,37	0,86	0,54	1,26
180	1,30	1,5	0,40	0,93	0,59	1,38

ления часто пренебрегают (при сопротивлении проводов  $R_L$  2 Ом погрешность показаний 500-Ом термометра составляет 1°С, тогда как для 100-Ом термометра она составляет 5°С).

Для измерения высоких температур до 1000°С, наоборот, целесообразно применять термометры с номинальным сопротивлением 10 или 20 Ом.

При одинаковых размерах каркаса для этих термометров можно использовать более толстую и поэтому более устойчивую к изменению сопротивления из-за поглощения примесей проволоку. Кроме того, при этом меньше искажаются результаты измерения из-за шунтирования, которое возникает из-за повышения электрической проводимости каркаса при высоких температурах.

Для термометров сопротивления можно использовать карбонильный никель очень высокой чистоты, который обладает температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha_{0; 100} = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Для технических целей применяют проволоку из слабо легированного никеля с  $\alpha_{0; 100} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  ( $R_{100}/R_0 = 1,617$ ) [3.117, ДИН 43760].

С помощью никелевых термометров сопротивления благодаря их высокому температурному коэффициенту можно допустить более узкий диапазон измерения, чем с платиновым термометром, при тех же сопротивлении и токовой нагрузке и с тем же измерительным устройством.

Поскольку при  $300^\circ\text{C}$  никель имеет точку превращения, он пригоден для длительных измерений в диапазоне  $0\text{--}150^\circ\text{C}$ , для кратковременных — до  $180^\circ\text{C}$  (основные величины и допустимые отклонения указаны в табл. 3.14 и 3.15).

Медь отличается тем, что ее сопротивление изменяется с температурой практически линейно. Из-за склонности к окислению медь используют в основном для измерений вблизи комнатной температуры не выше  $120^\circ\text{C}$ , кратковременно до температуры  $180^\circ\text{C}$ . В интервале  $0\text{--}50^\circ\text{C}$  может быть достигнута стабильность  $0,01 \text{ K}$  [3.93]. Температурный коэффициент сопротивления хорошей электролитической меди составляет  $\alpha_{0; 100} = 0,426 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  ( $R_{100}/R_0 = 1,426$ ). Основные величины и допустимые отклонения медных термометров сопротивления 2-го и 3-го классов по рекомендации OIML [3.92] даны в табл. 3.14 и 3.15. Медь часто находит применение для температурной коррекции при измерении зависимых от температуры величин, например для коррекции показаний магнитоэлектрических измерительных приборов. По увеличению сопротивления медных обмоток электрических машин, трансформаторов, дросселей и т. п. определяют их среднюю температуру в процессе эксплуатации, если перед этим было определено сопротивление обмоток в холодном состоянии (без нагрузки). Из тугоплавких металлов вольфрам имеет более высокий температурный коэффициент, чем платина [3.94]. Вплавленный в чистую окись алюминия вольфрам дает воспроизводимые результаты до  $1000^\circ\text{C}$ . Об измерении очень низких температур термометрами сопротивления см. 2.2.6.

### 3.2.2.1.2. Полупроводниковые термометры сопротивления

Сопротивление полупроводников с температурой изменяется значительно сильнее, чем металлов. Те полупроводники, которые при повышенной температуре имеют большую проводимость, чем при низкой, называют резисторами с отрицательным температурным коэффициентом (термисторами) или NTC-резисторами [3.95—3.97]. Полупроводники, проводимость которых в определенном узко ограниченном температурном интервале уменьшается при повышении температуры, называют терморезисторами с положительным температурным коэффициентом (позисторами) или PTC-резисторами [3.98, 3.99].

Согласно электронной теории твердого тела электрическая проводимость основана на том, что электроны могут находиться только в определенных энергетических состояниях, разделенными на зоны, между которыми лежат запрещенные уровни. Электрон может покинуть свое место и тем самым переносить заряд, если он может перейти с одного энергетического уровня на другой, еще не занятый электронами. У проводников внешняя зона заполнена лишь частично, так что электроны даже при очень малых добавках энергии могут изменять свое место. У полупроводников и изоляторов электрон, чтобы подняться до незаполненного энергетического уровня, должен получить энергию, соответствующую ширине запрещенной зоны. Такую энергию имеет лишь малая часть электронов, которая, однако, возрастает с повышением температуры. Вследствие этого электрическая проводимость полупроводников и изоляторов меньше, чем металлов, но она повышается с повышением температуры, т. е. их сопротивление уменьшается (см. рис. 3.64). Сопротивление металлических проводников, наоборот, повышается с температурой, так как из-за увеличения амплитуды колебаний атомов в кристаллической решетке подвижность электронов падает.

Полупроводники с положительным температурным коэффициентом сопротивления обладают дополнительно ферроэлектрическими свойствами. В ферро-

электрическом состоянии ниже температуры Кюри их сопротивление изменяется незначительно. При незначительном переходе через точку Кюри ферроэлектрические явления исчезают. Сопротивление в относительно узком температурном интервале возрастает экспоненциально на несколько порядков.

При дальнейшем повышении температуры сопротивление снова падает, как у обычных полупроводников.

Температурная зависимость сопротивления термисторов может быть описана выражением

$$R_T = A e^{B/T}. \quad (3.40a)$$

Величина  $A$  зависит в основном от сопротивления термистора, а величина  $B$ , кроме того, и от материала термистора. Величину  $A$  можно определить, если ввести опорное значение сопротивления  $R_{T_b} = A e^{B/T_b}$  для опорной температуры  $T_b$ , равной, например,  $25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$ . Тогда

$$R_T = R_{T_b} e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} \right)}. \quad (3.41)$$

Рассчитанная из значений сопротивления  $R_T$  и  $R_{T_b}$  отрицательная по знаку постоянная  $B$  зависит от температуры. Температурный коэффициент получаем из соотношения

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = - \frac{B}{T^2}. \quad (3.42)$$

Значение константы  $B$  для  $25^\circ\text{C}$  в зависимости от материала термистора лежит между 2000 и 6000 К, температурный коэффициент — между  $0,02$  и  $0,06\text{ K}^{-1}$ .

На рис. 3.64 представлена зависимость  $R_T/R_{20}$  от  $\alpha_{20}$ . С повышением сопротивления термистора  $\alpha$  и  $B$  обычно возрастают.

### 3.2.2.1.3. Полупроводниковые материалы

В качестве материала для термисторов применяют легко спекаемые оксиды, в особенности твердые растворы окислов различных металлов с общей кислородной решеткой, такие как закись-окись железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{FeO} \cdot \text{F}_2\text{O}_3)$  с добавками  $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  или  $2\text{ZnO} \cdot \text{TiO}_2$ . Кроме того, для термисторов используют твердые растворы на основе окиси железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , легированные небольшими количествами двуокиси титана ( $\text{TiO}_2$ ), или окислы никеля или кобальта  $\text{NiO}$  или  $\text{CoO}$  с добавками окиси лития  $\text{Li}_2\text{O}$ , а также окись меди с добавками окислов щелочных металлов. Добавками окислов другой валентности искажают кристаллическую решетку на границах зерен, благодаря чему снижается очень высокое сопротивление чистых окислов. Поэтому удельное электросопротивление может изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от концентрации добавок. Кроме того, для улучшения воспроизводимости характеристик могут быть добавлены стабилизирующие окислы.

Материалы для позисторов состоят из полупроводниковых поликристаллических керамик. Их сопротивление определяется в основном переходным сопротивлением границ зерен, которое в свою очередь зависит от диэлектрической постоянной материала. Последняя имеет максимум вблизи точки Кюри. Непосредственно выше температуры Кюри при понижении диэлектрической постоянной на границах зерен образуется запирающий слой, в результате чего сопротивление позистора экспоненциально возрастает. Поэтому для этой области повышения сопротивления температурный коэффициент пропорционален изменению натурального логарифма сопротивления с температурой

$$\alpha = \Delta (\ln R) / \Delta T. \quad (3.43)$$

Основной материал с положительным температурным коэффициентом служит титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  с температурой точки Кюри  $120^\circ\text{C}$ . Точку Кюри можно сдвинуть к более низким температурам, частично заменяя барий стронцием и ти-

тан оловом или цирконием, а также свинцом. Для изготовления такого материала карбонаты бария или стронция предварительно спекают с другими окислами при  $1000^{\circ}\text{C}$ , в размолотый материал добавляют пластификатор, прессуют изделие нужной формы и спекают при  $1350^{\circ}\text{C}$ . Внедряя чужеродные ионы в приграничные области отдельных кристаллитов при помощи специальной обработки, можно изменять характеристики материала в широких пределах. На рис. 3.66 приведены характеристики удельное сопротивление — температура некоторых материалов с положительным температурным коэффициентом сопротивления.

Полупроводниковые диоды и транзисторы также можно использовать для температурных измерений. Температурное изменение напряжения пропускания в прямом направлении кремниевых и германиевых диодов довольно постоянно для каждого типа и почти не зависит от пропускаемого тока. Оно составляет

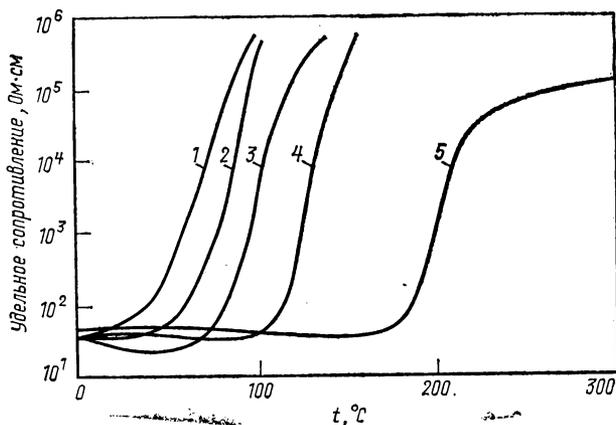


Рис. 3.66. Температурная зависимость удельного сопротивления термисторов с различной номинальной температурой  $T_N$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

1 — 30; 2 — 50; 3 — 70; 4 — 110; 5 — 170

примерно  $1,84\text{ мВ/К}$  для германиевых диодов и  $2,12\text{ мВ/К}$  для кремниевых диодов. При постоянном прямом токе зависимость между температурой и падением напряжения на запирающем слое линейна. У германиевых диодов область линейности распространяется примерно от  $-150$  до  $30^{\circ}\text{C}$ , у кремниевых диодов — от  $100^{\circ}\text{C}$  до  $4\text{ К}$ .

При прямом токе  $1\text{ мА}$  напряжение пропускания составляет для германиевых диодов примерно  $215\text{ мВ}$ , для кремниевых — около  $265\text{ мВ}$ . Преимуществом диодов по сравнению с позисторами является значительно большая линейность характеристики, однако при этом необходимо считаться с их большей температурной инерционностью (постоянная времени равна примерно  $13\text{ с}$  при скорости потока воздуха  $2,5\text{ м/с}$ ).

Для измерений температуры с помощью транзисторов используется переход эмиттер—база в прямом направлении в диодном режиме. Благодаря усилительным свойствам транзистора получают изменение напряжения на коллекторе до  $50\text{ мВ/К}$  в диапазоне  $(-50)$ — $150^{\circ}\text{C}$  при высокой стабильности и хорошей линейности температурной характеристики. При ширине температурного диапазона  $100^{\circ}\text{C}$  сигнал составляет  $5\text{ В}$ , так что с помощью транзисторных термометров можно легко передавать информацию о температуре в самолет-снарядах и ракетах на наземные станции.

### 3.2.2.2. КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

#### 3.2.2.2.1. Измерительный резистор

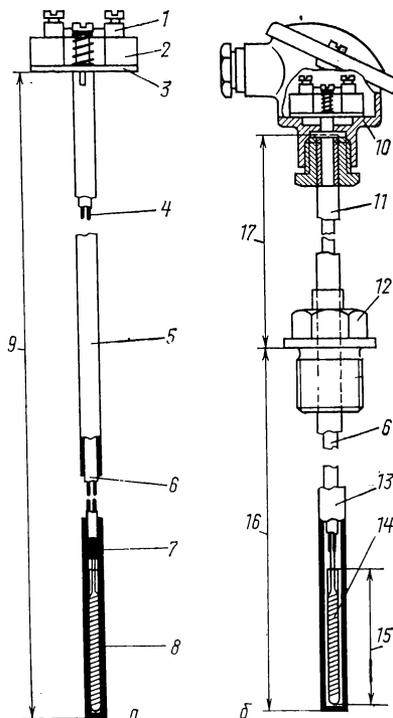
На рис. 3.67 показано устройство термометра сопротивления. Датчиком температуры служит измерительный резистор на каркасе или без него. Измерительный резистор металлического термометра сопротивления представляет собой чаще всего спираль из проволоки или ленты, которая закреплена или заключена в каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы. От измерительного резистора идут выводы к соединительной колодке термометра сопротивления, к которой подсоединяют провода, ведущие к измерительному прибору.

Подобно термопарам, измерительные резисторы для защиты от механических повреждений или химического воздействия заключают в специальные оболочки, чехлы, защитные трубки.

Измерительный резистор, заключенный в трубку-оболочку вплоть до соединительной колодки, представляет собой оболочковый термометр сопротивления, который может быть закреплен непосредственно на измеряемом объекте.

Рис. 3.67. Конструкция термометра сопротивления:

*a* — измерительная вставка; *б* — разрез измерительной вставки в защитном чехле с резьбовой втулкой и соединительной головкой (по ДИН 16160 лист 5); 1 — соединительные клеммы; 2 — керамическая колодка; 3 — фланец; 4 — соединительные провода; 5 — удлинительная трубка; 6 — керамическая изолирующая трубка; 7 — место соединения; 8 — измерительный резистор; 9 — установочная длина вставки; 10 — соединительная головка; 11 — промежуточная трубка; 12 — резьбовая втулка; 13 — чехол; 14 — измерительный резистор; 15 — длина термоприемника; 16 — установочная длина; 17 — длина промежуточной трубки



Если термометр сопротивления предназначен для встраивания в защитный чехол, то заключенный в оболочку резистор вместе с удлинителем и соединительной колодкой называют измерительной вставкой [3.117, ДИН 16160, лист 1 и 5]. Соединительная колодка измерительной вставки, аналогично термопарной измерительной вставке (см. рис. 3.35), плотно прижата с помощью винтов и пружин к фланцу чехла для обеспечения хорошего теплового контакта между измерительной вставкой и дном чехла.

#### 3.2.2.2.2. Измерительные резисторы для научных исследований. Эталонные измерительные резисторы

Измерительные резисторы для научных исследований изготавливают из спектрально чистой платиновой проволоки, намотанной бифилярно без натяжения на каркас крестообразного сечения из слюды или керамики, который заключен в заполненную защитным газом трубку из кварца или фарфора (рис. 3.68). От измерительного резистора к соединительной головке термометра ведут четыре тонких

золотых или платиновых вывода. Номинальное сопротивление термометра для измерения температур до  $630^{\circ}\text{C}$  составляет  $10\ \text{Ом}$  (при  $0^{\circ}\text{C}$ ), для температур до  $900^{\circ}\text{C}$  — около  $0,2$ — $0,3\ \text{Ом}$ . Для измерений температур от ( $-220$ ) до  $100^{\circ}\text{C}$  заполненную сухим воздухом или гелием кварцевую трубку герметизируют. Проверка термометров, служащих эталонами температуры проводится Федеральным физико-техническим институтом в Брауншвейге по стандартным фиксированным точкам. Погрешность измерения при поверке менее  $0,1\ \text{K}$  во всем температурном диапазоне. В более узком, всегда постоянном диапазоне (примерно между  $0$  и

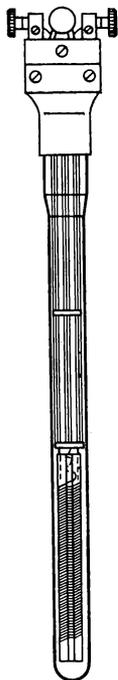


Рис. 3.68. Термометр сопротивления для научных исследований (эталонный термометр сопротивления)

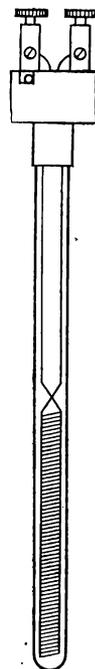


Рис. 3.69. Лабораторный термометр сопротивления

$100^{\circ}\text{C}$ ) погрешность еще меньше. Для контрольных термометров такой же конструкции с номинальным сопротивлением  $100\ \text{Ом}$  в диапазоне температур ( $-220$ )— $500^{\circ}\text{C}$  гарантируется погрешность измерения до  $0,2\ \text{K}$  при заводской поверке и  $0,1\ \text{K}$  при поверке в физико-техническом институте. Измерительные резисторы в виде свободно навитой спирали из платиновой проволоки в стеклянной или керамической защитной гильзе применяют в различном конструктивном оформлении для очень точных измерений в диапазонах ( $-183$ )—( $-30$ ) $^{\circ}\text{C}$  и  $630$ — $1063^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.2.2.3. Измерительные резисторы со стеклянной изоляцией

Для обычных лабораторных измерений используются измерительные резисторы в виде платиновой проволоки с номинальным сопротивлением  $100\ \text{Ом}$ , запаянной в твердое стекло, с соединительной головкой, укрепленной на удлинительной трубке (рис. 3.69). Для температуры до  $300^{\circ}\text{C}$  выводы изготавливают

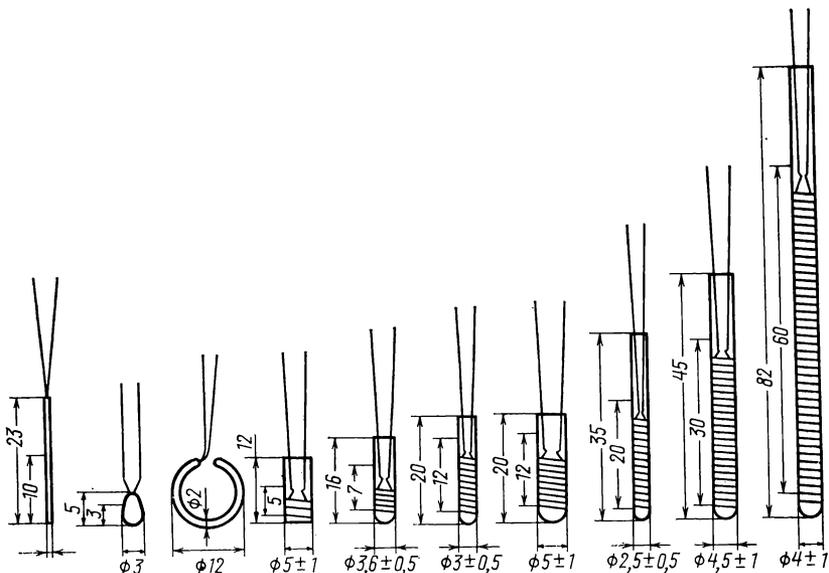


Рис. 3.70. Размеры различных измерительных резисторов с запаянной в твердое стекло платиновой проволокой, номинальное сопротивление 100 Ом

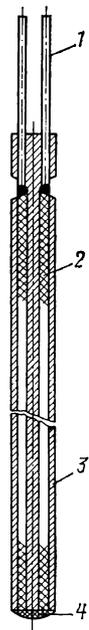
из чистого серебра, до 500°С — из чистого золота. Эти термометры имеют от двух до четырех выводов и длину навивки измерительного резистора 12—60 мм. Заводской паспорт гарантирует для температур от 0 до 100°С погрешность измерения до 0,2 К, для других диапазонов температур 0,5 К.

У коммерческих остеклованных измерительных резисторов для производственных измерений (рис. 3.70), аналогично лабораторным термометрам, платиновую проволоку или ленту навивают на каркас из твердого стекла, затем резистор вставляют в тонкостенную трубку из того же стекла и запаивают в ней. Такие измерительные резисторы изготавливают длиной 8 и 70 мм для простых термометров и до 95 мм для двойных термометров при диаметре 2—5 мм. Их верхний температурный предел лежит при 600°С, так как при более высокой температуре сопротивление стеклянной изоляции снижается настолько сильно, что может изменить значение сопротивления измерительного резистора. Благодаря бифилярной намотке измерительной проволоки или ленты уменьшается ток индукции при включении; можно также проводить измерение сопротивления на переменном токе. При этом влияние посторонних полей очень мало благодаря очень малой индуктивности резистора.

#### 3.2.2.2.4. Измерительные резисторы с керамической изоляцией

У измерительных резисторов с керамической изоляцией проволока уложена в виде спирали в двойном капилляре из алунда ( $Al_2O_3$ ), а оставшееся свободное пространство в капилляре

Рис. 3.71. Измерительный резистор с платиновой спиралью в двойном керамическом капилляре (Негаус): 1 — соединительные провода; 2 — измерительная спираль; 3 — керамический каркас; 4 — наконечник из керамической замазки



заполнено пудрой из окиси алюминия (рис. 3.71) для обеспечения хорошего теплового контакта. Навитая спиралью платиновая проволока при изменении температуры механически не нагружается, так что остаточное изменение сопротивления в результате колебаний температуры весьма мало. Эти термометры при сопротивлении измерительного резистора 100 Ом можно использовать для измерения температур до 850 и 1000°С при сопротивлении 10 Ом. В зависимости от конструкции, максимальной допустимой температуры и числа измерительных спиралей (для простых или многорезисторных термометров) длина измерительных резисторов лежит в пределах от 20 до 95 мм, диаметр от 1,5 до 6 мм. Измерительные резисторы с сопротивлением 500 Ом изготавливают еще большей длины.

Диаметр платиновой проволоки для таких технических измерительных резисторов составляет обычно не более 0,04 мм при длине измерительного резистора простого термометра 500 мм. У никелевых термометров проволока диаметром не более 0,1 мм изолирована шелковой или стеклянной оплеткой.

### 3.2.2.5. Конструкция и требования к защитной арматуре

Многообразные конструктивные формы защитной арматуры (см. рис. 3.35 и 3.67) определяются целями применения и в первую очередь необходимостью защиты измерительных резисторов от химических и механических воздействий.

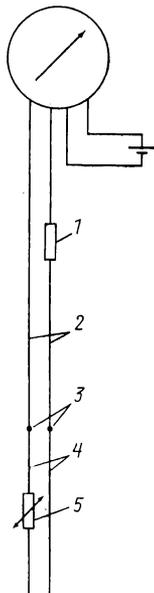


Рис. 3.72. Принципиальная схема включения термометра сопротивления. Элементы измерительной схемы размещены в показывающем приборе (по ДИН 16160, лист 5):

1 — подстроечное сопротивление; 2 — соединительные провода; 3 — места соединения; 4 — выводы; 5 — измерительный резистор

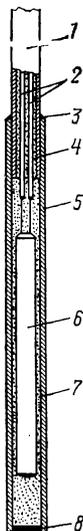


Рис. 3.73. Измерительный резистор с керамической изоляцией, устойчивый к ударам и вибрации. Резистор соединен с выводами гибкими перемычками (Degussa):

1 — провод в оболочке; 2 — выводы; 3 — сварное соединение; 4 — изоляция из окиси магния; 5 — чехол; 6 — измерительный резистор; 7 — заполнение из керамического цемента; 8 — пробка

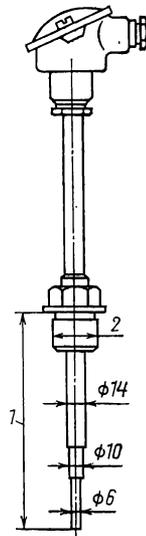


Рис. 3.74. Малонерционный термометр сопротивления с резьбовой втулкой и двойным сужением защитного чехла:

1 — установочная длина; 2 — резьба диаметром 1"

В связи с частым возникновением вибраций и колебаний деталей защитной арматуры во избежание разрушения проволочных выводов и резисторов необходимо особенно обращать внимание на тщательную укладку выводов и их соединение с измерительным резистором. Выводы из серебра, его сплавов, платиновая в оболочке или нихромовая проволока должны вводиться в измерительную вставку через керамические изоляторы, хорошо закрепленные против сдвигов и скручивания. Измерительный резистор тоже должен быть неподвижно закреплен в патроне вставки. У термометров для высокотемпературных измерений удлинительная трубка вставки и выводы должны иметь примерно одинаковый коэффициент линейного расширения, для того чтобы при изменениях температуры выводы не могли оборваться. Их сопротивление должно быть очень мало по сравнению с сопротивлением измерительного резистора для того, чтобы сопротивление на соединительных клеммах термометра не становилось недопустимо большим по сравнению с сопротивлением измерительного резистора и не искажало вследствие этого результатов измерения (рис. 3.72). Кроме того, выводы не должны иметь высокого температурного коэффициента сопротивления, чтобы при их нагреве не возникало дополнительной погрешности. Если при длинной измерительной вставке сопротивление выводов превышает 0,15—0,5 Ом, то их делают из никельхромового сплава, сопротивление которого почти не изменяется с изменением температуры. В этом случае при уравнивании сопротивления измерительной цепи учитывают указанное на измерительной вставке сопротивление проводов. Для температур до 300°С патрон и удлинительную трубку измерительной вставки изготавливают из оловянистой бронзы SnBz6 (ДИН 17681), а для более высоких температур — из никеля.

При заделке измерительного резистора в патрон можно существенно уменьшить его инерционность, если пространство между измерительным резистором и патроном заполнить керамической инертной массой или оловом. Если к патрону с измерительным резистором приварена гибкая оболочка с медными выводами (по типу оболочковых термоэлектрических термометров), то получается весьма вибростойкая измерительная вставка (рис. 3.73). Такие вставки могут быть установлены без защитных чехлов в труднодоступных местах. Инерционность показаний винчиваемых термометров сопротивления может быть уменьшена за счет того, что измерительный резистор вводят с хорошим тепловым контактом в защитный чехол, ступенчато сужающийся к концу (рис. 3.74).

### 3.2.2.2.6. Конструкции термометров сопротивления для специальных измерений<sup>1</sup>

Термометры сопротивления отличаются от термомпар более высокой точностью, однако время их срабатывания, например в ядерных реакторах, слишком велико. Можно достичь высокой точности измерения при малом времени срабатывания путем комбинации термометра сопротивления с термомпарой. Дифференциальная термомпара хромель—алюмель, аналогичная термомпаре для определения тенденции изменения температуры, расположена вблизи термометра сопротивления так (рис. 3.75), что один из ее спаев имеет такую же тепловую инерционность, как измерительный резистор. Два хромелевых провода от термомпары и вывода термометра сопротивления подключены к двум усилителям измерительного преобразователя, выходные напряжения которых настроены на одинаковую чувствительность по температуре и суммируются. Даже если не достигается равенство температур между рабочим спаем и свободными концами дифференциальной термомпары, это не влияет на точность измерения. Измерительный резистор выступает в качестве свободного конца с переменной температурой, на сигнал которого накладывается только малая т. э. д. с., соответствующая остаточной разности температур.

Термометр сопротивления с байонетным замком для измерений до 400°С в машинах для обработки пластмасс, отличающийся высоким быстродействием,

<sup>1</sup> См. также 8.3.

показан на рис. 3.76. Аналогичные конструкции используют для измерения температуры подшипников, головок цилиндров двигателей, масляных ванн и др. Соединительные провода прочно соединены с термометром.

Для измерения температуры обмоток электрических машин служат пазовые термометры, выполненные в виде плоских лент, которые укладывают в пазы для обмоток. Измерительный резистор, заключенный в гибкий изолятор, должен быть

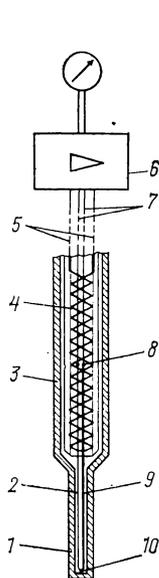


Рис. 3.75. Термометр сопротивления в сочетании с термоэлектрическим термометром (по Maurer-Siemens):

1 — трубка-оболочка из серебра; 2 — хромелевый термоэлектрод; 3 — стальной чехол; 4 — термометр сопротивления; 5 — соединительные провода к термометру сопротивления; 6 — измерительный преобразователь; 7 — хромелевый термоэлектрод; 8 — свободный конец термопары с такой же инерционностью, как и у термометра сопротивления 4; 9 — алюминиевый термоэлектрод; 10 — малоинерционный рабочий спай термопары

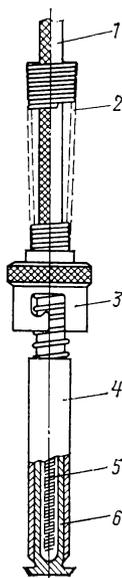


Рис. 3.76. Вставной термометр сопротивления с байонетным замком, в стальной чехле и с серебряной теплопроводной гильзой для сокращения времени установления показаний: 1 — соединительные провода; 2 — пружина для предохранения от перегибов; 3 — байонетное соединение; 4 — стальной чехол; 5 — измерительный резистор; 6 — серебряная гильза

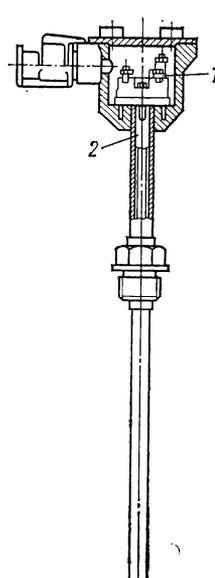


Рис. 3.77. Термометр сопротивления во взрывозащищенном исполнении с устойчивой к сдвиганию капсулой:

1 — соединительная головка; 2 — уплотнение

изолирован и хорошо предохранен от сжатия, чтобы на точность его показаний не влияли неизбежные изгибающие нагрузки. Покрытая лаком или оплетенная шелком платиновая или никелевая проволока для температуры до 120°С закрепляется на тонкой длинной текстолитовой полосе. Для более высокой температуры (до 150°С) голая металлическая проволока намотана на слюду или покрытые слюдой металлические полоски и закрыта полосами слюды [3.03] (см. 8.6.1).

Во многих установках химической промышленности и в производстве минеральных масел следует использовать термометры сопротивления во взрывобезопасном исполнении. На рис. 3.77 показана конструкция термометра сопротивле-

ния в высокопрочном защитном чехле (гильзе), тип защиты (Ех) S3nG5, который может быть подключен к любому показывающему прибору (см. 8.6.4).

Для измерений комнатной температуры в помещениях измерительный проволочный резистор наматывают в виде плоской катушки подобно катушке гальванометра. Эта плоская катушка встроена в корпус такой конструкции, что на показания термометра почти не оказывает влияния температура стен, которая отличается от температуры воздуха в помещении. Минимальное влияние температуры стены обеспечивает также комнатный термометр со свободно лежащим остеклованным измерительным резистором, закрытым защитным колпачком, с пластмассовым цоколем (рис. 3.78). У термометра, очень быстро реагирующего на изменения температуры, измерительный проволочный резистор свободно намотан на слюдяной или керамический каркас крестообразной формы. Даже при отсутствии защитной арматуры его показания не искажаются за счет влияния излучения. Для измерения температуры воздуха в воздуховодах такие или остеклованные измерительные резисторы обычно помещают в перфорированные защитные трубки.

При измерении температуры поверхностей для значительного сокращения времени установления показаний на изолированную поверхность осаждают тонкую металлическую пленку, например на анодированный алюминий наносят золото.

Для того чтобы получить малое время установления показаний в жидкостях с плохой теплопроводностью, например при измерении температуры в нефтяных скважинах, измерительный проволочный резистор погружают без всякой изоляции непосредственно в жидкость. При этом, однако, сопротивление измерительного резистора, например никелевого, должно быть достаточно малым, чтобы шунтирование через жидкость не искажало результаты измерений. В этом случае в качестве измерительного резистора используют толстую проволоку небольшой длины в форме спирали. Преобразование тока термометра для измерения сопротивления должно производиться в непосредственной близости от термометра из-за малой величины сопротивления измерительного резистора. Такие термометры имеют время полупоказания порядка 0,03 с.

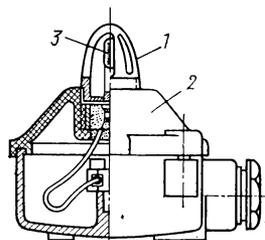


Рис. 3.78. Термометр сопротивления для помещений с нормальной и повышенной влажностью с остеклованным измерительным резистором и минимальным влиянием температуры стен помещения (Degussa): 1 — защитный колпак; 2 — корпус; 3 — измерительный резистор

### 3.2.2.2.7. Формы и конструкция термометров на термисторах

Теплопроводниковые датчики термометров сопротивления изготавливают в форме шайб, стержней или сфер (рис. 3.79) [3.104—3.106]. Порошковую массу

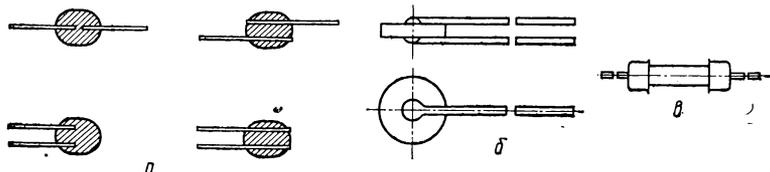


Рис. 3.79. Конструктивные формы термометров сопротивления на термисторах: а — сферическая с различным расположением выводов; б — дискообразная; в — стержневая

смешивают с пластической связкой. Затем из этой массы изготавливают сопротивления: в форме шайб — прессованием на гидравлических прессах с усилием в несколько десятков кН, стержнеобразные — экструзией, сферические — нане-

ением капли массы на проволоочные выводы, например, из платиновой проволоки. После этого сопротивления спекают при высокой температуре. Термисторы сферической формы диаметром 0,2—2,5 мм чаще всего остекловывают. На сопротивления в виде шайб и стержней контакты для соединения наносят путем вжигания серебряной пасты, гальваническим способом или металлизацией напылением. Окончательно сопротивления стабилизируют при нагреве в течение около 1000 ч, в результате чего их временная стабильность достигает 0,2 К [3.107]. Однако и после стабилизации у неостеклованных резисторов может происходить изменение сопротивления из-за нарушения контакта с выводами, из-за трещинообразования или поглощения влаги. Для выявления таких дефектов термисторы включают в уравновешенную мостовую схему. При изменении напряжения питания моста показания не должны изменяться, если при этом не возникает погрешности из-за нагрева термистора в результате чрезмерной токовой нагрузки (см. 3.2.2.4).

### 3.2.2.2.8. Метрологические свойства термисторов

Свойства термисторов определяются не только составом смеси, но также температурой, продолжительностью спекания и химическим составом газов в печи. На свойства оказывают влияние, хотя и в меньшей мере, размеры готового резистора. Обычно термисторы изготавливают с разбросом значений сопротивления на  $\pm 20\%$ , термисторы для измерений — на  $\pm 10\%$  или  $\pm 5\%$  при  $25^\circ\text{C}$ . При других температурах величина разброса значений может отличаться от величины разброса при  $25^\circ\text{C}$ . Резисторы с величиной разброса менее  $20\%$  чаще всего получают отбором от большой партии. Этим методом можно получить термисторы с величиной разброса менее  $1\%$  в диапазоне  $0\text{--}80^\circ\text{C}$  [3.108]. Согласно выражению (3.40) разброс свойств готовой продукции вызван колебаниями значений величин  $A$  и  $B$ . Малые колебания величины  $B$  на  $1\%$  могут вызвать разброс значений сопротивления на  $10\%$ . С повышением температуры этот разброс становится меньше, но он может возрастать из-за колебаний величины  $A$ . Поэтому разброс значений сопротивления термисторов, составляющий при  $25^\circ\text{C}$   $10\%$ , при более высокой температуре существенно возрастает.

### 3.2.2.2.9. Компенсация разброса величины сопротивления и линейаризация характеристики

Чтобы компенсировать отклонения сопротивления термисторов и тем самым получить возможность взаимозаменяемости термометров на термисторах, их комбинируют с независящими от температуры резисторами (рис. 3.80). Одновременно

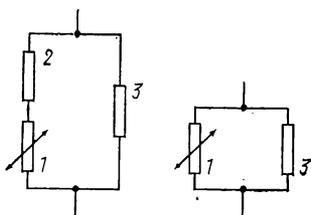


Рис. 3.80. Схема подгонки термометра сопротивления к характеристике другого термометра, а также для линейаризации характеристики с помощью независящих от температуры сопротивлений:

1 — измерительный резистор; 2 и 3 — независящие от температуры сопротивления

более или менее линейаризуется температурная характеристика сопротивления. Для линейаризации характеристики шкалы в ограниченном диапазоне пригодны также специально рассчитанные мостовые схемы [3.97, 3.109, 3.110]. При использовании таких схем компенсации и линейаризации температурный коэффициент безусловно снижается, но почти всегда он остается еще значительно большим, чем у платиновых и никелевых термометров сопротивления.

Параллельное или последовательное подключение дополнительных резисторов к измерительному резистору по схеме рис. 3.80 применяют в тех случаях, если никелевый термометр сопротивления нужно подогнать под градуировку платинового термометра или если нужно линейаризовать его характеристику.

Исходя из условия, что комбинации сопротивлений для трех температур  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  должны быть эквивалентны соответствующим сопротивлениям  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  платинового термометра, получают необходимые для компенсации значения сопротивлений последовательного и параллельного резисторов, а также никелевого измерительного резистора (компенсация в трех точках). Тогда для диапазона температур  $(-40) - 180^\circ\text{C}$  максимальное отклонение от градуировки 100-Ом платинового термометра составляет 0,14 К. Если к никелевому резистору подключить только параллельный резистор, то можно рассчитать компенсацию по двум точкам для температур  $t_1$  и  $t_2$ . В этом случае максимальное отклонение от градуировки платинового термометра составит 1,12 К в том же диапазоне температур.

Линейную характеристику никелевого измерительного резистора получают включением параллельного сопротивления при компенсации по трем точкам  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ . При этом можно рассчитать требуемую величину параллельного сопротивления, результирующее общее сопротивление и температурный коэффициент эквивалентного сопротивления. Для 100-Ом никелевого термометра в диапазоне от  $-40$  до  $180^\circ\text{C}$  получается максимальное отклонение от линейности  $+0,09$  К при температурном коэффициенте  $4,18 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . При использовании такой же схемы можно снизить нелинейность характеристики термометра в диапазоне  $0 - 70^\circ\text{C}$  с 25 до 2,85 К.

Этот простой способ подстройки и линеаризации возможен только в том случае, если сопротивление подстраиваемого термометра возрастает с температурой больше, чем термометра, под который он должен быть подстроен. О схемах линеаризации при использовании метода уравновешенного моста и измерительных преобразователей см. 4.1.2.1.3 и 4.1.2.1.4.

### 3.2.2.2.10. Величина сопротивления термисторов, их применение и нестабильность

Термисторы для измерения температуры изготавливают с сопротивлением от 100 Ом до 300 кОм в соответствии с конкретными условиями применения. Преимущественно используют термисторы с сопротивлением от 1 до 5 кОм. При таких значениях сопротивления результаты измерений не зависят от длины соединительных проводов. Термисторы обычно применяют для измерений в диапазоне температур от  $-50$  до  $180^\circ\text{C}$ , но есть термисторы, работающие до  $450^\circ\text{C}$ .

Благодаря высокому температурному коэффициенту термисторы чаще всего используют в мостовых схемах по методу гальванометра (см. 4.1.2.2.1) как для длительных измерений в виде установочного термометра, так и для кратковременных измерений в виде ручного термометра с переносным измерительным прибором. Последние имеют обычно несколько диапазонов, например  $(-60) - 5^\circ\text{C}$ ,  $(-5) - 70^\circ\text{C}$ ,  $50 - 130^\circ\text{C}$  и  $110 - 210^\circ\text{C}$ . Перед измерением устанавливается рабочее напряжение моста. При температуре помещения  $0 - 50^\circ\text{C}$  его постоянство может поддерживаться с помощью встроенного транзисторного стабилизатора. Только при прецизионных измерениях необходима ручная корректировка небольших отклонений напряжения [3.105].

Для измерений часто используют термисторы сферической формы, помещенные в стеклянные или металлические трубки очень малого диаметра (рис. 3.81). Термисторы, закрепленные в наконечнике тонкой металлической трубки, отличаются очень малой инерционностью, такой же, как у оболочковых термоэлектрических термометров. При измерениях в жидкостях время выхода на половинное от установившегося показание меньше 0,5 с, при измерениях до  $400^\circ\text{C}$  — около 1 с. При измерении температуры поверхностей время установления показаний следует считать несколько больше. При этом, чтобы улучшить условия тепло-

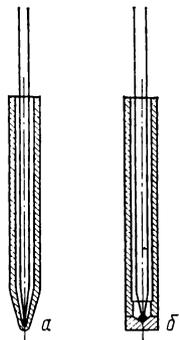


Рис. 3.81. Формы термисторов:

*a* — остеклованный датчик (термистор запаян в стеклянный наконечник); *б* — металлический датчик (термистор заделан в наконечник с помощью замазки или запаян стеклом)

передачи, рекомендуется смазывать наконечник специальной теплопроводной пастой и прижимать термометр к поверхности объекта с достаточным усилием (около 20 Н).

Случайную погрешность измерения при технических кратковременных и длительных измерениях можно считать равной  $\pm 1$  К, при температуре выше  $200^\circ\text{C}$  — около 2 К. С помощью прецизионных термометров можно снизить эту погрешность до 0,2 К в диапазоне  $0\text{--}80^\circ\text{C}$ . Переносные показывающие приборы без дополнительного усилителя могут иметь ширину диапазона измерения  $10^\circ\text{C}$ , самопишущие  $0,3^\circ\text{C}$ .

При расчете измерительных схем особенно необходимо учитывать, что электрическая нагрузка термисторов сферической формы из-за их малых размеров должна быть очень малой, чтобы результат измерений не искажался из-за дополнительного нагрева. Поэтому у термистора диаметром 0,5 мм при нагрузке, составляющей всего лишь  $1/25$  от нагрузки 100-Ом платинового остекленного термометра, получится равная погрешность из-за нагрева [3.71]. Кроме кратковременных измерений, термисторы применяют для производственных и других измерений в том случае, если с их помощью можно без больших затруднений и затрат получить узкий диапазон измерения или малое время установления показаний. В качестве примеров применения термисторов можно указать следующие: измерение чрезвычайно малых градиентов температур (до 0,001 К), медицинские измерения температуры тела людей и животных (определение температуры кожного покрова и труднодоступных мест тела), приемники излучения в пирометрах излучения (см. 9.7.3.2.2), чувствительные элементы температурно-компенсационных схем.

### 3.2.2.2.11. Устройство и применение позисторов

Подобно термисторам позисторы изготавливают в виде сфер, стержней и дисков: Для измерений применяют, как правило, диски диаметром 3—12 мм с выводами, в защитной оболочке. Из-за очень резкого возрастания сопротивления позисторов с температурой их применяют в качестве датчиков температуры в тех случаях, когда они должны выполнять функцию выключателя при определенной

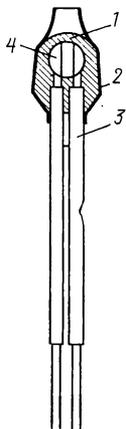


Рис. 3.82. Конструкция термометра на позисторе для защиты электромоторов от перегрева:

1 — заливка из синтетической смолы; 2 — напрессованная трубка; 3 — соединительный провод; 4 — позистор

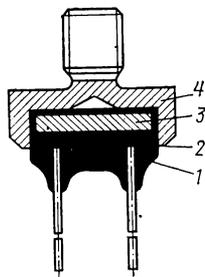


Рис. 3.83. Конструкция винчываемого термометра на позисторе:

1 — заливка из синтетической смолы; 2 — место пайки; 3 — позистор; 4 — шестигранный резьбовой корпус

температуре или в заданном температурном диапазоне, как в устройствах защиты от перегрева деталей машин и особенно обмоток электромоторов [3.112, 3.113].

Цель измерения температуры обладает внутренней защитой, так как коммутирующий прибор (реле) надежно срабатывает не только при достижении допустимой температуры перегрева, но и при обрыве в цепи датчика в результате резкого увеличения сопротивления. Позисторные термометры, предназначенные для защиты электромоторов от перегрева (рис. 3.82), помещают непосредственно между витками обмотки. Позисторы в резьбовом корпусе (рис. 3.83) могут быть ввинчены в корпуса машин или приборов.

При использовании позистора в качестве датчика уровня жидкости, например, в цистернах с мазутом к нему прикладывается сравнительно высокое напряжение, так что подводимая мощность вызывает сильный перегрев позистора на воздухе. Как только датчик погружается в жидкость, его температура понижается вследствие изменения условий охлаждения и он может пропустить сигнал. Как показано на рис. 3.84, с повышением напряжения на позисторе ток возрастает сначала почти линейно. В результате дополнительного нагрева из-за увеличения подводимой мощности при повышении напряжения сопротивление возрастает. Поэтому при неизменной окружающей температуре величина тока после достижения максимума с повышением напряжения опять понижается. При напряжении на позисторе 10 В, т. е. в спадающей части характеристики, ток определяется только температурой датчика и условиями охлаждения. При погружении датчика в воду или масло ток сильно возрастает, при извлечении из жидкости он соответственно снижается. В области спадающей части характеристики ток — напряжение позистор может быть применен в простых схемах термостатирования или для генерирования релаксационных колебаний.

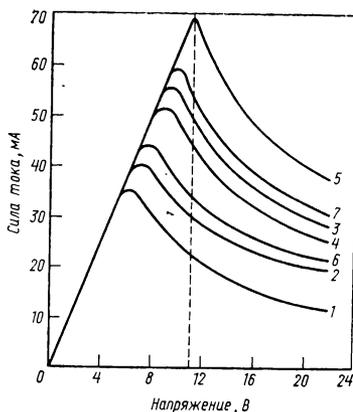


Рис. 3.84. Характеристики позистора ток — напряжение при различных условиях охлаждения:

1 — спокойный воздух, 20° С; 2 — масло «Шелл К 6», 65° С; 3 — масло «Шелл К 6», 25° С; 4 — вода, 65° С; 5 — вода, 25° С; 6 — бензин, 65° С; 7 — бензин, 25° С

### 3.2.2.3. ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ И ЕГО ПОДГОНКА

Как показано на рис. 3.72, головка термометра должна быть соединена проводами с измерительными или регулирующими приборами или с отдельно расположенной измерительной схемой. Поскольку из-за внешних проводов и внутренних соединений термометра сопротивление, подключенное к измерительному прибору, больше, чем сопротивление измерительного резистора термометра, необходимо исключить влияние этого дополнительного сопротивления на результаты измерения. Необходимые для этого мероприятия зависят от степени влияния различных схем соединения, а также от типа схемы измерительного прибора, регистрирующего результаты измерения (рис. 3.85).

Как и при подгонке сопротивления проводов термоэлектрических термометров, сопротивление внешних и внутренних проводов должно быть с помощью подстроечного сопротивления подогнано к заданному значению, положенному в основу юстировки измерительного прибора (рис. 3.86 и 3.87). Сопротивление внешних и внутренних проводов измеряют и с помощью подстроечного сопротивления подгоняют до заданного значения.

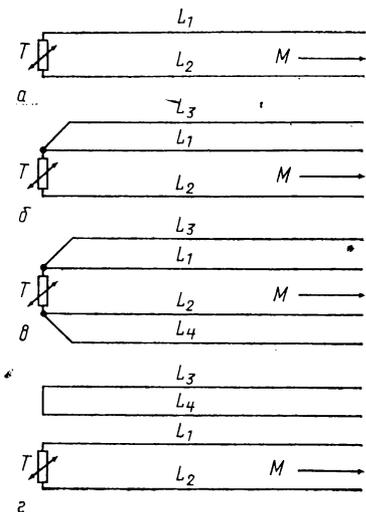


Рис. 3.85. Схемы соединений для термометров сопротивления [3.71] ( $T$  — термометр;  $M$  — выход к измерительному прибору):  
 а — двухпроводная; б — трехпроводная; в — четырехпроводная; г — двухпроводная схема с дополнительной петлей

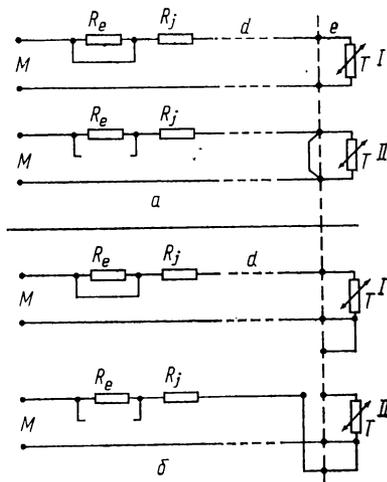


Рис. 3.86. Подгонка двухпроводной линии соединения термометров сопротивления (по VDE/VDI 3511) при двух выводах (а) и при трех выводах (б):  
 I — схема измерения; II — схема подгонки;  $T$  — термометр;  $M$  — выход к измерительному прибору;  $R_j$  и  $R_e$  — подстроечное и эквивалентное сопротивления соответственно

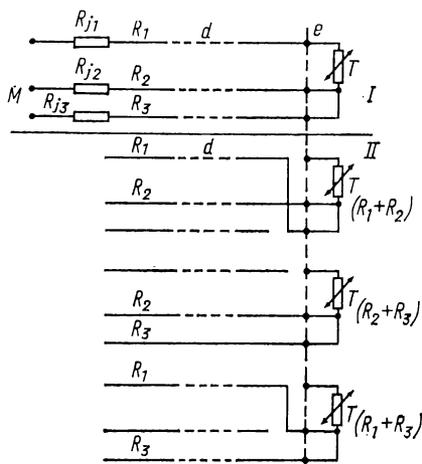


Рис. 3.87. Подгонка трехпроводной линии соединения термометров сопротивления путем попарного определения сопротивления проводов:  
 I — схема измерения; II — схема подгонки;  $R$  — сопротивление выводов и проводов;  $R_j$  — подстроечное сопротивление

### 3.2.2.3.1. Подстройка сопротивления и погрешность измерения при двухпроводной схеме соединения

При двухпроводной схеме соединения (см. рис. 3.85, а), при которой оба внешних и внутренних провода включены в одну ветвь измерительной схемы, например мостовой, суммарное сопротивление обоих проводов настраивается по ДИН 43709 на 10 Ом. Тогда наибольшее возможное удаление термометра сопротивления от измерительного прибора при медном проводе сечением 1,5 мм<sup>2</sup> и измерительном резисторе 100 Ом составляет около 430 м.

Подгонка сопротивления проводов может быть проведена путем измерения их сопротивления омметром или путем сравнительных измерений с помощью датчиков напряжения или технических компенсаторов подобно тому, как это показано на рис. 3.59 для термоэлектрических термометров. Однако вместо термопары концы проводов подключены к замкнутым накоротко клеммам термометра сопротивления.

При юстировке технических установок обычно к проводам подключают вместо термометра эквивалентное ему сопротивление, называемое также образцовым сопротивлением (испытательным резистором). Величина этого сопротивления соответствует определенной температуре (см. рис. 3.86, а). Подстроечное сопротивление изменяют до тех пор, пока показание измерительного прибора не будет равно температуре, на которую рассчитано образцовое сопротивление. Соединительные медные провода из-за изменения их сопротивления с температурой вызывают дополнительную погрешность, если их средняя температура отличается от их средней температуры при юстировке.

При неправильной подгонке погрешность измерения ( $K$ ) независимо от величины диапазона измерительного прибора приблизительно составляет величину

$$f \approx - \frac{R_{Ls} - R_{Lsf}}{R_0 \alpha}, \quad (3.44)$$

где  $R_{Ls}$  — номинальное заданное сопротивление;  $R_{Lsf}$  — неправильно подогнанное (фактическое) сопротивление внешних и внутренних проводов;  $R_0$  — номинальное сопротивление термометра при 0°С;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления измерительного резистора.

Пр и м е р. Платиновый термометр,  $R_0 = 100$  Ом,  $\alpha_0 = 100 = 3.85 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>,  $R_{Ls} = 10$  Ом,  $R_{Lsf} = 9$  Ом.

$$f = -1/0,385 = -2,6 \text{ К.}$$

Таким образом, действительная температура равна показанию термометра плюс 2,6 К.

Если средняя температура проводов отличается от температуры при подгонке сопротивления цепи на  $\Delta t$  и это приводит к изменению их сопротивления на  $\Delta R_L$ , то обусловленная этим относительная погрешность, отнесенная к диапазону измерения  $t_2 - t_1$ , равна отношению изменения сопротивления проводов  $\Delta R_L$  к изменению сопротивления термометра  $R_{t_2} - R_{t_1}$ :

$$f_{\text{rel}} = \frac{\Delta R_L}{R_{t_2} - R_{t_1}} = \frac{R_L \alpha_L \Delta t}{R_0 \alpha_T (t_2 - t_1)}. \quad (3.45)$$

Так как

$$f_{\text{rel}} = \Delta t / (t_2 - t_1) = f / (t_2 - t_1),$$

то абсолютная погрешность  $f$ , К, равна

$$f = \frac{R_L \alpha_L \Delta t}{R_0 \alpha_T} \approx \frac{R_L}{R_0} \Delta t, \quad (3.46)$$

если  $\alpha_L$  приблизительно равен  $\alpha_T$ . В этих выражениях  $\alpha_L$  и  $\alpha_T$  — температурные коэффициенты сопротивления медных проводов (при их средней температуре)

и термометра сопротивления соответственно [3.114]. Предположим, например, что приблизительное равенство (3.46) относится к платиновому термометру сопротивления. Тогда при изменении температуры медных проводов с сопротивлением 10 Ом на 10 К погрешности измерения платинового термометра с сопротивлением 100 Ом при не слишком высокой температуре независимо от диапазона измерения приближенно равна  $(10 \cdot 10/100) \text{ К} = 1 \text{ К}$ . Для 100-Ом никелевого термометра благодаря его более высокому температурному коэффициенту  $\alpha_T$  погрешность составляет только  $2/3$  от погрешности платинового термометра. Из уравнений (3.45) и (3.46) видно, что относительная погрешность снижается с увеличением диапазона измерения и обе погрешности снижаются с увеличением сопротивления измерительного резистора  $R_0$ . Погрешности измерения тем меньше, чем больше номинальное сопротивление термометра.

Погрешность из-за влияния сопротивления проводов может быть существенно снижена, если разместить мостовую схему в непосредственной близости от измерительного резистора, например в соединительной головке. При включении чувствительного измерительного прибора или усилителя в диагональ моста часто можно использовать для соединения с измерительным прибором длинные провода, пренебрегая подгонкой их сопротивления.

При двухпроводной схеме с дополнительной петлей проводов (см. рис. 3.85, з), в которой два провода ведут от термометра к измерительной ветви, а концы петли — к эталонной ветви симметричного самоуравновешивающегося моста, результаты измерения не зависят от длины проводов и колебания их температуры, если сумма сопротивлений проводов  $L_3$  и  $L_4$  равна сумме сопротивлений проводов  $L_1$  и  $L_2$ . Так как уже небольшая разница приводит к ошибке, необходима тщательная подгонка сопротивлений соединительных проводов и петли (см. также рис. 4.11).

При описанных способах уравновешивания двухпроводной схемы не учитывается влияние внутренних проводов. Вызываемая ими погрешность зависит от материала выводов, от их размеров, а также от их средней, чаще всего только приблизительно оцениваемой температуры. При коротких выводах погрешность обычно незначительна и ею можно пренебречь. При большой длине сопротивление выводов надо рассчитывать или оценивать отдельно, например по табл. 3.16. Сопротивление выводов часто указывают на термометрах, например на измерительных вставках по ДИН 43762. При этом выводы изготавливают из материалов с малым температурным коэффициентом сопротивления так, что колебанием температуры выводов почти всегда можно пренебречь. После подгонки сопротивления проводов подстроечное сопротивление должно быть уменьшено на величину измеренного или указанного на термометре сопротивления выводов. Это можно сделать также при юстировке, при этом в процессе подгонки с помощью эквивалентного сопротивления показания термометра устанавливаются не на заданную температуру  $t_E$ , а на более низкую. При сопротивлении выводов  $R_1$  настройку следует производить на температуру  $t = t_E - R_1/(\Delta R_t/K)$ , если  $\Delta R_t/K$  — изменение сопротивления измерительного резистора на каждый 1 К, например 0,385 для платинового термометра при  $100^\circ \text{ С}$ .

Т а б л и ц а 3.16

**Удельное сопротивление выводов и его изменение с температурой**

Материал	Удельное сопротивление при $0^\circ \text{ С}$ , Ом · мм <sup>2</sup> /м	Коэффициент изменения сопротивления с температурой, $^\circ \text{ С}$				
		0	200	400	600	800
Серебро .	0,016	1,000	1,82	2,70	—	—
Медь .	0,017	1,000	1,86	—	—	—
Никель . .	0,09	1,000	2,50	4,85	5,88	6,75
Константан .	0,5	1,000	0,996	0,994	1,024	—
Хромель .	0,7	1,000	1,086	1,175	1,248	1,304

Чтобы погрешность при неизвестном сопротивлении выводов была не слишком большой, рекомендуется применять термометры с тремя выводами от измерительного резистора к соединительной головке и производить совместную подстройку соединительных проводов и выводов, как показано на рис. 3.86, б.

### 3.2.2.3.2. Подстройка сопротивления и погрешность измерения при трех- и четырехпроводной схемах

При трехпроводной схеме (см. рис. 3.85, б) от соединительной головки термометра идет по одному проводу к измерительной и эталонной ветви измерительной схемы. Третий провод идет к диагональной ветви симметричной мостовой схемы или к источнику тока схемы сравнения (см. 4.1.2.2). При трехпроводной схеме для каждого из соединительных проводов и выводов задают значения сопротивления (по ДИН 16160, лист 5). Обычно оба провода  $L_1$  и  $L_2$ , ведущие к измерительному и регулируемому плечам моста, подстраивают до номинальных заданных значений с помощью подстроечных сопротивлений. При использовании мостовой схемы с низкоомным измерительным прибором должен быть подстроен и третий провод  $L_3$ , включенный в диагональ моста. Если сопротивление выводов термометра слишком велико, необходимо также учитывать погрешность, обусловленную сопротивлением выводов (сопротивление выводов величиной 0,4 Ом вызывает погрешность 1 К).

В симметричных уравновешенных схемах изменение температуры соединительных проводов не вызывает погрешности, так как сопротивление проводов изменится на одну и ту же величину. В неуравновешенных схемах, в крайних положениях погрешность из-за температурного изменения сопротивления линии на каждые 10 Ом может быть определена по рис. 4.14 или 4.16 из приведенных в разделе 4.1.2.1.3 примеров расчета 1 или 2. Для диапазона температур 0—100°С погрешность, К, в крайнем положении (100°С) при изменении средней температуры проводов на 10 К, соответствующем изменению сопротивления на 0,4 Ом, равна:

$$\text{Пример 1: } f = -\frac{0,8 \cdot 0,4}{10} = -0,03.$$

$$\text{Пример 2: } f = -\frac{0,4 \cdot 0,4}{10} = -0,015.$$

По сравнению с двухпроводной схемой при той же величине погрешности из-за температурного изменения сопротивления линии трехпроводная схема допускает значительно большее удаление измерительного прибора от термометра и сопротивление соединительных проводов может достигать в некоторых случаях 400 Ом.

В технических схемах для полного уравновешивания чаще всего применяют потенциометр. Если он включен в регулируемое плечо моста, то на результат измерения оказывают влияние переходные сопротивления шлейфа. Однако изменение температуры проводов не вызывает погрешности измерений.

Если подгонку сопротивления соединительной линии проводят путем трехкратного попарного измерения (см. рис. 3.87), то одновременно получают величину сопротивления выводов. Сопротивление отдельных проводов и соответствующих выводов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  вычисляют из измеренных значений сопротивлений  $a$ ,  $b$  и  $c$ :

$$R_1 = (a + c - b)/2; \quad R_2 = (a + b - c)/2; \quad R_3 = (b + c - a)/2. \quad (3.47)$$

При четырехпроводной схеме (см. рис. 3.85, в), которую используют для очень точных измерений температуры с мостом Мюллера или при измерении методом компенсации напряжения (см. 4.1.2.1), два провода, например  $L_3$  и  $L_4$ , служат токопроводами и два,  $L_1$  и  $L_2$  — для снятия напряжения. При компенсационном методе измерения разница в сопротивлении отдельных проводов и изме-

нение их сопротивления с температурой не влияют на результаты, если и к измерительному резистору ведут четыре вывода. Подгонка сопротивлений отдельных проводов при этой схеме не нужна.

### 3.2.2.4. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОТ РАЗОГРЕВА

Подводимая к термометру сопротивления электрическая мощность  $I^2R$  превращается в тепло, в результате чего измерительный резистор термометра дополнительно нагревается. Превышение температуры термометра по сравнению с температурой окружающей среды, т. е. погрешность от подогрева  $E$ ,  $K$ , зависит не только от подводимой мощности, но и от конструкции термометра, включая арматуру, и от условий теплопередачи от измерительного резистора к измеряемому объекту (см. 7.4) [3.115, 3.116].

Критерием оценки погрешности термометра сопротивления от нагрева служит мощность, необходимая для повышения температуры термометра в стационарном режиме на 1 К (мВт/К) и называемая константой теплоотвода или константой разогрева  $A$ .

Из уравнения

$$AE = I^2R_t = U^2/R_t$$

получаем величину тока  $I$  (мА), вызывающую погрешность  $E$ :

$$I = \sqrt{AE/R_t}$$

и приложенное при этом к термометру напряжение  $U$  (мВ):

$$U = \sqrt{AER_t},$$

где  $R_t$  — сопротивление термометра при температуре измеряемого объекта  $t$ . Погрешность от нагрева при константе теплоотвода  $A$  равна

$$E = I^2R_t/A = kI^2R_t, \quad (3.48)$$

где  $k = 1/A$ .

Таким образом, погрешность от разогрева пропорциональна квадрату силы тока  $I$  и сопротивлению термометра  $R_t$ .

Для металлических термометров целесообразно задать нормируемую величину погрешности от разогрева  $E_n$ , которую устанавливают для измеряемой среды при токе термометра  $I_n$ , равном 10 мА, и номинальном сопротивлении термометра  $R_{t_0}$ , например при 100 или 500 Ом. Погрешность от разогрева  $E$  термометра с сопротивлением  $R_t$  при температуре  $t$ , отнесенная к  $E_n$ , равна:

$$E/E_n = (I/I_n)^2 R_t/R_{t_0} = (I/10 \text{ мА})^2 R_t/R_{t_0}. \quad (3.49)$$

Отсюда можно вычислить допустимый ток  $I$  термометра при температуре  $t$  при известной допустимой погрешности от разогрева  $E$ . При постоянном токе термометра  $I$  погрешность возрастает пропорционально номинальному сопротивлению. В этом случае при постоянной погрешности от разогрева допустимый ток  $I$  должен быть меньше.

Погрешность от разогрева в данной среде определяют экспериментально по изменению показания при постоянной температуре и увеличению тока термометра. Если при изменении тока  $I$  на величину  $nI$  показание изменяется на  $\Delta t$ , то погрешность [3.71] будет равна

$$E = \Delta t/(n^2 - 1). \quad (3.50)$$

Для 100-Ом платинового термометра при токе термометра 10 мА погрешность от разогрева  $E_p$  в зависимости от конструкции составляет: на воздухе 0,06—1 К, в воде 0,02—0,4 К.

Разница погрешностей при измерении в воде и на воздухе особенно велика (до 0,9 К) у неармированных термометров или у термометров, защищенных только тонкой, хорошо подогнанной трубкой — оболочкой. У сильно армированных термометров, например у измерительных вставок в защитных чехлах, эта разница меньше (примерно 0,3—0 К), так как вследствие различия условий теплопередачи погрешность в воде становится меньше, на воздухе же, наоборот, должна возрасти.

Об определении погрешности из-за разогрева в любых средах указано в 7.4.

### 3.2.2.5. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ПРЕДЕЛЫ

1. Наиболее важное условие правильного измерения температуры с помощью термометра сопротивления — возможно лучшая электрическая изоляция всех деталей установки, прежде всего измерительного резистора и соединительных проводов, так как при малых изменениях сопротивления, особенно у металлических термометров, электрическое шунтирование может привести к значительной погрешности. Поэтому сопротивление изоляции линии должно быть не менее 10 МОм. Нормы изоляции силовых установок здесь недостаточны. Керамические изолирующие трубки, служащие изоляторами для выводов, из-за плохой изоляции при высокой температуре могут приводить к шунтированию и ошибочным показаниям. Так как сопротивление изоляции измерительного резистора при высокой температуре снижается из-за сильно возрастающей с температурой проводимости твердого стекла или материала керамического каркаса, при максимальной допустимой температуре термометра сопротивление изоляции не должно снижаться ниже 100 кОм. Снижение сопротивления изоляции может происходить также вследствие поглощения влаги. Поэтому, чтобы не допускать конденсации влаги во внутреннем объеме термометра, при измерениях температуры ниже 0° С защитную трубку или головку термометра заливают заливочной массой типа парафина.

2. Допустимые отклонения металлических термометров сопротивления можно найти в табл. 3.15, разброс параметров термисторов указан в 3.2.2.2. От предельной погрешности или допустимого отклонения следует отличать погрешность отдельного термометра. Эта погрешность может быть определена путем снятия характеристики температура — сопротивление.

3. Погрешности из-за неправильной подгонки сопротивления соединительной линии и выводов и из-за влияния температуры указаны в 3.2.2.3.

4. Недопустимо большой погрешности из-за разогрева резистора можно избежать путем правильного расчета параметров схемы. Особенное внимание следует обращать на то, чтобы потребление тока не было слишком большим. При точных измерениях температуры эту погрешность следует учитывать уже при подгонке сопротивления проводов.

5. Колебания напряжения сети в обычных пределах при измерении по методу уравновешенного моста (см. 4.1.2.1.2) не оказывают влияния на результаты. При измерении методом неуравновешенного моста необходимо поддерживать постоянное напряжение питания моста; логометрические схемы не требуют стабилизации напряжения. При измерении компенсационными методами (см. 4.1.2.1.1) необходимо точно выдерживать допустимую полную нагрузку стабилизаторов напряжения, питающих измерительные мосты, особенно в том случае, если последовательно включено несколько термометрических установок.

6. Соединительную линию термометра нельзя прокладывать вместе с сетевыми проводами, чтобы избежать наводок, искажающих результаты измерения.

7. Погрешности из-за монтажа и стабильность во времени описаны в 7.1 и 7.3.

8. Дополнительно следует учитывать погрешность и предельные погрешности сопряженных показывающих, записывающих и регулирующих приборов, а также компенсационных приборов и измерительных усилителей (см. 4.1).

### 3.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 3.3.1. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КРАСКИ, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, ТЕРМОБУМАГА<sup>1</sup>

##### 3.3.1.1. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КРАСКИ

При измерении температуры с помощью термочувствительных красок используют их свойство изменять цвет при изменении температуры. У некоторых красок изменение цвета происходит непрерывно, так что температуру можно определить путем сравнения с цветовой шкалой (диапазон температур 120—400° С) [3.118а, 3.118б]. Предпочтение, однако, отдают краскам, которые резко изменяют цвет при одной или нескольких температурах и затем сохраняют его при обратном переходе температуры через точку цветоизменения. Изменение цвета является, таким образом, признаком достижения или превышения определенной температуры. Существуют термочувствительные краски как однократного, так и многократного (например, «Термоколор») использования для диапазона от 40 до 1350° С. Краски на основе синтетических смол после разбавления спиртом наносят на поверхность с помощью кисти или распылением. Смена цвета зависит от скорости и длительности нагрева. Приведенные в табл. 3.17 температуры соответствуют продолжительности термического воздействия 30 мин. Табл. 3.18 иллюстрирует зависимость изменения цвета (температуры перехода) некоторых термочувствительных красок от продолжительности термического воздействия. Точка перехода при равной длительности нагрева воспроизводится с точностью около 5%. Водяной пар, углекислый газ, аммиак и некоторые другие газы сдвигают температуру перехода [3.119].

Термочувствительные краски могут быть поставлены и многими другими изготовителями в градации, аналогичной приведенной в табл. 3.17. В последнее время появились термочувствительные краски под названием Merckens-Thermocolor W в атмосферостойком исполнении [3.119]. Термочувствительный лак в химических установках выполняет две функции: защита от коррозии и контроль температуры (при нанесении на грунтовку — цинковую пудру).

##### 3.3.1.2. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КАРАНДАШИ

Краски в виде термочувствительных карандашей используют для быстрого определения температуры поверхности. Краску можно нанести в виде штрихов как наносят штрихи кусочком мела. Уже через 1—2 с после нанесения штриха происходит изменение его цвета, сохраняющееся в течение длительного времени. Такие термокарандаши, как «Термохром» (табл. 3.19), изготавливают для диапазона 65—670° С с градацией в 50 К или до 870° С с равномерной градацией [3.119].

Термокарандаши особенно удобны для быстрого контроля температуры, тогда как термочувствительную окраску применяют преимущественно для исследования распределения температуры (изотермическая фотография) на большой поверхности. Таким образом можно быстро определить распределение температуры на блоке двигателя, цилиндрах и поршнях двигателей внутреннего сгорания, на радиаторах и подшипниках всевозможных машин, а также обмоток и катушек, находящихся под током. Этот метод пригоден также для контроля сварки. Очень просты измерения распределения температуры на стенках теплообменников и паропроводов, плавильных, термических, шахтных печей, печей для эмалирования и газогенераторов. Но важнее всего то, что этим способом

<sup>1</sup> Более полные сведения приведены в книге Абрамовой Б. Г., Картавцева В. Ф. Цветовые индикаторы температуры. М.: «Энергия», 1978—216 с. ил. (Прим. ред.)

## Т а б л и ц а 3.17

## Термочувствительные краски и карандаши

А. Краски с однократным переходом — «Термоколор» <sup>1</sup>		Б. Краски с дву-, трех- и четырехкратным переходом «Термохром» <sup>1</sup>	
№ краски	Изменение цвета	Температура перехода, °С	№ краски
1	розовый/голубой	40	20
2	светло-зеленый/голубой	60	
2а	розовый/голубой	80	
2б	розовый/светло-фиолетовый	95	
3	желтый/фиолетовый	110	
4	темно-красный/голубой	140	
4а	бирюзовый/черный	165	
5	белый/коричневый	175	
6	зеленый/коричневый	220	
7	желтый/красно-коричневый	290	
8	белый/коричневый	340	
9	зеленый/белый	440	
10	красный/светло-серый	520	
11	красный/желтый	560	
12	желтый/светло-зеленый	640	
13	желтый/оливковый	715	
13а	желтый/коричневый	805	
14	серый/темно-коричневый	900	
15	зеленый/коричневый	1000	
16	светло-голубой/синевато-черный	1100	
17	серый/темно-коричневый	1200	
17б	светло-серый/коричневый	1260	
18	серо-желтый/черный	1350	
			21
			22
			23
			25
			29
			30
			31
			32
			33
			34
			40
			41

<sup>1</sup> Изготовитель — Badische Anilin- und Sodafabrik, Людвигсхафен.

Т а б л и ц а 3.18

**Влияние продолжительности нагрева на температуру перехода термокрасок «Термоколор»**

Номер краски	Температура перехода, °С, при продолжительности нагрева									
	5 с	10 с	20 с	30 с	1 мин	10 мин	20 мин	30 мин	1 ч	2 ч
2	100	90	81	76	70	65	62	60	59	58
3	140	136	125	123	116	114	112	110	108	106
4	210	205	195	175	160	150	144	140	138	137
4а	185	180	178	176	172	170	165	165	165	160
5	195	190	185	182	180	177	176	175	174	174
6	260	250	240	235	230	225	220	220	219	216
7	315	310	300	295	293	292	291	290	280	275
8	405	390	375	365	350	344	342	340	320	300
9	490	475	460	455	450	445	442	440	440	435

Т а б л и ц а 3.19

**Термокарандаши «Термохром»<sup>1</sup>**

Номер термокарандаша	Изменение цвета	Температура перехода, °С
2815/65	фиолетовый/светло-зеленый	65
2815/75	розовый/зеленый	75
2815/100	розовый/голубой	100
2815/120	зеленый/оливковый	120
2815/150	светло-зеленый/фиолетовый	150
2815/200	зеленый/черный	200
2815/280	»	280
2815/300	зеленый/оливковый	300
2815/350	коричневый/оранжевый	350
2815/450	розовый/черный	450
2815/500	оранжевый/черный	500
2815/600	голубой/белый	600
2815/670	серый/белый	670

<sup>1</sup> Изготовитель — А. W. Faber, Нюрнберг.

можно легко определять температуру движущихся частей машин, вращающихся печей и т. д., в то время как определение температуры другими методами представляет значительные трудности. Краски используют также для контроля температуры отпуска, процессов нагрева и охлаждения. Если краску нанести на детали, можно определить достижение заданной температуры и распределение температуры внутри сушильных и нагревательных печей. Наконец, можно применять термокраски в качестве сигнальной окраски везде, где не должна быть превышена определенная температура.

### 3.3.1.3. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

В последнее время для термотопографии нашли применение жидкие кристаллы. Речь при этом идет о жидкостях, которые могут приобретать анизотропию физических свойств кристаллов. Например, холестериновые фазы избирательно

отражают белый свет, причем отражаемая компонента света зависит от следующих условий: 1) температуры; 2) химического состава; 3) механического напряженного состояния; 4) угла падения светового потока и направления наблюдения; 5) влияния электрических и магнитных полей.

При наблюдении в направлении нормали на черной подложке такой слой жидкого кристалла при повышении температуры показывает, например, следующую последовательность цветов: красный, желтый, зеленый, голубой, фиолетовый. При переходе через точку осветления цвета исчезают. При этом возникает изотропный расплав, который не отличается от обычных жидкостей. Так как цветоизменение происходит в очень узком интервале температур, можно, например, сделать видимой температуру кожи человеческого тела в интервале от 31 до 33° С. Локальные изменения температуры кожи могут указывать на болезненное состояние организма. В табл. 3.20 представлены некоторые жидкие кристаллы, пригодные для термотографии. Для исключения внешних воздействий (например, растворителей) в последнее время жидкие кристаллы выпускают герметично упакованными в микрокапсулы. Благодаря этому достигаются высокая стабильность свойств при хранении и лучшая воспроизводимость результатов измерений [3.120, 3.121].

Т а б л и ц а 3.20

Температуры перехода и осветления жидких кристаллов  
(по каталогу фирмы RIEDEL—DE—Naen 3016, Зеельц-Ганновер)

Номер	Жидкий кристалл	Температура перехода, °С	Температура осветления, °С
36301	Холестерилолеат $C_{45}H_{60}O_2$	38	49
36302	Холестерилпеларгонат $C_{36}H_{62}O_2$	76	92
36303	Холестерилкапринат $C_{37}H_{64}O_2$	82	90
36304	Холестерилбензоат $C_{34}H_{50}O_2$	148	179
36305	Холестерилхлорид $C_{27}H_{46}Cl$	62	96
36307	Холестерилметилкарбонат $C_{29}H_{48}O_3$	109	114
36308	Холестерил-4-карбометоксиокси- бензоат $C_{36}H_{52}O_5$	127	274
36309	Холестерил-4-циано-циннамат $C_{37}H_{51}NO_2$	163	274
36310	Холестерил-4-этокси-бензоат $C_{36}H_{54}O_3$	147	263
36311	Холестерил-4-(2,2-этоксиэтокси- карбэтоксокси)-бензоат $C_{41}H_{62}O_7$	58 148 *	194
36312	Холестерил-4-(2,2-этоксиэтокси- карэтоксокси)-циннамат	52 115 *	220

\* Точка перехода от смектовой к холестериновой фазе.

### 3.3.1.4. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ БУМАГА

Для предохранения электронных деталей от перегрева были разработаны сорта бумаги, известные под названиями «Темптэйп», «Темплэйт» и т. п.; и специальные пластинки, которые изменяют свой цвет при достижении определенной заданной температуры. Эти пластинки просто наклеивают на транзисторы, диоды, радиаторы; в случае выхода аппаратуры из строя они указывают, что соответствующие детали были термически перегружены [3.122, 3.123].

При металлографических исследованиях минимальная температура может быть установлена по рекристаллизационным явлениям. Хромкобальтовые сплавы дают возможность определения температуры от 500 до 900° С по цветам побежалости с градацией примерно 25 К (изготовитель — General Electric Corp., Schenectady, США).

### 3.3.2. ПИРОСКОПЫ

#### 3.3.2.1. КОНУСЫ ЗЕГЕРА

Пироскопами называют тела, которые под действием температуры изменяют свою внешнюю форму или физические свойства, например твердость. Наиболее известными являются конусы Зегера, которые широко применяют в керамической промышленности, причем температуру в них определяют по размягчению керамической массы. Кроме температуры, на размягчение оказывают влияние также продолжительность и скорость процесса нагрева. За точку отсчета температуры принимают момент, когда опускающаяся вершина конуса касается его основания. С помощью конусов с указанными в табл. 3.21 условными номерами можно правильно определять соответствующие температуры только в одинаковых условиях испытаний.

Т а б л и ц а 3.21

Средние значения температуры плавления конусов Зегера

№	°C	№	°C	№	°C	№	°C	№	°C	№	°C
022	600	012a	855	02a	1060	9	1280	19	1520	34	1750
021	650	011a	880	01a	1080	10	1300	20	1520	35	1770
020	670	010a	900	1e	1100	11	1320	26	1580	36	1790
019	690	09a	920	2a	1120	12	1350	27	1610	37	1825
018	710	08a	940	3e	1140	13	1380	28	1630	38	1850
017	730	07a	960	4a	1160	14	1410	29	1650	39	1880
016	750	06a	980	5a	1180	15	1435	30	1670	40	1920
015a	790	05a	1000	6a	1200	16	1460	31	1690	41	1960
014a	815	04a	1020	7	1230	17	1480	32	1710	42	2000
013a	835	03a	1040	8	1250	18	1500	33	1730		

#### 3.3.2.2. ТЕЛА ПЛАВЛЕНИЯ

Кроме конусов, используют так называемые плавкие тела. В низкотемпературной области применяют органические вещества с постоянной точкой плавления. В области высоких температур применяют чаще всего металлы и сплавы, которые при достижении точки плавления вследствие гравитации и поверхностного натя-

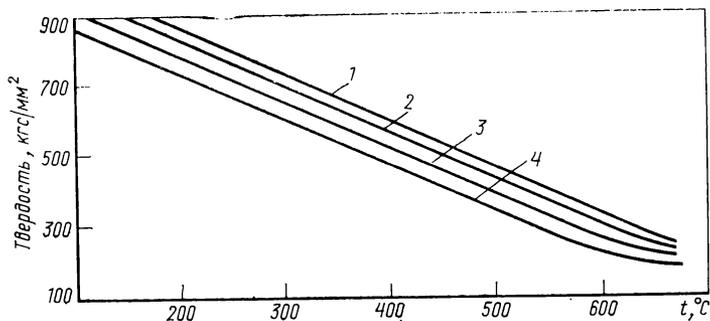


Рис. 3.88. Типичные градуировочные кривые для материала «Темплаг» при продолжительности воздействия температуры, ч:

1 — 1; 2 — 10; 3 — 100; 4 — 1000

жения теряют свою первоначальную форму. Во многих случаях на свойства плавких тел оказывает влияние окружающая атмосфера. Это влияние можно исключить, если тела герметизировать при определенных условиях, например запайкой в кварцевые ампулы [3.124—3.126].

Разработан материал под названием «Темплаг», который под действием температуры изменяет свою твердость. Изготавливают его чаще всего в виде маленьких винтов и используют в диапазоне 100—900° С. Его твердость в указанном диапазоне изменяется в соотношении 1 : 4. Изменение твердости зависит не только от температуры, но и от длительности ее воздействия (рис. 3.88) [3.127].

### 3.3.3. ЕМКОСТНЫЕ, ИНДУКТИВНЫЕ И МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 3.3.3.1. ЕМКОСТНЫЙ МЕТОД

Диэлектрическая постоянная большинства изоляторов с температурой изменяется и может быть использована для измерения температуры. Наиболее пригодными для этой цели являются триглицинсульфат и барийстронциевый титанат при температурах выше их точек Кюри. Зависимость диэлектрической постоянной  $\epsilon = f(t)$  электрических материалов от температуры выше точки Кюри подчиняется закону Кюри — Вейсса. Применительно к емкости конденсатора она имеет вид

$$C = \frac{K_\epsilon}{T - T_c}, \quad (3.51)$$

где  $K_\epsilon$  — постоянная;  $T$  — температура;  $T_c$  — температура точки Кюри.

Ферроэлектрические материалы более подходят для температурных измерений, чем полимеры, так как в них практически отсутствуют гистерезисные явления. На рис. 3.89 показана температурная характеристика керамического конденсатора с барийстронциевым титанатом в качестве диэлектрика, температура точки Кюри которого равна примерно  $-50^\circ$  С. Для измерения температуры эти конденсаторы включают вместе с индуктивностью в колебательный контур, резонансная частота  $f_0$  которого зависит от температуры

$$f_0 = K_r (T - T_e)^{1/2}, \quad (3.52)$$

где  $K_r$  — константа. Возможно измерение температуры подвижных деталей, например вращающихся валков, без контактных колец, так как колебательный контур может быть подключен к измерительному прибору через трансформатор. При использовании схемы с обратной связью колебания практически всегда происходят с резонансной частотой колебательного контура, причем резонансная частота зависит от параметров трансформатора [3.128].

#### 3.3.3.2. ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД

Для измерения температуры можно использовать зависящее от температуры изменение индуктивности. Чтобы исключить влияние внешних полей, температурно-чувствительную индуктивность выполняют в виде катушки с тороидальным

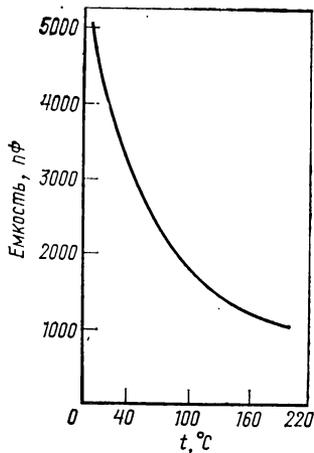


Рис. 3.89. Температурная характеристика керамического конденсатора с диэлектриком из барийстронциевого титаната

сердечником из сплава викаллой (52% кобальта, 10,5—14% палладия, остальное железо или 12% хрома, 52% кобальта, 36% железа). Магнитный момент этого материала после закалки в воде или масле увеличивается практически линейно при понижении температуры. Приведенная на рис. 3.90 кривая показывает относительное изменение частоты колебательного контура с такой катушкой индуктивности в зависимости от температуры.

Резонансная частота контура при комнатной температуре лежит между 1 и 2 МГц. При соответствующей схеме и стабильности осциллятора точность измерения в области низких температур может достигать  $10^{-2}$  К. При этом, безусловно, нужно экранировать измерительную катушку от магнитных помех [3.129].

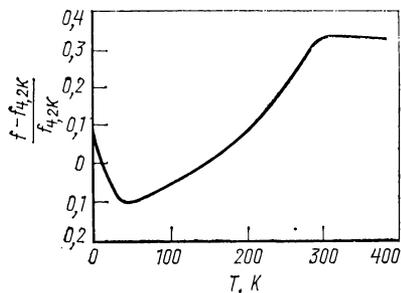


Рис. 3.90. Относительное изменение частоты (относительно 4,2 К) колебательного контура с катушкой на тороидальном сердечнике из сплава 52% Co, 36% Fe, 12% Cr

Сама точка Кюри может быть использована для измерения и регулирования температуры. Прежде всего существует возможность использования очень сильного изменения магнитных свойств в точке Кюри в простом и дешевом двухпозиционном регуляторе. Например, можно изготовить паяльник, наконечник которого состоит из железоникелевого сплава, покрытого медью. Наконечник находится в поле небольшого постоянного магнита и удерживает якорь до тех пор, пока не будет достигнута температура точки Кюри. При достижении точки Кюри якорь, не удерживаемый магнитом, падает и разрывает цепь нагревателя. При охлаждении сердечника его магнитные свойства

в точке Кюри изменяются. Якорь снова притягивается и включает ток нагревателя. Такие приборы очень удобны в электронике и работают чрезвычайно надежно. Так как мощность нагревателя выбирается с запасом, можно уверенно проводить пайку с резко различным расходом тепла [3.130].

Нейтронное облучение влияет как на температуру точки Кюри, так и на остаточную намагниченность ферромагнитных материалов. Если подвергнуть намагниченные металлические детали (индикаторы), например, из сплавов Cu—Ni, Pd—Ni, Cr—Fe, Fe—Ni, Si—Fe или Pd—Fe нейтронному облучению, то их магнитные свойства изменятся в зависимости от того, какова была температура детали во время облучения — выше или ниже точки Кюри соответствующего сплава [3.131].

Модуль упругости металлов и кристаллов также зависит от температуры. Поэтому резонансная частота механических колебаний — величина, зависящая от температуры, и может быть использована для температурных измерений. Так, в США был разработан термометр для глубоководных измерений, у которого измеряемой величиной служила резонансная частота колебаний алюминиевой шайбы. При частоте 36 кГц чувствительность термометра составляла около 11 Гц/К. Очень точные измерения температуры можно выполнить также, используя в качестве колеблющегося тела кварц (см. 4.2.3.2).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

1. Grundmann, W.: Flüssigkeitsthermometrie, Glasinstrumentenkunde 2. Bd. Weimar 1941.
2. Heuse, W.; Guecksilberthermometer, Präzisionsmessungen. Arch. techn. Messen, J212—1 Okt. 1943; Flüssigkeitsthermometer. Arch. techn. Messen, J212—2 Jan. 1950; Eigenschaften und Bauarten der Flüssigkeitsthermometer. Arch. techn. Messen 212—3 Febr. 1952.
3. Rahlf, P.; Blanke, W.; Flüssigkeits—Glasthermometer-PTB-Prüfregeln 14.01—67. Berlin 1967.
4. Eichordnung der Bundesrepublik und des Landes Berlin, veröffentlicht im Bundesgesetzblatt.
5. Eichanweisung, Allgemeine Vorschriften—EAAV—, veröffentlicht im Amtsblatt der Physikalisch—Technischen Bundesanstalt (PTB).

- 3.6. *Thompson, R. D.*: Recent development in liquid-in-glass thermometry. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 1, New York and London, 1962, S. 201—218.
- 3.7. *Hall, J. A.; Leaver, V. M.*: Stabilisation of thermometers of borosilikate glass for use at high temperatures. J. sci. Instrum. 38 (1961), S. 178—185.
- 3.8. *Moser, H.*: Über Quecksilber-Thallium-Legierungen und ihre Anwendung für thermometrische Zwecke. Phys. Z. 37 (1936), S. 885—886; ferner: *Ehrenreich, J.*: Mercury-Thallium Thermometers. Instrum. and Automation 27 (1954), S. 1070—1072.
- 3.9. *Grundmann, W.*: Zum Problem der Schaffung exakt anzeigender gefärbter Flüssigkeitsthermometer zeitlicher Konstanz. Z. techn. Phys. 15 (1934), S. 119—126.
- 3.10. *Beckmann, E.*: Modifikationen des Thermometers für die Bestimmung von Molekulargewichten und Kleinen Temperaturdifferenzen. Z. phys. Chem. 51 (1905), S. 329—343.
- 3.11. *Pemperton, L. H.*: Further consideration of emergent column correction in mercury thermometry. J. sci. Instrum. 41 (1964), s. 234—236.
- 3.12. *Wuest, W.*: Temperaturmessung mit Federthermometern. Arch. techn. Messen V 211—1 Juli 1943.
- 3.13. *Scholz, W.*: Quecksilber-Federthermometer. Z. Messen—Steuern—Regein 5 (1962), S. 415—421 und 514—518.
- 3.14. *Closterhalten, A.*: Dempfzustandsmesser und Wärmeinhaltsmesser. Z. VDI 82 (1938), S. 45—48.
- 3.15. *Winkler, O.*: Temperaturmessung. In Hengstenberg, J., Sturm, B. und Winkler, O.: Messen und Regeln in der Chemischen Technik. 2. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1964.
- 3.16. *Heuse, W.*: Bimetallthermometer. Arch. techn. Messen J, 211—1 Juli 1950.
- 3.17. *Vakuumschmelze AG, Hanau*: Firmendruckschriř Thermobimetalle FS-B2 (1960), ferner: *Engstler, D.*: Thermobimetall. Arch. techn. Messen Teil I Z 972—3, Okt. 1972; Teil II Z 972—4, Nov. 1972.
- 3.18. *Kebbon, E. R.*: Bimetall thermometers. Instrum. Control Systems 34 (1961), S. 341—345.
- 3.19. *Karsten, A.*: Das Torsionsstufenfeder—Thermometer. Z. Instrum. Kde, 54 (1934), S. 274—277.
- 3.20. **Normen für Ausdehnungsthermometer DIN 12 770. 4. 70 Laborgeräte; Flüssigkeits—Glasthermometer allgemeine Bestimmungen.**  
**DIN 12 770 4.70 Laborgeräte; Flüssigkeits-Glasthermometer, allgemeine Bestimmungen**
- |            |       |  |
|------------|-------|--|
| DIN 12 771 | 9.71  | Kalorimeter-Einschlußthermometer, Meßbereichsspanne 6° C   |
| DIN 12 775 | 4. 75 | Laborthermometer, Skalenwerte, 0,1° C, 0,2° C und 0,5° C   |
| DIN 12 776 | E5.75 | Allihn-Thermometersatz   |
| DIN 12 777 | E5.75 | Anschütz-Thermometersatz   |
| DIN 12 778 | E7.71 | Laborthermometer, Skalenwerte 1° C und 2° C  |
| DIN 12 779 | 3.71  | Destillations-Thermometer  |
| DIN 12 780 | 5.49  | Hochgradige Thermometer  |
| DIN 12 781 | 5.49  | Laboratoriums-Stockthermometer   |
| DIN 12 784 | 4.55  | Bl.1 Thermometer mit Normschliff, Destillations-Thermometer (eichfähig)  |
| DIN 12 784 | 2.63  | Bl. 2 Thermometer mit Normschliff, Kolben-Thermometer (eichfähig)  |
| DIN 12 785 |       | Thermometer für Mineralöl- und Brennstoffprüfung   |
|            | 10.58 | Bl.1 Thermometer für Siedeverlauf, eichfähig   |
|            | 10.58 | Bl.2 — zum Flamm punktprüfer nach Abel—Pensky, eichfähig   |
|            | 10.58 | Bl.3 — zum Flamm punktprüfer nach Pensky-Martens, eichfähig  |
|            | 10.58 | Bl.4 — zum Engler-Viskosimeter, eichfähig  |
|            | 10.58 | Bl.5 — zum Vogel—Ossag—Viskosimeter, eichfähig   |
|            | 10.58 | Bl.6 — zur Bestimmung des Erstarrungspunktes, eichfähig  |
|            | 7.62  | Bl.7 — zum Flamm punktprüfer nach Marcusson, eichfähig   |
|            | 10.62 | Bl.8 — zur Bestimmung des Anilinpunktes, eichfähig   |
|            | 8.62  | Bl.9 — zur Bestimmung des Trübungspunktes — und Stockpunktes, eichfähig  |
| DIN 12 786 | 3.55  | Einschlußthermometer für wärmewirtschaftliche Untersuchungen   |
| DIN 12 787 | 6.58  | Thermometer-Nippel für Thermometer zur Mineralöl — und Brennstoffprüfung   |
| DIN 12 789 | 1.72  | Beckmannthermometer; Einstell—Einschlußthermometer   |
| DIN 12 799 | 3.71  | Allgebrauchs-Stabthermometer   |
| DIN 10 295 | 11.64 | Thermometer u. Gefrieröhre zur Bestimmung des Gefrierpunktes von Milch   |
| DIN 11 857 | 7.57  | Zeigerthermometer für milchwirtschaftliche Maschinen; Hauptmaße und Ausführung   |
| DIN 11 859 | 9.54  | Temperaturfühler für Fernthermometer und Regler für milchwirtschaftliche Maschinen, Hauptmaße und Ausführung                             |
| DIN 13 100 | 5.70  | Bl. 1 Medizinische Quecksilber-Glasthermometer; Fieberthermometer, Veterinärthermometer (Einschlußthermometer), Hauptmaße, Anforderungen |
| DIN 16 159 | 12.68 | Maschinen-Glasthermometer; Übersicht   |
| DIN 16 167 | 12.68 | Maschinen-Glasthermometer; gerade, Oberteil rund, Nenngröße 160, Zusammenstellung und Stückliste   |

- DIN 16 168 12.68 Maschinen-Glasthermometer; winklig 90°, Oberteil rund, Nenngröße 160, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 169 12.68 Einzelteile für Maschinen-Glasthermometer; Nenngröße 160, gerade und winklig, Oberteil rund
- DIN 16 170 12.68 Bl. 1 Thermometereinsätze für Maschinen Glasthermometer; Nenngröße 160°, gerade und winklig, Oberteil rund  
12.68 Bl.2. Thermometereinsätze für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 160°, Teilung und Bezifferung der Skalen
- DIN 16 174 12.68 Maschinen-Glasthermometer; gerade, Oberteil rund, Nenngröße 250, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 175 12.68 Maschinen-Glasthermometer; winklig 90°, Oberteil rund, Nenngröße 250, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 176 12.68 Maschinen-Glasthermometer; winklig 135°, Oberteil rund, Nenngröße 250, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 177 12.68 Einzelteile für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 250, gerade und winklig, Oberteil rund
- DIN 16 178 12.68 Bl.1 Thermometereinsätze für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 250, gerade und winklig, Oberteil rund  
12.68 Bl.2 Thermometereinsätze für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 250, Teilung und Bezifferung der Skalen
- DIN 16 179 E6.74 Einschraubstutzen und Schutzrohre für Maschinen—Glasthermometer mit 10mm Tauchrohrdurchmesser
- DIN 16 180 E5.73 Einschraubstutzen und Schutzrohre für Maschinen—Glasthermometer mit 12mm Tauchrohrdurchmesser
- DIN 16 181 11.66 Maschinen-Glasthermometer, gerade; Oberteil V-Form, Nenngröße 110, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 181 11.66 Maschinen—Glasthermometer, gerade; Oberteil V-Form, Nenngröße 110, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 182 11.66 Maschinen-Glasthermometer, winklig 90°, Oberteil V-Form, Nenngröße 110, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 183 11.66 Einzelteile für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 110, gerade und winklig, Oberteil V-Form
- DIN 16 184 11.66 Thermometereinsätze für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 110, gerade und winklig Oberteil V-Form
- DIN 16 185 11.66 Maschinen-Glasthermometer, gerade; Oberteile V-Form, Nenngröße 150, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 186 11.66 Maschinen—Glasthermometer, winklig 90°, Oberteil V-Form, Nenngröße 150, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 187 11.66 Einzelteile für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 150, gerade und winklig, Oberteil V-Form
- DIN 16 188 11.66 Thermometereinsätze für Maschinen—Glasthermometer; Nenngröße 150, gerade und winklig, Oberteil V-Form
- DIN 16 189 11.66 Maschinen-Glasthermometer, gerade; Oberteile V-Form, Nenngröße 200, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 190 11.66 Maschinen-Glasthermometer, winklig 90° Oberteil V-Form, Nenngröße 200, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 191 11.66 Maschinen-Glasthermometer, winklig 135°; Oberteil V-Form, Nenngröße 200, Zusammenstellung und Stückliste
- DIN 16 192 11.66 Einzelteile für Maschinen-Glasthermometer; Nenngröße 200, gerade und winklig, Oberteil V-Form
- DIN 16 193 11.66 Thermometereinsätze für Maschinen-Glasthermometer; Nenngröße 200, gerade und winklig, Oberteil V-Form
- DIN 16 194 11.66 Teilung und Bezifferung der Maschinen-Glasthermometer; V-Form Nenngröße 110, 150 und 200
- DIN 58 653 8.60 Meteorologische Geräte; Minimum-Thermometer
- DIN 58 654 8.60 —; Maximum-Thermometer
- DIN 58 655 8.60 —; Erdboden-Thermometer 20 bis 310 mm
- DIN 58 660 10.66—; Thermometer 370 für Psychrometer
- DIN 58 661 10.66 —; — 280 für Psychrometer
- DIN 58 664 1.68 Meteorologische Geräte; Erdboden-Tiefenthermometer, 500 mm und 1000 mm
- DIN 75 575 1.72 Fernthermometer für Kraftfahrzeuge
- DIN 1 715 7.63 Thermobimetalle
- 3.21. *Finch, D. I.*: General principles of thermoelectric thermometry. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. 111, Part 2 New York and London, 1962, S 3—32.
- 3.22. *Obrowski, W.*: Thermolemente und ihre Anwendungsprobleme. Elektro-Techn. 16 (1964), S. 266—270.
- 3.23. *Dahl, A. J.*: The stability of base-metal thermocouples in air from 800 to 2200° F. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. 111, Part 1 New York and London: 1962, S. 1238—1266.
- 3.24. *Thomas, H.*: Gesichtspunkte bei der Auswahl und Verwendung elektrischer Temperaturfühler. Industrieblatt, Beiheft Härtereitechnik und Wärmebehandlung 3 (1957), Nr. 2HT, S. 9—14.
- 3.25. *Fenton, A. W.*: Errors in thermoelectric thermometers. Proc. IEE 116 (1969), S. 1277—1285.
- 3.26. *Vanoor, H.*: Stand und Entwicklungstendenzen der Temperaturmessung, mit Thermolementen. VDI-Berichte Nr. 198 Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1973, S. 81—91.

- 3.27a. *Potts, J.; McElroy, D. L.*: The effects of cold working, heat treatment, and oxidation on the thermal emf of nickelbase thermoelements. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 243—264.
- 3.27b. *Freeman R. J.*: Thermoelectric stability platinum vs platinum-rhodium thermocouples. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 201—220.
- 3.28. *Beduhn, M.; Heyne, W.*: Ein Präzisions-PtRh-Pt-Thermoelement für Forschung und Industrie. Feingeräte-techn. 16 (1967), S. 254—260.
- 3.29. *Ehringer, H.*: Über die Lebensdauer von PtRh-Thermoelementen. Metall 8 (1954), S. 596—598.
- 3.30a. *Dittierich, K.*: Probleme bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen. Z-VDI 103 (1961), S. 875—879.
- 3.30b. *Vanoor, H.*: Spezielle Probleme bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen oberhalb 1500° C. Ber. d. Deutsch. Keram. Gesellsch. 40 (1963), S. 615—619.
- 3.31. *Samsonow, G. W.; Kitz, A. I.; Lach, W. J.*: Betriebszuverlässigkeit von Widerstandsthermometern und Thermoelementen. Teil 1: Grundbegriffe und Klassifizierung der Ausfallursachen. Teil 2: Der Sprungausfall von Temperaturfühhlern. Teil 3: Der Drittausfall von Temperaturfühhlern. VDI-Z. 112 (1970), Teil 1: S. 79—82, Teil 2: S. 353—357; Teil 3: S. 1149—1154.
- 3.32. *Obrowski, W.*: Thermoelemente, unedle Thermopaare. Arch. techn. Messen J 241—6 Aug. 1961.
- 3.33. *Caldwell, F. R.*: Thermocouple materials. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 81—134.
- 3.34. *Browning, W. E.; Miller, C. E.*: Calculated radiation induced changes in thermocouple composition. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 271—276.
- 3.35. *Schröder, R.*: Thermoelektrische Leiter Neutronenbestrahlung. Atompraxis 10 (1964), S. 276—278.
- 3.36. *Kelly, J. M.; Johnston, W. W.; Baumann, C. D.*: The effects of nuclear radiation on thermocouples. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London 1962, S. 265—269.
- 3.37. *Obrowski, W.*: Thermoelemente, edle Thermopaare. Arch. techn. Messen J 241—5 Jan. 1958.
- 3.38. *Walker, B. E.; Ewing, C. T.; Miller, R. R.*: Thermoelectric instability of some noble metal thermocouples at high temperatures. Rev. sci. Instrum. 33 (1962), S. 1029—1040, sowie Study of the instability of noble metal thermocouples in vacuum. Rev. sci Instrum. 36 (1965), S. 601—606.
- 3.39. *Wasan, V. P.; Gupta, C. L.*: Thermocouples for high temperature measurement. Engelhard Technic. Bull. Bd. 8 (1967), Nr. 3 S. 77—92.
- 3.39a. *Zysk, E. D.; Robertson, A. R.*: Newer thermocouple materials. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. IV, Part III, Pittsburgh 1973, S. 1697—1734.
- 3.40. *Obrowski, W.; Prinz, W.*: Neu bestimmte Grundwerte für die Thermopaarkombination Pt30%Rh—Pt6%Rh. Eisenhüttenwes. 33 (1962), S. 1—4.
- 3.41. *Bedford, R. E.*: Reference tables for platinum 40% Rhodium/Platinum 20% Rhodium thermocouples. Rev. sci. Instrum. 36 (1965), S. 1571—1580.
- 3.42. *Blackburn, G. F.; Caldwell, F. R.*: Reference tables for 40% Iridium — 60% Rhodium versus Iridium Thermocouples. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 161—175.
- 3.43. *Reichardt, F. A.*: Measurement of high temperatures under irradiation conditions. The use of molybdenum-platinum thermocouples. Platinum metals Rev. 7 (1963), H. 7, S. 122—125.
- 3.44. *Israel, J.*: A study of the thermoelectric properties of Pt-Ru alloys. J. Nucl. Mater. 18 (1966), S. 272—277.
- 3.45. *Olsen, L. O.; Freeze, P. D.*: Reference tables for the Platinel II thermocouples. J. Res. Nat. Bur. Standards 68C (1964), Nr. 4, S. 263—281.
- 3.46. *Goedecke, W.*: Thermoelektrische Temperaturmessung bis 2000° C. Chem. Fabrik 5 (1932), S. 361—364.
- 3.47. *Lachmann, J. C.; McCarty, J. A.*: The use of refractory metals for ultra high-temperature thermocouples. Temperature, its measurements and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 177—187.
- 3.48. *Walker, B. E.; Ewing, C. T.; Miller, R. R.*: Instability of refractory metal thermocouples. Rev. sci. Instrum. 36 (1965), S. 816—825.
- 3.49. *Franks, E.*: High-temperature thermocouples using nonmetallic members. Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London, 1962, S. 189—194.
- 3.50. *Samsonow, G. W.; Kisly, P. S. (Самсонов Г. В., Кислый П. С.)*: Nicht-metallene Thermopaare und Schutzrohre. Teil 1: Werkstoffe und ihre Eigenschaften. VDI-Z. III (1969), S. 1337—1342. Teil 2: Einsatz in der Industrie. VDI-Z. III (1969), S. 1706—1712.
- 3.51. *Shepard, R. L.; Pattin, H. S.; Westbrook, R. D.*: High temperature boron graphite thermocouple. Bull. Am. Phys. Soc. 1 (1956), S. 119.
- 3.52. *Filterer, G. R.*: A new thermocouple for determining temperatures up to least 1800° C. Trans. Amer. Inst. Mech. Engrs. 105 (1933), S. 290—301.
- 3.53. *Bertodo, R. J.*: Thermocouple for the measurement of gas temperatures up to 2000° C. Proc. Inst. Mech. Engrs. 177 (1963), S. 603—614.
- 3.54. *Kröckell, O.*: Ein neues Thermoelement für Hochtemperaturmessungen. Silikattechn. 11 (1960), S. 108—111.

- 3.55. *Vanvor, H.*: Messen tiefer Temperaturen mit Widerstandsthermometern und Thermolementen. Meßtechnik 5 (1969), S. 111—121.
- 3.56. *Powell, R. L.*; *Caywood, L. P.*; *Bunch, M. D.*: Low-temperature thermocouples. Temperature, its measurements and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York and London 1962, S. 65—77.
- 3.57. *Berman, R. Brock, J. C. F.*; *Huntley, D. J.*: Properties of gold + 0,03% (at) Iron thermolements between 1 and 300 K and behavior in a magnetic field. Cryogenics 4 (1964), S. 233—239.
- 3.57a. American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard temperature-electromotive force (EMF) tables for thermocouples. Designation E 230—72.
- 3.57b. *Sparks, L. L.*; *Powell, R. L.*; *Hall, W. J.*: Reference tables for low-temperature thermocouples. Nat. Bur. Stand. (U. S.), Monograph 124, June 1972.
- 3.58. *Lewitzky, M. A.*; *Lukomsky, M. A.*: Das Thermolement Te/Bi und seine praktischen Anwendungen. Phys. Z. 30 (1929), S. 203—205.
- 3.59. *Lange, B.*; *Heller, W.*: Tellur-Thermolemente. Phys. Z. 30 (1929), S. 419—425.
- 3.60. *Cartwright, C. H.*: General theory, design and construction of sensitive vacuum thermopiles. Rev. Sci. Instrum. 1 (1930), S. 592—604.
- 3.61. *Rosenthal, G.*: Über den Bau eines hochempfindlichen Thermolements für Strahlungsmessung. Z. Instr. Kde. 59 (1939), S. 432—439 und 457—463.
- 3.62. *Weiss, H.*: Bestimmung der effektiven Massen in InAs aus Messungen der Differentiellen Thermospannung. Z. Naturforsch. 11 (1956), S. 131—138.
- 3.63. *Sannes, T.*: Mantelthermolemente. VDI-Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 95—102; ferner VDI-Z 110 (1968), S. 1239—1244.
- 3.64. *Vanvor, H.*: Mantelthermolemente. Electrowelt 10 (1965), S. 498—499.
- 3.65. *Busse, H.*: Stand und Probleme der Temperaturmessung in der Eisenhüttenindustrie. VDI-Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 63—72.
- 3.66. *Henning, P. G.*: Temperaturmessungen an Kunststoffverarbeitungsmaschinen. VDI-Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 133—135.
- 3.67. *van Leeuwen, Jr. J.*: Beherrschen von Massetemperaturen beim Extrudieren thermoplastischer Kunststoffe. Kunststoffe 55 (1965), S. 491—499.
- 3.68. *Linneman, H.*: Temperaturmessung an Turbinen und Generatoren. VDI-Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 129—132.
- 3.69. *King, W. H.*; *Camilli, C. T.*; *Findeis, A. F.*: Thin film thermocouples for differential thermal analysis. Anal. Chem. 40 (1968), S. 1330—1335.
- 3.70. *Dahlberg, R.*: Über die Grenzen der Meßbarkeit kleiner Temperaturdifferenzen und Wärmengen, dargestellt an einer Theorie der Thermoemission. Z. Naturforsch. 10a (1955), S. 953—970.
- 3.71. *Hunsinger, W.*: Temperaturmessung. In Flügge, S.: Handbuch der Physik Bd. 23, Berlin, Heidelberg, New York 1966, S. 373—456.
- 3.72. *Fintinaru, N.*: Determinarea erorilor cauzate de Intrebuintarea gresita a cablurilor termoelectrice de prelungire (Die Bestimmung der durch falsche Benutzung der thermoelektrischen Verlängerungskabel hervorgerufenen Fehler.). Metrologia aplicata 10 (1963), S. 202—205.
- 3.73. *Hunsinger, W.*: Temperaturmessung mit Thermolementen, der Einfluß der Vergleichstemperatur und seine Berichtigung. Arch. techn. Messen J 2402—2 und 3 März und April 1958.
- 3.74a. *Roth, H.*; *Walz, H.*: Nullpunkt-Thermostat für Thermolemente. Siemens-Z. 41 (1967), S. 539—541.
- 3.74b. *Ausbuettel, E.*: Normalelement-Thermostat mit Peltier-Heizung und Kühlung. PTB-Mitt. 1974; 1, S. 12 bis 13.
- 3.75. *Feldmann, C. L.*: Automatic ice-point thermocouple reference junction Instr. Control Systems 38 (1965), S. 101—103.
- 3.76. *Schmidt-Pathmann, W.*: Nullpunktthermostat. Glas-u. Instrum. Techn. 9 (1965), S. 561, 562, 565.
- 3.77. Siemens-Mitteilung: Hochstabiles, preiswertes Temperatur-Normal. Arch. techn. Messen. Lieferung 442 Nov. 1972, S. R 195.
- 3.78. *Becker, H.*; *Zlermann, A.*: Zur Temperatur-Kompensation des Vergleichstelleneinlusses in Gleichstrombrücken. Arch. techn. Messen J 023—6 Febr. 1958.
- 3.79. *Euler, H.*; *Guthmann, K.*: Fehler bei der Temperaturmessung mit Thermolementen. Hinweise für den praktischen Gebrauch von Thermolementen und Schutzrohren. Arch. Eisenhüttenwes. 9 (1935/36), S. 73—90.
- 3.80. *Lieneweg, F.*: Temperaturmessung in Handbuch der technischen Betriebskontrolle, Bd. 3 Physikalische Meßmethoden, 3. Auflage Leipzig 1959, S. 162—376.
- 3.81. *Lieneweg, F.*: Meßfehler von Thermometern, ihre Kontrolle, Prüfung und Beseitigung. Feinwerktechnik 56 (1952), S. 325—332.
- 3.82. *Hunsinger, W.*: Richtlinien für die Installation von Temperatur-Meß- und Regelanlagen. Feinwerktechn. 56 (1952), S. 198—204.
- 3.83. *Fintinaru, N.*: Determinarea erorilor ce apar la conectarea a doua milivoltmetre pirometrice in paralela in singur termocuplu (Die Bestimmung der Fehler bei der Parallelschaltung zweier Millivoltmeter an ein einziges Thermolement. Metrologia aplicata 12 (1965), S. 54—61. Ebenso: Erreurs dues aux conditions de realisation des mesures, Cas de deux milivoltmetres en parallele sur un seul thermocouple. Mesures (1968), S. 121—127.
- 3.84. *Kunze, A.*: Thermolementbruchsicherungen für elektrische fallbügelbetätigte Reglergeräte. Arch. techn. Messen J062—19 Nov. 1941.
- 3.85. *Samal, E.*: Genauigkeit betriebsmäßiger Temperaturmessungen mit Thermolementen. ETZ, Ausg. B8 (1956), S. 197—202.
- 3.86. *Schweyer, K.*: Temperaturmessung und verteilung bei der Wärmebehandlung in elektrisch beheizten Versuchsofen. Stahl und Eisen 83 (1963), S. 1162—1169.

- 3.87. *Schweyer, K.*: Fehler isolierten Nichtedelmetall-Thermopaare in oxidierender und reduzierender Atmosphäre. Stahl und Eisen 86 (1966), S. 262—277.
- 3.88. *Middlehurst, J.*; *Board, P. W.*; *Elbourne, R. G. P.*: Electrochemical effects in thermocouples. J. Sci. Instrum. 41 (1964), S. 676—678.
- 3.89. *Rasquin, W.*: Fehlmessungen mit Thermoelementen bei hoheren Temperaturen in elektrisch beheizten Öfen, Elektrowärme 22 (1964), S. 78—82.
- 3.90. *Berry, R. J.*: Platinum resistance thermometry in the range 630—900° C. Metrologia 2 (1966), S. 80—90.
- 3.91. International Organization for Standardization, ISO/TC 124 (Secretariat proposal for Industrial Platinum resistance thermometer elements, Juni 1968, London.
- 3.92. Organisation Internationale de Metrologie legale, OIML—P3; Thermometres electriques a resistance de Platine-Cuivre-Nickel a usages techniques, 1971.
- 3.93. *Langlands, R. C.*: A stable copper resistance thermometer for field use J. Sci. Instrum. 41 (1964), S. 478.
- 3.94. *Slas, F. R.*; *Macintyre, J. R.*; *Hansen, A.*: A tungsten resistance thermometer. Trans. AIEE 73 (1954) Part 1, S. 66—69.
- 3.95. *Hahn, H.*: Thermistoren. Hamburg, R. v. Deckers Verlag 1965. Ferner Halbleiter-Meßfühler in Theorie und Praxis. Messen + Prüfen (1970), S. 125—132 und S. 211—218.
- 3.96. *Ruthemann, G.*: Heißleiter, Wesen und Wirkungsweise. ETZ-B7 (1955), S. 217—221.
- 3.97. *Blrr, H.*: Vorteile und Grenzen der Temperaturmessung mit Halbleiterwiderständen. Z. Messen, Steuern, Regeln 5 (1962), S. 215—221.
- 3.98. *Heywang, W.*: Der Verlauf des komplexen Widerstandes von BaTiO<sub>3</sub>—Kaltleitern als Bestätigung des Sperrschicht—Modells. Z. angew. Phys. 16 (1963), S. 1—5.
- 3.99. *Brauer, H.*; *Fenner, E.*: Kaltleiter — ein Bauelement mit positiven Temperaturkoeffizienten. Siemens—Z. 38 (1964), S. 369—375. Ferner Kaltleiter, ein keramisches Bauelement mit grobem positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes. Keramische Z. 12 (1964), S. 766—770.
- 3.100. *McNamara, A. G.*: Semiconductor diodes and transistors as electrical thermometers. Rev. sci. Instrum. 33 (1962), S. 330—333.
- 3.101. *Höhne, W.*: Anwendung von Halbleiterdioden als Temperaturfühler. Z. Messen, Steuern, Regeln 6 (1963), S. 472—478.
- 3.102. *Riva, G.*: Siliziumtransistoren als Temperaturaufnehmer. Elektronik 16 (1967), S. 317—319.
- 3.103. *Kolb, F.*; *Trenkler, G.*: Mechanische und elektrische Eigenschaften von Nutzenwiderstandsthermometern. ETZ A 91 (1970), S. 336—338.
- 3.104. *Raudszus, O.*: Berührungsthermometer auf Halbleiterbasis. VDI—Berichte Nr. 112; Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 89—94.
- 3.105. *Lotzer, W.*: Betriebserfahrungen mit tragbaren Temperaturmeßgeräten mit Kontaktfühlern. Haus der Technik—Vortragsveröffentlichungen Heft 218 (1969), S. 24—36, Vulkan—Verlag Essen.
- 3.106. Valvo—Druckschrift: Temperaturabhängige Widerstände (NTC, PTC). Hamburg 1967.
- 3.107. *Schleicher, S.*: Eigenschaften und Anwendung der temperaturabhängigen oxidischen Halbleiterwiderstände. Nachrichtentech. 11 (1961), S. 71—73.
- 3.108. *Knauer, H.*: Temperaturmessungen höchster Empfindlichkeit und ihre Anwendungen. Haus der Technik—Vortragsveröffentlichungen Heft 218 (1969), S. 5—11, Vulkan—Verlag Essen.
- 3.109. *Cole, K. S.*: Thermistor thermometer bridge: Linearity and sensitivity for a range of temperature. Rev. Sci. Instrum. 28 (1957), S. 326—328.
- 3.110. *Braun, M.*: Linearisierung in der Wheatstoneschen Brücke am Beispiel der Temperaturmessung mit Heißleitern. Z. angew. Phys. 18 (1964), S. 9—13.
- 3.111. *Lieneweg, F.*: Angleichung von Widerstandsthermometern an andere Eichreihen. Arch. techn. Messen J 222—2 Dez. 1949.
- 3.112. *Hanke, L.*; *Löbl, H.*: Eigenschaften und Anwendungen keramischer Kaltleiter. Z. Instrum. Kde. 73 (1965), S. 89—96. Ferner: Der keramische Kaltleiter als Meßwiderstand. VDI-Z110 (1968), S. 1234—1238.
- 3.113. *Keiser, H.*: Kaltleiter für den Übertemperaturschutz. Siemens-Z. 42 (1968), S. 793—796.
- 3.114. *Lieneweg, F.*: Temperaturmessung. In Handbuch der technischen Betriebskontrolle, Bd. 3, Physikalische Meßmethoden, 3. Aufl. Leipzig 1959, S. 162—376.
- 3.115. *Leineweg, F.*: Der Erwärmungsfehler von Widerstandsthermometern. Arch. techn. Messen J 023—4 Okt. 1949.
- 3.116. *Leineweg, F.*: Die Bestimmung von Temperaturmeßfehlern mittels Thermometer—Kennzahlen. Allgem. Wärmetechn. 2 (1951), S. 238—249.
- 3.117. Normen für elektrische Thermometer
- |            |       |  |
|------------|-------|--|
| DIN 43 710 | 4.61  | Thermospaltungen und Werkstoffe der Thermopaare            |
| DIN 43 712 | 8.75  | Thermodrähte für Thermopaare                               |
| DIN 43 713 | E9.68 | Ausgleichsdrähte und — Litzen                              |
| DIN 43 714 | 12.63 | Ausgleichsleitungen für Thermolemente                      |
| DIN 43 720 | 8.63  | Metallene Schutzrohre für Thermolemente                    |
| DIN 43 724 | 7.66  | Keramische Scheutzrohre und Halteringe für Thermolemente   |
| DIN 43 725 | 11.66 | Isolierrohre für Thermopaare                               |
| DIN 43 729 | 1.64  | Anschlußköpfe für Thermolemente und Widerstandsthermometer |
| DIN 43 732 | 6.64  | Thermolemente für Thermolemente                            |
| DIN 43 733 | 6.64  | Übersicht über gerade Thermolemente                        |

- DIN 43 734 4.53 Thermolemente und Widerstandsthermometer, Anschlagflansche
- DIN 43 735 6.64 Meßeinsätze für Thermolemente
- DIN 43 760 9.68 Grundwerte der Meßwiderstände für Widerstandsthermometer
- DIN 43 762 6.64 Meßeinsätze für Widerstandsthermometer
- DIN 43 763 3.64 Metallene Schutzrohre für Thermolemente und Widerstandsthermometer
- DIN 43 764 6.64 Rauchgas—Thermolemente und—Widerstandsthermometer Form A
- DIN 43 765 6.64 Einschraub—Thermolemente und—Widerstandsthermometer Form B
- DIN 43766 6.64 Einschraub—Thermolemente und Widerstandsthermometer Form C
- DIN 43 767 6.64 Einschweiß—Thermolemente und—Widerstandsthermometer Form D
- DIN 43 769 6.64 Thermolemente und Widerstandsthermometer mit Meßeinsätzen ohne zusätzliches Schutzrohr
- DIN 43 770 6.64 Übersicht über gerade Thermolemente und Widerstandsthermometer
- DIN 43 701 2.75 Elektrische Schalttafel—Meßinstrumente, Technische Lieferbedingungen Bl. 1 Allgemeine Bedingungen Bl. 3 Meßinstrumente zu elektrischen Thermometern
- DIN 43 782 E11.73 Selbstabgleichende Kompensationsmeßgeräte Bl. 1 Allgemeine Anforderungen Bl. 2 Besondere Anforderungen an Meßgeräte mit elektrischem Abgleich
- DIN 44 070 E12.73 Temperaturabhängige Widerstände; Heißleiter, Technische Lieferbedingungen.
- 3.118a. *Penzig, F.*: Sichtbarmachen von Temperaturfeldern durch temperaturabhängige Farbanstriche. VDI—Zeitung 83 (1939), Nr. 3, S. 29
- 3.118b. *Guthmann, K.*: Temperaturmeßfarben und Meßfarbstifte. Arch. techn. Messen V 215—3 Dez. 1943 und V 215—4 Juli 1947.
- 3.119. *Zimmler, A.*: Anwendungsgebiete der flächenmäßigen Temperaturbestimmung nach den Farbumschlagverfahren. Vortragsveröffentlichung Haus der Technik Nr. 218 (1969), S. 12—20.
- 3.120. *Ferguson, J. L.*: Liquid Crystals in Nondestructive Testing. Applied Optics 7 (1968), Nr. 9, S. 1729—1737.
- 3.121. Prospekt der Firma National Register Kassen GmbH, 89 Augsburg, Ulmer Straße.
- 3.122. Prospekt der Firma Duval u. Co., Bremen, Contrescarpe 46.
- 3.123. Prospekt der Firma. W. Wahl Corp., Santa Monica, Californien, 1001 Colorado Ave.
- 3.124. *Fröhlich, K. W.*: Temperaturüberwachung mit Temperaturkennkörpern. Werkst. u. Betrieb 83 (1950), H. 6, S. 1—2.
- 3.125. *Presser, K. H.*: Die Messung von Temperaturen mit Miniatur—Schmelzkörpern unter Ausnutzung der Gravitationskraft im Bereich von 30 bis 327° C. Arch. techn. Messen V 2164—3 (1963), S. 45—48.
- 3.126. *Presser, K. H.*: Die Messung von Temperaturen mit Miniatur—Schmelzkörpern unter Ausnutzung der Oberflächenspannung im Bereich von 780° C bis 1555° C Arch. techn. Messen V. 2164—2 (1962), S. 101—106.
- 3.127. Prospekt der Firma Shell Research Co. Ltd., Thornton Research Centre, P. O. Box 1, Chester, England.
- 3.128. *Takami, K., Matsuura, K.*: Capacitance Thermometer for Rotator. Rev. Sci. Instr. 37 (1966), Nr. 11, S. 1505—1510.
- 3.129. *Willens, D. H.; Buchter, E.*: Inductance Thermometer. Rev. Sci. Instr. 39 (1968), Nr. 2, S. 194—196.
- 3.130. Prospektunterlagen der Firma Weller 7122 Besigheim, Postfach 140.
- 3.131. *Merth, W.; Stözl, D.; Sizmann, S.*: Magnet. Verfahren zur Messung der Maximaltemperatur in Bestrahlungsproben. Kerntechnik 8 (1966), H. 5, S. 208—210.

## **4. АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Температура может быть представлена или в виде электрических величин, таких как напряжение, сопротивление, частота, или непосредственно термомпарами и термометрами сопротивления, или через вспомогательные устройства, такие как резистивные датчики манометрических термометров. Эти сигналы, каждый из которых может иметь любую величину, непосредственно или после соответствующего преобразования с помощью аналоговых приборов, таких как стрелочные приборы, самописцы или регуляторы, представляют собой значение температуры.

Отсчет температуры можно производить с помощью цифровых измерительных приборов; при этом сигнал разлагается аналого-цифровыми преобразователями на дискретные ступени и представляется в виде числа.

### **4.1. АНАЛОГОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Аналоговыми сигналами, однозначно зависящими от температуры, являются прежде всего термоэлектродвижущая сила у термоэлектрических термометров и сопротивление у термометров сопротивления. Эти величины определяют или методом гальванометра с использованием магнитоэлектрических или логометрических измерительных приборов, или компенсационным методом.

#### **4.1.1. ИЗМЕРЕНИЕ Т. Э. Д. С.**

##### **4.1.1.1. МЕТОД ГАЛЬВАНОМЕТРА**

Измерение т. э. д. с. методом гальванометра требует минимальных технических средств. Однако этот метод содержит различные источники погрешностей, которые обусловлены величиной и температурной зависимостью сопротивления термопары, компенсационных и соединительных проводов, а также измерительным прибором и его входным сопротивлением (см. 3.2.1.7.1).

##### **4.1.1.1.1. Динамические характеристики магнитоэлектрических измерительных приборов**

Наряду с требованиями, предъявляемыми к измерительным приборам и электрическим цепям в отношении статической точности, при быстрых изменениях температуры необходимо учитывать и динамические свойства измерительных приборов.

Входное и шунтирующее сопротивления должны быть рассчитаны так, чтобы демпфирование прибора было оптимальным, тогда время установления показаний будет минимальным. При слишком сильном демпфировании установление показаний происходит настолько медленно, что прибор не успевает следовать за быстрыми изменениями температуры; при слишком малом демпфировании происходит такое избыточное отклонение стрелки, что при продолжающихся изменениях температуры стрелка прибора не успокаивается.

Динамические свойства имеют решающее значение для самописцев, работающих по принципу падающей дужки и последовательно регистрирующих температуру нескольких термопар, так как после переключения на новую термопару

должно произойти затухание колебательного процесса, прежде чем можно будет зарегистрировать измеренное значение.

Динамические свойства измерительного прибора описываются дифференциальным уравнением колебаний [4.2]:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = M = N dt BI = qI, \quad (4.1)$$

где  $J$  — осевой момент инерции подвижной части прибора;  $p$  — фактор затухания;  $D$  — удельный момент сопротивления пружины или растяжки;  $\alpha$  — угол отклонения подвижной рамки;  $M$  — электромагнитный момент вращения подвижной катушки гальванометра, вызванный током  $I$ ;  $N$  — число витков подвижной ка-

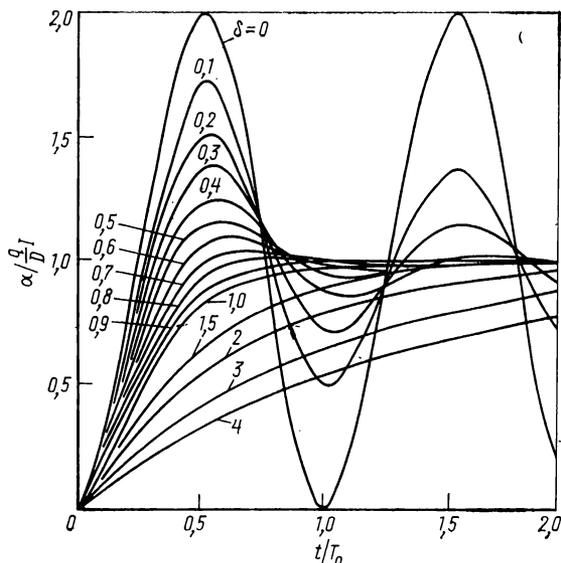


Рис. 4.1. Колебательный процесс с различной степенью затухания  $\delta$  в качестве параметра как функция времени, отнесенного к периоду собственных колебаний  $t/T_0$ .

тушки;  $d$  — средний диаметр витков подвижной катушки;  $l$  — боковая длина подвижной катушки;  $B$  — индукция в воздушном зазоре магнита;  $q$  — постоянная гальванометра;  $I$  — ток гальванометра;  $t$  — время.

После затухания колебательного процесса первые два члена уравнения равны нулю, вследствие чего имеем

$$D\alpha = qI, \quad \alpha = q \cdot I/D.$$

Чувствительные милливольтметры, применяемые для измерения т. э. д. с., не имеют дополнительного демпфирования за счет демпфирующей рамки или лепестка. Коэффициент затухания в этом случае равен

$$p = M^2/I^2R_0 = q^2/R_0. \quad (4.2)$$

Эффективное демпфирующее сопротивление  $R_0$  представляет собой общее сопротивление измерительной цепи. После введения нормированных величин: собственной частоты системы без затухания

$$\omega_0 = 2\pi/T_0 = \sqrt{D/J}, \quad (4.3)$$

степени затухания

$$\delta = p/2 \sqrt{D/J} = q^2/2R_0 \sqrt{D/J} \quad (4.4)$$

и введения масштаба времени, отнесенного к периоду собственных колебаний  $T_0$ ,

$$\tau = 2\pi t/T_0 = \omega_0 t$$

получают нормальное уравнение колебаний

$$\frac{d^2\alpha}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d\alpha}{d\tau} + \alpha = \frac{q}{D} I. \quad (4.5)$$

На рис. 4.1. показаны различные колебательные процессы со степенью затухания  $\delta$  в качестве параметра при скачке тока от 0 до 1. Видно, что наиболее благоприятный процесс колебания получается при  $\delta = 1/\sqrt{2}$  или  $\rho = \sqrt{2DJ}$ . Оптимальное сопротивление схемы измерения составляет при этом

$$R_{opt} = q^2/\sqrt{2DJ}. \quad (4.6)$$

#### 4.1.1.2. Расчет схемы для измерения т.э.д.с.

1. Пусть дан магнитоэлектрический прибор класса 1,5 без дополнительного демпфирования со следующими параметрами:  $\alpha_{max} = 47^\circ = 0,82$  рад;  $I_{max} = 60$  мкА =  $60 \cdot 10^{-6}$  А;  $D = 13,7$  г·см<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·рад);  $J = 6,17$  г·см<sup>2</sup>;  $R_W = R_{Cu} + R_{Sp} = 50$  Ом — сопротивление подвижной катушки и растяжек;  $R_V$  — дополнительное сопротивление в приборе;  $R_I = R_W + R_V$  — внутреннее сопротивление прибора.

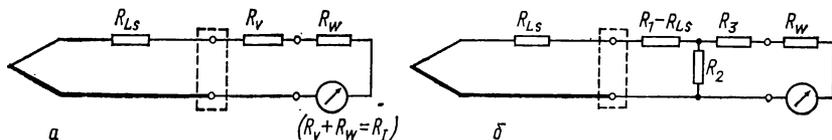


Рис. 4.2. Схема измерения т. э. д. с.:

а — без дополнительного демпфирования; б — с дополнительным демпфированием

Если необходимо определять т. э. д. с. термопары железо—константан в диапазоне температур 20—120° С, то полное сопротивление цепи (рис. 4.2, а)  $R_0 = R_I + R_{Ls} = R_W + R_V + R_{Ls}$  должно быть равно

$$R_0 = U_{max}/J_{max} = 5,37/60 = 89,5 \text{ Ом.}$$

Если сопротивление внешней цепи должно быть 20 Ом, то дополнительное сопротивление

$$R_V = R_0 - R_{Ls} - R_W = 89,5 - 20 - 50 = 19,5 \text{ Ом,}$$

$$R_I = R_W + R_V = 50 + 19,5 = 69,5 \text{ Ом.}$$

Если температура свободных концов термопары постоянна, то при изменении температуры магнитоэлектрического прибора на  $\pm \Delta t_u$  температурная погрешность из-за изменения сопротивления подвижной катушки по уравнению (3.35) равна

$$f \approx 0,004 \Delta t_u \frac{50}{(69,5 + 20)} (t - t_A).$$

Здесь  $t$  — измеренная температура;  $t_A$  — температура, соответствующая началу шкалы. В нашем примере при  $\Delta t_u = \pm 10$  К и  $t - t_A = (120 - 20)^\circ$  С погрешность измерения составляет  $-2,23$  К.

$$q = \frac{D\alpha_{max}}{I_{max}} = \frac{137 \cdot 0,82}{60 \cdot 10^{-6}} = 0,187 \cdot 10^6 \text{ г·см}^2/(\text{А·с}^2).$$

Степень затухания по уравнению (4.4)

$$\delta = \frac{q^2}{2\sqrt{DJ}} \cdot \frac{1}{R_0},$$

где  $q^2/2\sqrt{DJ} = 190 \cdot 10^7 \text{ г} \cdot \text{см}^2/(\text{А}^2 \cdot \text{с}^3) = 190 \text{ Ом}$ ,

откуда  $\delta = 190 \cdot 1/R_0$ .

Период собственных колебаний системы без затухания по уравнению (4.3) составляет, с:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{J/D} = 2\pi\sqrt{6,17/13,7} = 4,2.$$

При  $R_0 = 89,5 \text{ Ом}$  степень затухания  $\delta = 2,12$ .

Таким образом, демпфирование прибора слишком велико. Время успокоения колебаний, определенное по рис. 4.1, равно приблизительно  $2,5T_0 \approx 10 \text{ с}$ . Такое большое время затухания можно допустить во многих случаях, когда речь идет, как правило, о медленных изменениях измеряемой величины, в противном случае необходимо использовать измерительный прибор с другими параметрами или использовать измерительный усилитель. Приведенный в данном примере прибор достиг предела своей мощности. Это проявляется уже в малой величине  $R_V$  и обусловленной этим большой температурной погрешности.

2. Если тот же прибор и та же термopара должны быть использованы для измерения температуры в диапазоне  $20-520^\circ \text{С}$ , то имеем

$$R_0 = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{27,84}{60} = 464 \text{ Ом}; R_V = 464 - 20 - 50 = 394 \text{ Ом}; f \approx \pm \\ \pm 0,004 \Delta t_u \frac{50}{464} (t - t_A).$$

При  $\Delta t_u = +10 \text{ К}$  и  $t - t_A = (520-20)^\circ \text{С}$  погрешность измерения составит  $-2,16 \text{ К}$ ; тогда степень демпфирования  $\delta = 190 (1/464) = 0,410$  и в соответствии с рис. 4.1 избыточное отклонение стрелки равно 25% и время успокоения около  $2T_0$ , т. е. 8,4 с. В отличие от первого примера в данном случае можно достичь улучшения динамического поведения. Оптимальное демпфирующее сопротивление по уравнению (4.6) составляет  $R_{opt} = q^2/2\sqrt{DJ} = 273 \text{ Ом}$ .

Необходимо рассчитать схему, выходное сопротивление которой составляет  $R_A = R_{opt} - R_W = 223 \text{ Ом}$  и которая при подключении гальванометра ( $R_W = 50 \text{ Ом}$ ) обеспечивает ток 60 мкА, если на вход подано напряжение  $U_E = 27,84 \text{ мВ}$ .

Для Т-образной схемы соединения (см. рис. 4.2, б) справедливы следующие соотношения:

$$R_1 = R_2 [(a/b) - 1], R_3 = R_A - R_2 [1 - (b/a)],$$

где  $a = U_E/U_A$ ,  $b = 1 + (R_A/R_W)$ .

Значение  $R_2$  может быть выбрано произвольно, так как входное сопротивление еще не установлено. Для получения возможно меньшей погрешности при изменении сопротивления проводов  $R_L$  ток термopары должен быть возможно меньше, поэтому  $R_2$  должно быть как можно больше. Т-образную схему рассчитывают так, чтобы  $R_3 = 0$  и  $R_2 = \frac{R_A}{1 - (b/a)}$ .

При исходных данных вышеприведенного примера получаем  $R_1 = 379 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 541 \text{ Ом}$ , причем под  $R_1$  понимается сумма сопротивления проводов  $R_{LS}$  и первого сопротивления схемы согласования (см. рис. 4.2).

В табл. 4.1 представлены данные четырех гальванометров для технических измерений температуры. Устройства с I по III представляют собой гальванометры различной чувствительности, которые устанавливаются в корпуса приборов разнообразной формы. В зависимости от типа корпуса (вертикальное или горизонтальное положение оси головки, различная длина стрелки, зеркальная шкала) с этими гальванометрами могут быть изготовлены приборы классов I или 1,5. Устрой-

Т а б л и ц а 4.1

**Технические данные магнитоэлектрических гальванометров для промышленных измерений температуры**

Измерительная система	I	II	III	IV
Диапазон т. э. д. с. $U = U_E - U_A$ , мВ	>6	>18	>18	>12
Ток при максимальном отклонении стрелки, мкА	60	60	300	22
Класс точности	1 или 1,5	1 или 1,5	1 или 1,5	1
Сопротивление обмотки подвижной рамки и растяжек $R_{Cu} + R_{Sp}$ , Ом	50	90	15	130
Угол отклонения стрелки $\varphi_{\max}$ , град	47	47	46	60
Восстанавливающий момент при максимальном отклонении стрелки, мкН·см	115	157	272	80
Момент инерции, мкН·см·с <sup>2</sup>	63	63	63	Дополнительное демпфирование алюминиевой рамкой
Период собственных колебаний $T_0$ , с	4,2	3,6	2,8	
Предвыходное сопротивление $R_V + R_{Ls}$ , Ом	50—250	210—1010	45—205	360—600
Время успокоения $T_B$ , с	4—9	3—6,5	3—6	14
Допустимое изменение сопротивления проводов, Ом, при максимально допустимой погрешности (1%)	1—3	3—11	0,6—2,2	4,9—7,3

ство IV представляет собой измерительный механизм самописца с падающей дужкой со временем чередования точек 20 с. Подвижная рамка изготовлена из алюминия, что обеспечивает дополнительное демпфирование. Измерительные приборы со световым указателем могут быть выполнены с минимальным диапазоном измерения т. э. д. с. в 1 мВ.

#### 4.1.1.2. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

Если точность измерения должна быть лучше чем 0,5%, т. э. д. с. определяют, как правило, компенсационным методом. Навстречу измеряемой т. э. д. с. включается через чувствительный нуль-гальванометр (индикатор отсутствия тока) изменяемое компенсирующее напряжение. Так как при равенстве обоих напряжений ток в нуль-индикаторе и цепи термопары равен нулю, то нет и падения напряжения на сопротивлениях проводов. Поэтому измерение не зависит от величины сопротивления внешней цепи и его изменения (например, из-за изменения температуры). Другое преимущество компенсационного метода заключается в том, что благодаря высокой чувствительности нуль-индикатора можно существенно повысить точность по сравнению с методом гальванометра. Кроме того, можно

производить измерения в очень узком диапазоне с произвольно выбранным началом шкалы благодаря соответствующему подбору параметров схемы компенсации.

Существуют две разновидности компенсационного метода — метод потенциометра по Поггендорфу (рис. 4.3) и метод амперметра по Линдек-Роте (рис. 4.4).

При использовании метода потенциометра постоянное и известное напряжение  $E$  делится на потенциометре  $R_p$ , пока снимаемое с него напряжение не станет равным измеряемому напряжению  $E_x$ ; при этом мерой  $E_x$  является положение ползунка потенциометра. При использовании метода амперметра ток через известное и постоянное сопротивление  $R_K$  изменяется до тех пор, пока падение напряжения на  $R_K$  не станет равным  $E_x$ . Отклонение стрелки амперметра является мерой  $E_x$ .

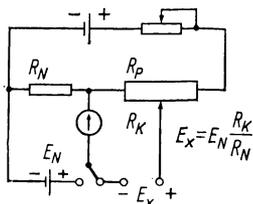


Рис. 4.3. Принципиальная схема потенциометрического метода Поггендорфа

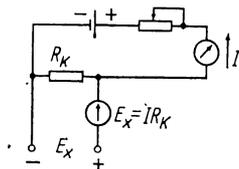


Рис. 4.4. Принципиальная схема метода амперметра Линдек—Роте

Компенсатор Поггендорфа был в дальнейшем развит в различных вариантах исполнения в прецизионный компенсатор для исключительно точных измерений температуры и напряжения [4.3, 4.5]. Для наиболее точных приборов погрешность в зависимости от диапазона измерения составляет от  $\pm 0,1$  до  $\pm 0,3\%$  (например, каскадный компенсатор фирмы S und H и компенсатор K5 фирмы Leeds and Northrup). В этих приборах используется нормальный элемент. Потенциометр заменен прецизионными сопротивлениями и переключателями ступеней, которые должны иметь малые т. э. д. с., так как появление на контактах т. э. д. с. исказит результаты измерений.

В качестве нуль-индикатора применяют зеркальный гальванометр, который показывает разность напряжений 1—2 мкВ. В новых приборах применяется электронный нуль-усилитель, соединенный с надежным стрелочным прибором. При этом чувствительность нуль-индикатора не повышается, однако упрощается обслуживание вследствие сокращения времени установления показаний и повышения устойчивости к перерегулированию.

*Технические компенсаторы.* Для обычных измерений т. э. д. с. в лабораториях и на предприятиях используют технические компенсаторы, которые в основном оснащены ступенчатыми переключателями и точными потенциометрами, так что при общем диапазоне 60 мВ измеряемые э. д. с. могут быть определены более точно в интервалах от 0 до 10 мВ, от 10 до 20 мВ и т. д. Эти приборы в обычном исполнении содержат источник тока, нуль-гальванометр, а также переключатель для сравнительных испытаний с эталонной термопарой (см. 5.4). Кроме того, они могут быть снабжены температурными шкалами для наиболее часто применяемых термопар. В зависимости от конструкции предел допустимой погрешности составляет 0,1—0,5% от измеряемой т. э. д. с.

#### 4.1.1.2.1. Компенсационный прибор для измерения методом потенциометра

Для измерений методом потенциометра можно сконструировать автоматический компенсатор [4.1а, 4.1б], если нуль-индикатор заменить электронным усилителем и сервоприводом. Сервомотор перемещает движок потенциометра так, что входное напряжение усилителя становится равным нулю. Тогда измеряемое

напряжение  $E_x$  равно компенсирующему напряжению, а положение движка потенциометра является мерой  $E_x$ . Такие компенсационные измерительные приборы широко распространены в качестве показывающих приборов и самописцев. Их изготавливают в виде приборов с непрерывной записью с минимальным временем установления показания 0,25 с, в виде точечных многоканальных самописцев для 6 или 12 автоматически переключаемых термодпар с наименьшим периодом следования точек 2 с. Предел допустимой погрешности (класс точности) в зависимости от конструктивного исполнения составляет 0,2—1% от диапазона шкалы. При измерении напряжения со смещенным нулем добавляется еще дополнительная погрешность, составляющая 0,05—0,1% от напряжения смещения.

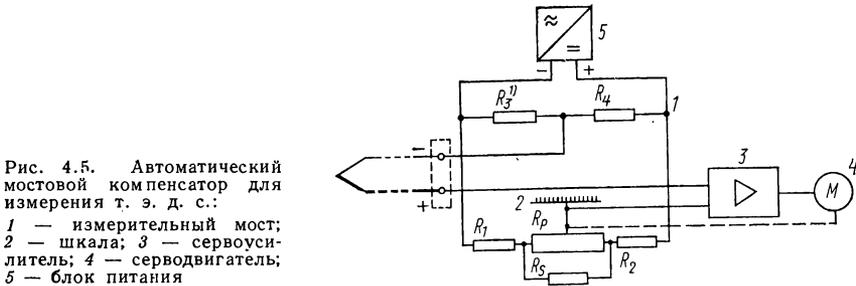


Рис. 4.5 иллюстрирует принцип действия такого прибора с часто применяемой в производственных измерениях схемой автоматического компенсационного моста. Соответствующим подбором сопротивлений  $R_1$  и  $R_3$  начало шкалы может быть установлено на любое напряжение или температуру. Сопротивление  $R_5$  служит для согласования сопротивления измерительного потенциометра с диапазоном измерения. Если изготовить  $R_3$  частично из материала с сильной температурной зависимостью сопротивления (например, из меди, как на рис. 4.5), то таким образом можно дополнительно компенсировать влияние колебаний температуры свободных концов подключенной к прибору термодпары (см. 3.2.1.6.3).

#### 4.1.1.2.2. Расчет мостовой компенсационной схемы для измерения т.э.д.с.

Схема компенсационного самописца представлена на рис. 4.5. Пусть измеряемое напряжение лежит в интервале между  $U_A$  и  $U_E$ , т. е.  $\Delta U = U_E - U_A$ . Стабилизатор напряжения постоянного тока, нагрузкой которого является сопротивление  $R$ , питает схему напряжением  $U_S$ . Обычно напряжение  $U_S$  устанавливают равным 1—5 В и выбирают  $R$  таким, чтобы ток составлял несколько миллиампер. В этом случае выполняются условия электро- и искробезопасности измерительного контура (*VDE 0170/0171*) в эксплуатации и в случае повреждения.

Измерительный потенциометр  $R_p$ , номинальное сопротивление которого не зависит от диапазона измерения, согласован с последним с помощью сопротивления  $R_5$ . Оба параллельно соединенных сопротивления обозначим  $R'_p$ . Справедливы следующие соотношения:

$$R_3 + R_4 = 2R, \quad (4.7)$$

$$R_1 + R'_p + R_2 = 2R, \quad (4.8)$$

$$R'_p = \frac{R_5 R_p}{R_5 + R_p}. \quad (4.9)$$

Напряжение на  $R'_p$  должно быть равно  $\Delta U$ , тогда

$$\Delta U / U_S = R'_p / 2R \quad (4.10)$$

и из (4.9) и (4.10) получаем

$$R_5 = \frac{2RR_p}{(U_S/\Delta U) - 2R}. \quad (4.11)$$

Обозначим напряжения на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соответственно через  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и  $U_4$ ; тогда для начала диапазона измерения должно выполняться следующее условие:

$$U_3 + U_A = U_1. \quad (4.12)$$

Для  $U_A > 0$  может быть выбрано  $U_3 = 0$  и соответственно  $R_3 = 0$ , а для  $U_A < 0$   $U_1 = 0$  и  $R_1 = 0$ . Однако этим, как правило, не пользуются, так как тем самым уменьшается возможность осуществить точное уравновешивание готового моста путем простого параллельного подключения высокоомных угольных сопротивлений. Обычно выбирают  $R_1$  и  $R_3$  так, чтобы

$$U_3 = 0,1U_S \text{ при } U_A > 0,$$

$$U_1 = 0,1U_S \text{ при } U_A < 0.$$

В этом случае получаются следующие значения сопротивлений:

1. Для  $U_A \geq 0$

$$U_3 + U_A = U_1; 0,1U_S + U_A = U_S R_1 / 2R; R_1 = 2R(0,1 + U_A / U_S); \quad (4.13)$$

$$R_2 = 2R - R_1 - R'_p; R_2 = 2R[0,9 - (U_A + \Delta U) / U_S]. \quad (4.14)$$

$$R_3 / 2R = 0,1; R_3 = 0,2R. \quad (4.15)$$

$$R_4 = 2R - R_3; R_4 = 1,8R. \quad (4.16)$$

2. Для  $U_A < 0$

$$R_1 / 2R = 0,1; R_1 = 0,2R. \quad (4.17)$$

$$R_2 + R'_p + R_1 = 2R; R_2 = 2R(0,9 - \Delta U / U_S). \quad (4.18)$$

$$U_1 - U_A = U_3; 0,1U_S - U_A = U_S R_3 / 2R; R_3 = 2R(0,1 - U_A / U_S). \quad (4.19)$$

$$R_4 = 2R - R_3; R_4 = 2R(0,9 + U_A / U_S). \quad (4.20)$$

Пример. а. Надо рассчитать схему по рис. 4.5 для термопары железо—константан по ДИН 43710. Диапазон измерения:

$$t_A = 150^\circ\text{C}, t_E = 250^\circ\text{C}.$$

При температуре свободных концов  $20^\circ\text{C}$  т. э. д. с. термопары составляет

$$U_A = 7,10 \text{ мВ}, U_E = 12,70 \text{ мВ}, \Delta U = 5,60 \text{ мВ}.$$

Пусть  $U_S = 1 \text{ В}$  и  $R_p = 500 \text{ Ом}$ . Для сопротивления нагрузки  $R = 500 \text{ Ом}$  ток моста равен  $2 \text{ мА}$ . В соответствии с уравнениями (4.10)—(4.16) получим значения сопротивлений, Ом:

$$R'_p = 1000 \cdot 5,60 \cdot 10^{-3} = 5,60,$$

$$R_5 = \frac{1000 \cdot 500}{(1/5,60) 10^3 \cdot 500 - 1000} = 5,66,$$

$$R_1 = 1000(0,1 + 7,10 \cdot 10^{-3}) = 107,1,$$

$$R_2 = 1000(0,9 - 12,70 \cdot 10^{-3}) = 887,3,$$

$$R_3 = 0,2 \cdot 500 = 100; R_4 = 1,8 \cdot 500 = 900.$$

Так как речь идет о приборе класса 0,25, то погрешность измерения  $U_A$  должна быть меньше 0,1%, т. е. меньше 7,1 мкВ\*. Это потребовало бы изготовления сопротивлений с точностью 0,002%. Так как такие сопротивления изготовить

\* Нормы ИЕС (МЭК).

очень сложно, в схеме используют сопротивление обычной точности (например, 0,1%), а затем производят точную настройку всего измерительного моста, при которой параллельно сопротивлениям  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_5$  подключают высокоомные угольные сопротивления.

6. Если термопара или компенсационные провода присоединены непосредственно к измерительному прибору, то мост должен дополнить дополнительным зависящим от температуры напряжением компенсировать изменение т. э. д. с., которое возникает из-за отклонения температуры клемм прибора от расчетного значения ( $20^\circ\text{C}$ ) (см. 3.2.1.6.3). Для зависящей от температуры части  $R_{\text{Cu}}$  сопротивления  $R_3$  (см. рис. 4.5) при температуре настройки медного сопротивления  $20^\circ\text{C}$  получаем

$$R_{\text{Cu}} = \frac{\Delta U_A(\Delta t)}{I_3 \alpha_{20} \Delta t}, \quad (4.21)$$

где  $\Delta U_A(\Delta t)$  — изменение т. э. д. с. при отклонении температуры свободных концов термопары от расчетного значения ( $20^\circ\text{C}$ ) на  $\Delta t$ ;  $I_3$  — ток через сопротивление  $R_3$ ;  $\alpha_{20}$  — температурный коэффициент сопротивления меди при  $20^\circ\text{C}$ .

При  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$  по ДИН 43710  $\Delta U_A(\Delta t) = 0,53$  мВ. Так как для меди  $\alpha_{20} = 1/262$ , то медное сопротивление, Ом,

$$R_{\text{Cu}} = \frac{0,53 \cdot 10^{-3} \cdot 1000}{(1/262) 10} = 13,89$$

и зависящее от температуры сопротивление, Ом,

$$R_3 - R_{\text{Cu}} = 100 - 13,89 = 86,11.$$

Зависящее от температуры сопротивление можно изготавливать не с такой высокой точностью, как остальные сопротивления моста. Кроме того, легко добиться градиента температур между двумя клеммами и между клеммами и зависящим от температуры сопротивлением всего порядка 0,1—1 К. Для этого при точных измерениях постоянство температуры свободных концов термопары осуществляется с помощью термостата.

#### 4.1.1.2.3. Компенсационные приборы для измерения методом амперметра, измерительные усилители и преобразователи

Если у компенсатора, работающего по методу амперметра (см. рис. 4.4), заменить нуль-гальванометр электронным усилителем и использовать выходной ток последнего в качестве компенсационного тока  $I$ , то получится автоматический компенсатор (измерительный усилитель), показанный на рис. 4.6 [4.5]. Приборы, работающие по этому принципу, часто применяют для измерения температуры в промышленности. С их помощью можно измерить т. э. д. с. практически без затрат мощности и преобразовать в пропорциональный т. э. д. с. ток, не зависящий от  $R_L$ , который можно передать на большое расстояние без искажений.

В качестве стандартного выходного сигнала в ФРГ принят<sup>1</sup> ток 0—20 мА (фиксированный нуль) или 4—20 мА (плавающий нуль). Благодаря этому можно любой температурный диапазон с помощью однотипных стандартных приборов (например, для выходного сигнала 0—20 мА) индигировать, регистрировать, регулировать, преобразовывать в цифровой сигнал и т. д. Тогда для больших установок проектирование, обслуживание и хранение запасных частей

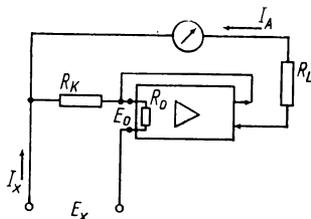


Рис. 4.6. Измерительный усилитель для измерения напряжения

<sup>1</sup> ДИН 19230 сентябрь 1969. Сигналы постоянного тока для электрических измерительных и регулирующих установок. Определения и требования.

на складе упрощаются настолько, что это оправдывает высокие затраты на электронные усилители.

*Измерительные усилители.* Раньше в качестве усилителей применяли так называемые гальванометрические усилители. В этих усилителях входное напряжение  $E_0$  подается на подвижную катушку гальванометра с низким трением и малым восстанавливающим усилием, отклонение стрелки которого управляет выходным током. На рис. 4.7 представлены различные варианты схем такого рода усилителей [4.6].

По схеме 4.7, *a* установленный на гальванометре  $G$  флажок  $F$  изменяет в зависимости от его положения степень охлаждения двух нагретых, обдуваемых

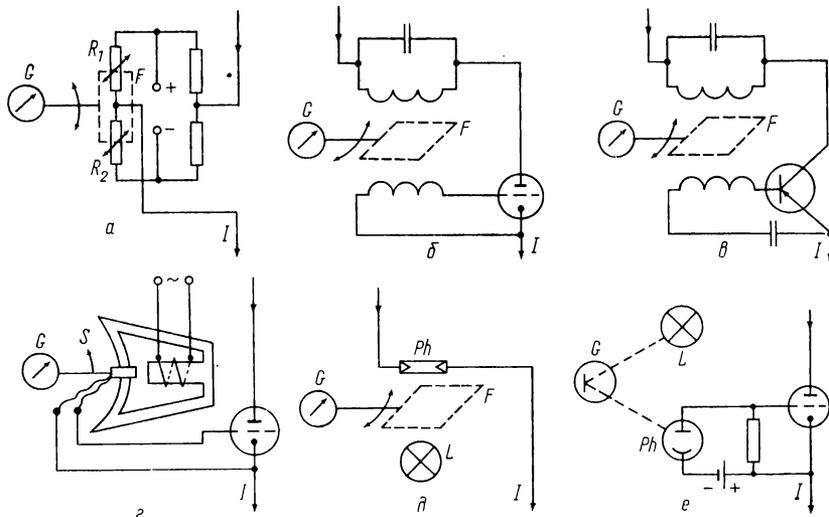


Рис. 4.7. Способы управления с гальванометрическими усилителями:

*a* — по схеме болометра (резисторы  $R_1$  и  $R_2$  обдуваются потоком воздуха, перпендикулярным к плоскости рисунка); *b* и *в* — через связь колебательных контуров (ламповый или транзисторный генератор); *г* — изменением положения катушки индуктивности; *д* и *e* — с помощью фотоэлектрического воздействия (фоторезистор или фотоэлемент)

потоком воздуха зависящих от температуры сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , включенных в схему моста, и тем самым влияет на величину тока в диагонали моста  $I$ . В схемах 4.7, *б* и *в* флажок гальванометра вводится в поле колебательного контура лампового или транзисторного генератора и оказывает влияние на его анодный или коллекторный ток  $I$ . По схеме 4.7, *г* гальванометр связан с подвижной катушкой  $S$  дифференциального трансформатора. В зависимости от ее положения в ней индуцируется переменное напряжение, которое управляет анодным током электронной лампы  $I$ .

В схеме 4.7, *д* флажок  $F$  гальванометра изменяет поток света от лампы  $L$ , падающий на включенный в цепь выходного тока фоторезистор  $Ph$  и тем самым изменяет его сопротивление.

Зеркальный гальванометр в схеме 4.7, *e* изменяет поток света, падающий на фотоэлемент  $Ph$ , подключенный к сетке лампы, и этим оказывает воздействие на ее анодный ток  $I$ . Наименьший диапазон измерений (0—150 мкВ) получают по схеме без обратной связи (см. рис. 4.7, *e*). С другими усилителями можно собрать компенсатор с наименьшим диапазоном измерения 1—5 мВ при погрешности 0,1—1%. Причиной погрешности является действие на подвижную катушку гальванометра моментов сил трения опор и подводящих проводов.

С развитием полупроводниковой техники гальванометрические усилители потеряли свое значение для измерения т. э. д. с. В настоящее время при непо-

средственном включении усилителей постоянного тока, т. е. при минимальной сложности схемы, достигают такой высокой стабильности нуля, что можно усиливать напряжения в милливольтовом диапазоне. Для так называемых твердотельных усилителей (на интегральных схемах), которые состоят из кристалла кремния, размером примерно  $1 \times 1 \times 0,2$  мм, подвергнутых различным процессам диффузии и травления, в зависимости от их типа гарантируется дрейф нуля не более чем  $5 \text{ мкВ/К}$  или даже  $0,5 \text{ мкВ/К}$ .

Меньший, чем у непосредственно включенных усилителей, дрейф нуля достигается при использовании усилителей с вибропреобразователями. У этих приборов входное постоянное напряжение преобразуется периодически открывающимся и закрывающимся переключателем в переменное напряжение, которое затем усиливается усилителем переменного тока и поступает на фазочувствительный выпрямитель. Так как в усилителях переменного напряжения абсолютно отсутствует дрейф нуля, то результирующий дрейф возможен только за счет вибропреобразователя. Хотя механические измерительные вибропреобразователи имеют минимальные значения дрейфа нуля (например, менее  $0,01 \text{ мкВ/К}$  для вибропреобразователя фирмы Stevens and Arnold, Бостон, США), они все больше вытесняются совершенно не изнашивающимися и не требующими ухода полупроводниковыми преобразователями. Планарные кремниевые транзисторы, используемые в качестве преобразователя в схеме с обратным включением (коллектор и эмиттер включены перекрестно), имеют напряжение рассогласования несколько милливольт, которое можно скомпенсировать, за исключением зависящей от температуры составляющей около  $5 \text{ мкВ/К}$ .

Значительно лучше подходят для этой цели полевые транзисторы. Они ведут себя как резисторы, омическим сопротивлением которых можно управлять в пределах от 20 до 100 МОм, и в качестве паразитного напряжения имеют только т. э. д. с., возникающую в некоторых случаях в местах соединений. При тщательной сборке (при отсутствии т. э. д. с.) с такими полупроводниковыми преобразователями достигают температурного дрейфа нуля менее  $0,05 \text{ мкВ/К}$ . На рис. 4.8 показана принципиальная схема усилителя с полупроводниковым преобразователем.

Кроме гальванометрических усилителей, усилителей постоянного тока с непосредственным включением и усилителей с вибропреобразователями, некоторое значение для технических измерений температуры приобрели магнитные усилители. В них в качестве усиливающего элемента используют дроссельные катушки, которые включают в цепь переменного тока и индуктивное сопротивление которых изменяется под воздействием подмагничивающего постоянного тока входного сигнала. Эти усилители, помимо довольно малого дрейфа нуля (около  $0,3 \text{ мкВ/К}$ ), не чувствительны к помехам и контуры их входного и выходного токов гальванически разделены. Недостатком их является низкое входное сопротивление, которое при отсутствии отрицательной обратной связи по величине близко к 100 Ом.

В табл. 4.2 дан обзор технических данных применяемых в настоящее время измерительных усилителей и компенсационных самописцев.

Точность компенсационных схем зависит не только от стабильности нуля применяемых усилителей, но также и от постоянства сопротивления  $R_K$ , от коэффициента усиления и глубины отрицательной обратной связи, которая определяется величиной сопротивления  $R_K$ . Если усилитель, примененный в компенсационной схеме рис. 4.6, имеет усиление

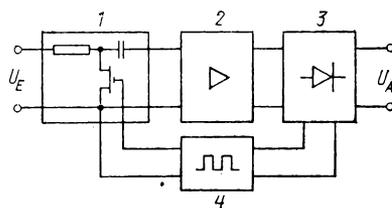


Рис. 4.8. Принципиальная схема усилителя с вибропреобразователем на полупроводниковых элементах:

1 — полупроводниковый вибропреобразователь; 2 — усилитель переменного тока; 3 — фазочувствительный выпрямитель; 4 — генератор несущей частоты

$$V_0 = I_A/E_0,$$

$$(4.22)$$

Т а б л и ц а 4.2

**Технические данные современных измерительных усилителей  
и компенсационных самописцев**

Прибор	Схема входа	Диапазон измерения, мВ	Входное сопротивление	Влияние на точность показаний в конце диапазона измерения, %, изменения		Время установления показаний
				окружающей температуры на 10 К	напряжения питания на 10%	
Измерительный усилитель	Вибропреобразователь с полевым транзистором	1—60	0,5—30 МОм	0,1	0,1	50 мс
	Магнитный усилитель	1—60	25 КОм—3 МОм	0,25—0,1	0,25—0,1	50 мс
	Гальванометрический (фотоэлектрический) усилитель	150 мкВ—6	3,3—50 КОм	<0,1	0,1	1 с
Компенсационный самописец	Механический вибропреобразователь	1—750	10 МОм	0,15	0,1	0,5 с
	Вибропреобразователь с полевым транзистором	5—750	0,5 МОм	0,15	0,1	0,5 с

то в скомпенсированном состоянии для его входа справедливы соотношения

$$E_x - R_K I_A = E_0 = I_A / V_0,$$

$$E_x = I_A R_K (1 + 1/V_0 R_K). \quad (4.23)$$

Поскольку усиление  $V_0$  и входное сопротивление усилителя  $R_0$  являются конечными величинами, напряжение  $E_x$  при такой схеме даже в скомпенсированном состоянии создает остаточный ток. Для входного сопротивления, равного  $R_E = E_x / I_x$ , с учетом, что  $R_0 = E_0 / I_x$ , получаем

$$E_x = E_0 (1 + V_0 R_K); \quad R_E / R_0 = E_x / E_0; \quad R_E = R_0 (1 + V_0 R_K). \quad (4.24)$$

## Измерительный преобразователь

Преобразователь для измерения температур [4.7а, 4.7б] включает, кроме измерительного усилителя, все дополнительные устройства, необходимые для измерений температуры термопарами или термометрами сопротивления (рис. 4.9).

Схема 1 для измерения с помощью термопары содержит, кроме сопротивления обратной связи  $R_K$ , определяющего величину диапазона измерения, источник вспомогательного напряжения для установления начала диапазона измерения и устройство для компенсации колебаний температуры свободных концов подключенной термопары. Кроме этого, приборы часто содержат устройство для сигнализации обрыва термопары 4 и по одному магнитному усилителю в прямой и обратной ветвях 2, 3 для гальванического разделения входного и выходного контуров. Такое разделение необходимо в том случае, когда по требованиям взрывобезопасности для контура термопары должны выполняться условия искробезопасности по VDE 0170/0171, однако для приборов, включенных на выходе измерительного преобразователя, эти условия не выполняются.

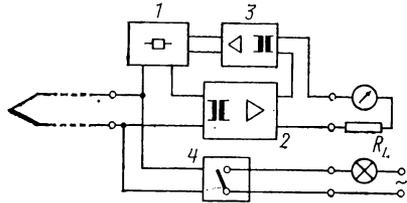


Рис 4.9. Измерительный преобразователь для измерения температуры с гальваническим разделением измерительного и выходного контуров:

1 — измерительный блок; 2 — измерительный усилитель; 3 — усилитель обратной связи; 4 — блок контроля и сигнализации обрыва цепи термопары

## 4.1.2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 4.1.2.1. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

#### 4.1.2.1.1. Метод компенсации напряжения

Используя закон Ома, можно определить сопротивление путем измерения тока и напряжения или при наличии известного эталонного сопротивления по двум измерениям напряжения. Поэтому для измерения температуры с помощью термометров сопротивления могут быть использованы описанные в предыдущем разделе компенсаторы напряжения (рис. 4.10, а).

Если  $P_V$  — положение потенциометра  $P$  при измерении известного эталонного сопротивления  $R_V$  и  $P_X$  — положение при измерении  $R_T$ , то при постоянном токе термометра  $I$

$$P_X/P_V = R_T/R_V, \text{ т. е. } R_T = R_V P_X/P_V. \quad (4.25)$$

Точность этого метода зависит от точности компенсатора, эталонного сопротивления  $R_V$  и от возникающих в некоторых случаях в измерительной цепи паразитных т. э. д. с., величина которых может быть оценена путем смены полярности источника напряжения при измерении и которые могут быть учтены. Сопротивление подводящих проводов и контактов переключателей не оказывает влияния на результаты измерения (см. 3.2.2.3). Этот метод нашел широкое применение, так как одними и теми же приборами можно измерять как напряжение, так и сопротивление. Особенно высокие требования предъявляют к постоянству тока термометра, так как изменение тока при измерении сопротивления обуславливает изменение напряжения. Поэтому при точных измерениях, чтобы проконтролировать постоянство тока  $I$ , необходимо проводить многократные измерения  $R_V$  и  $R_T$ .

При длительных измерениях с автоматическими компенсаторами (см. рис. 4.10, б) в качестве источника питания измерительной цепи термометра служит стабилизатор тока, напряжение питания которого должно быть точно равно номинальному значению.

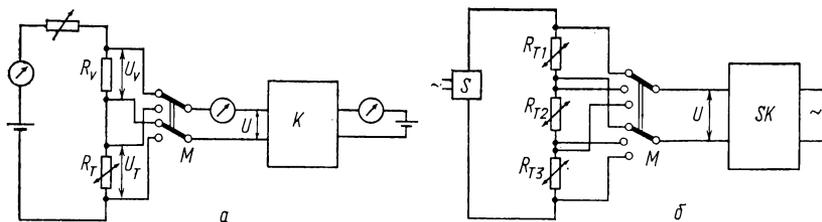


Рис. 4.10. Схема компенсатора напряжения:

а — с эталонным сопротивлением  $R_V$  и компенсатором  $K$ ; б — с несколькими последовательно соединенными термометрами сопротивления с переключателем датчиков  $M$  и автоматическим компенсатором  $SK$ ;  $R_T$  — термометры сопротивления;  $U$  — компенсирующее напряжение;  $S$  — стабилизатор тока

Необходимо следить, чтобы при больших изменениях температуры измерительного сопротивления и подводящих проводов не была превышена его нагрузка, особенно при последовательном включении нескольких термометров. Стабилизатор со стабильностью тока 0,3% при колебаниях сетевого напряжения 20% дает погрешность измерения, Ом,  $\pm R_T \cdot 0,3\%$ .

Отсюда получается возможная погрешность для 100-Ом платинового термометра при 0° С до 0,8 К, при 100° С до 1,1 К и при 500° С до 2,5 К.

#### 4.1.2.1.2. Метод уравновешенного моста

*Измерительный мост постоянного тока.* Если сопротивление термометра сопротивления измеряют методом уравновешенного моста, при котором одно из сопротивлений моста изменяют до тех пор, пока напряжение на диагонали моста не станет равным нулю, то результат измерения не зависит от величины тока, проходящего через мост. Здесь, так же как и в компенсаторах напряжения, из основной схемы моста Уитстона разработан целый ряд прецизионных мостов специально для измерений температуры с помощью термометров сопротивления, которые работают на постоянном или переменном токе. Мостом Каллендера—Гриффитса называется схема с дополнительной петлей провода (шлейфом) (рис. 4.11), благодаря которой исключается влияние сопротивления соединительных проводов, если сопротивление последних равно сопротивлению шлейфа и  $R_1 = R_2$ . В мостах для промышленного применения вместо нуль-гальванометра используют автоматический потенциометр.

Для наиболее точных электрических измерений температуры в США разработан мост Мюллера [4.8, 4.9]. Приведенная на рис. 4.12 схема такого моста дает то преимущество, что нуль-гальванометр включен в цепь с практически постоянным сопротивлением, поэтому степень его демпфирования при уравновешивании моста не изменяется. Как правило, делают  $R_1 = R_3$ , что позволяет двукратным уравновешиванием исключить разницу в сопротивлениях подводящих проводов, которая при точных измерениях может недопустимо исказить результаты измерения. Обозначив в соответствии с рис. 4.12 входящие в состав моста сопротивления проводов через  $A$  и  $B$ , при уравновешивании получаем

$$(S_{x1}/S) R_p + R_2 + B = R_p (1 - S_{x1}/S) + R_4 + R_T + A.$$

Если изменить полярность включения термометра сопротивления, то при новом уравновешивании

$$(S_{x2}/S) R_p + R_2 + A = R_p (1 - S_{x2}/S) + R_4 + R_T + B$$

и тогда

$$R_T = R_p (S_{x1}/S + S_{x2}/S) + R_2 - R_p - R_4. \quad (4.26)$$

Этот мост в промышленном исполнении позволяет проводить измерения сопротивлений от 0 до 422 Ом при разрешении 1 мкОм и точности измерения температуры 0,01 К.

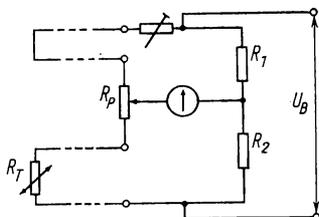


Рис 4.11. Схема моста Каллендера—Гриффитса;  
 $R_1, R_2$  — сопротивления моста;  
 $R_T$  — термометр сопротивления;  
 $R_p$  — сопротивление реохорда

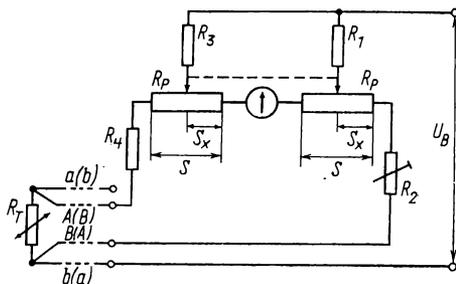


Рис 4.12. Схема моста Мюллера:  
 $R_1, R_3, R_4$  — сопротивления моста;  $R_T$  — термометр сопротивления;  
 $R_p$  — сопротивление реохорда;  $R_2$  — юстировочное сопротивление

*Измерительные мосты переменного тока.* Мосты, работающие на переменном токе [4.10, 4.11], дают по сравнению с мостами постоянного тока два преимущества: во-первых, нет необходимости в исключении паразитных т. э. д. с., так как они не искажают результаты измерений; во-вторых, для измерения сопротивления необходимо только одно эталонное сопротивление. Уравновешивание можно производить изменением коэффициента трансформации одного или нескольких трансформаторов в противоположных плечах моста. Емкости и индуктив-

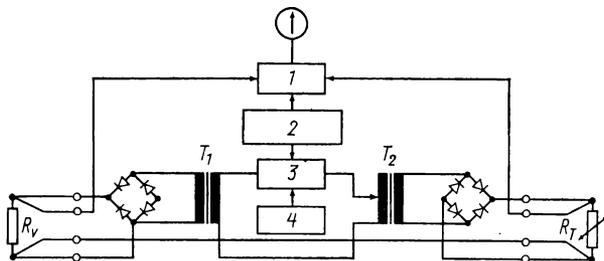


Рис. 4.13. Схема моста переменного тока по Джонстону и Чармэну:  
 1 — нуль-детектор; 2 — генератор прямоугольных импульсов частотой 5 Гц; 3 — модулятор; 4 — генератор 1 кГц

ности элементов схемы и соединительных проводов вносят существенные помехи, поэтому элементы моста должны обладать возможно меньшей индуктивностью и емкостью. Длинные соединительные провода недопустимы.

Мост переменного тока, допускающий наличие длинных проводов, показан на рис. 4.13 [4.11]. Чтобы затраты на изготовление обоих трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , от точности коэффициента трансформации которых зависит точность моста, были приемлемыми, этот мост работает на переменном напряжении частотой 1 кГц. Это напряжение дополнительно модулируется прямоугольными сигналами частотой 5 Гц. Через два выпрямителя на выходе трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  пере-

менное напряжение, модулированное прямоугольным низкочастотным сигналом, поступает на сопротивления  $R_T$  и  $R_V$ . Нуль-детектор, кроме усилителя, содержит фазочувствительный выпрямитель, управляемый генератором прямоугольных сигналов частотой 5 Гц, так что уравновешивание моста происходит на частоте 5 Гц. Емкости и индуктивности проводов и элементов схемы при этой частоте не играют никакой роли. Такой мост в промышленном исполнении позволяет производить измерения сопротивления в диапазоне 0,1—500 Ом с относительной погрешностью  $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ . Если вместо эталонного сопротивления  $R_V$  использовать второй термометр сопротивления, то можно с такой же точностью измерять разность температур.

#### 4.1.2.1.3. Автоматические мостовые схемы и их расчет

Самоуравновешивающиеся мостовые схемы с использованием автоматических компенсаторов широко используют в сочетании с термометрами сопротивления для индикации и записи температуры. При этом во многих случаях преимущество является то, что при правильном расчете моста допускается большое расстояние между термодатчиком и компенсатором, так как изменение сопротивления соединительных проводов практически не вызывает погрешности. Кроме того, может быть достигнута линейность температурных показаний.

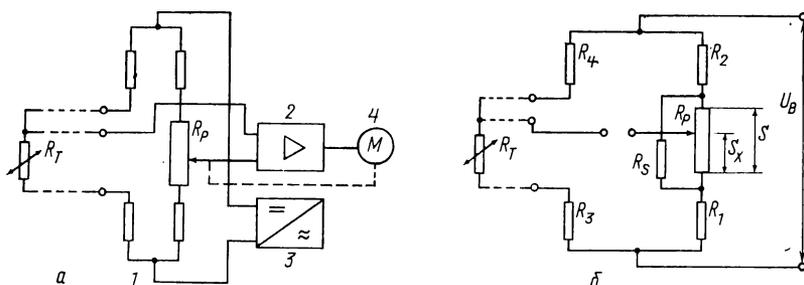


Рис. 4.14. Принципиальная (а) и подробная (б) схемы автоматического компенсатора для измерения сопротивления:

1 — измерительный мост; 2 — сервоусилитель; 3 — блок питания; 4 — сервомотор;  $R_p$  — реохорд;  $R_T$  — термометр сопротивления

На рис. 4.14 показана схема автоматически уравновешивающегося моста для температурных измерений. Обозначив сопротивление термометра в начале диапазона измерения через  $R_{TA}$  и в конце диапазона — через  $R_{TE}$ , напишем уравнения для точек равновесия в начале и в конце диапазона ( $\Delta R = R_{TE} - R_{TA}$ ) (в проведенных ниже расчетах сопротивление проводов  $R_{Ls}$  входит в  $R_3$  и  $R_4$ ):

$$\frac{R_1}{R_2 + R'_p} = \frac{R_3 + R_{TA}}{R_4} \quad \text{и} \quad \frac{R_1 + R'_p}{R_2} = \frac{R_3 + R_{TA} + \Delta R}{R_4}.$$

$$\text{При } r_3 = R_3 + R_{TA}, \quad (4.27)$$

$$K = \frac{r_3}{\Delta R} \quad (4.28)$$

$$\text{и } R'_p = \frac{R_5 R_p}{R_5 + R_p} \quad (4.9)$$

$$\text{получаем } \frac{R_1}{R_2 + R'_p} = \frac{r_3}{R_4} \quad (4.29)$$

$$\text{и } \frac{R_1 + R'_p}{R_2} = \frac{r_3}{R_4} \left( 1 + \frac{1}{K} \right). \quad (4.30)$$

Если выполнить мост симметричным, чтобы исключить влияние изменений сопротивления проводов  $R_{Ls}$  на равновесие моста в начале диапазона измерения, то, используя равенство (4.27), получаем

$$R_4 = r_3, \quad (4.31)$$

$$R_1 = R_2 + R'_p \quad (4.32)$$

$$\text{и } K = R_2/2R'_p. \quad (4.33)$$

Чувствительность моста в значительной мере зависит от выбора  $K$ ; этот же параметр определяет линейность шкалы. Используя обозначения рис. 4.14, б и равенство (4.27), можно записать следующее выражение для характеристики шкалы:

$$\frac{R_1 + (S_x/S) R'_p}{R_1 - (S_x/S) R'_p} = \frac{r_3 + R_T - R_{TA}}{R_4}, \quad (R_{TA} \ll R_T \ll R_{TE}). \quad (4.34)$$

Вводя нормированный параметр

$$c = \frac{R_T - R_{TA}}{\Delta R}, \quad (0 \ll c \ll 1), \quad (4.35)$$

получаем

$$\frac{S_x}{S} = \frac{R_1}{R'_p} \cdot \frac{c}{2K + c} = (2K + 1) \frac{c}{2K + c}. \quad (4.36)$$

Отсюда шкала тем ближе к линейной, чем больше  $K$ . Так как линейная шкала описывается выражением

$$S_x/S = c, \quad (4.37)$$

то отклонение от линейности равно

$$\Delta \frac{S_x}{S} = \frac{c(1-c)}{2K+c}. \quad (4.38)$$

Максимальное отклонение от линейности при  $K \gg 1$  определяется выражением

$$\left( \Delta \frac{S_x}{S} \right)_{\max} \approx \frac{1}{2(4K+1)}. \quad (4.39)$$

Эта зависимость представлена на рис. 4.15.

Благодаря симметричности моста изменение сопротивления проводов  $\Delta R_L$  не влияет на равновесие в начале диапазона измерения, так как отношение  $r_3/R_4$  остается постоянным. Для конца диапазона равенство  $S_x = S$  больше не поддерживается, а

$$S_x/S \approx 1 - \Delta R_L/K\Delta R \quad (4.40)$$

и погрешность показаний будет равна

$$f \approx -\Delta R_L/K\Delta R. \quad (4.41)$$

Приведенная на рис. 4.16 мостовая схема имеет, как показывает следующее исследование, существенное преимущество перед схемой 4.14, а. При

$$r_2 = R_2 + R_{TA} \quad (4.42)$$

$$\text{и } K = r_2/\Delta R \quad (4.43)$$

для точек равновесия моста в начале и в конце диапазона измерения

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{r_2 + R'_p}{R_4} \quad \text{и} \quad \frac{R_1 + R'_p}{R_3} = \frac{r_2 + \Delta R}{R_4}.$$

Для симметричного моста, используя соотношения

$$R_3 = R_4 \tag{4.44}$$

$$\text{и} \quad R_1 = r_2 + R'_p, \tag{4.45}$$

получаем аналогично предыдущему примеру

$$K = r_2 / 2R'_p. \tag{4.46}$$

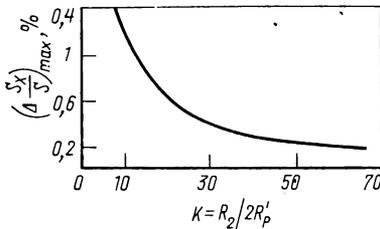


Рис. 4.15. Отклонение от линейности шкалы мостовой схемы рис. 4.14, б по сопротивлению

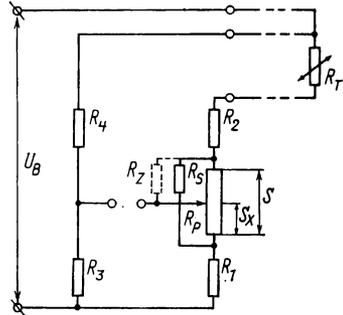


Рис. 4.16. Линейный по сопротивлению измерительный мост (при включении  $R_Z$  частично линеаризован по температуре):  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — сопротивления моста;  $R_p$  — реохорд;  $R_T$  — термометр сопротивления

Исследование характера шкалы приводит к выражению

$$\frac{R_1 + (S_x/S) R'_p}{R_3} = \frac{r_2 + R_T - R_{TA} + R'_p (1 - S_x/S)}{R_4}$$

и выражению для линейной шкалы

$$S_x/S = c. \tag{4.37}$$

Исследуя, как в предыдущем примере, влияние изменения сопротивления проводов  $\Delta R_L$  на показания, получаем

$$\frac{R_1 + (S_x/S) R'_p}{R_3} = \frac{r_2 + R_T - R_{TA} + R'_p (1 - S_x/S) + \Delta R_L}{R_4 + \Delta R_L}.$$

Изменение сопротивления проводов в начале диапазона измерения не будет оказывать влияние на показания, если сопротивление левой ветви моста сопротивлению правой. Тогда справедливо равенство

$$R_1 = R_3 = R_4 = r_2 + R'_p$$

и в результате после преобразований получаем

$$S_x/S = c \frac{1 + \Delta R_L/R_4}{(1 + \Delta R_L/2R_4)(1 + \Delta R_L/K\Delta R)}. \tag{4.47}$$

Поскольку при практическом использовании всегда  $\Delta R_L \ll R_4$ ,  $\Delta R_L \ll \ll K \Delta R$  и  $K \gg 1$ , то можно считать, что

$$S_x/S \approx c(1 - \Delta R_L/2K\Delta R) \quad (4.48)$$

и погрешность в конце диапазона измерения ( $c = 1$ )

$$f = -\Delta R_L/2K\Delta R. \quad (4.49)$$

Из этого расчета отчетливо видны преимущества этой мостовой схемы перед предыдущими: для всех значений  $K$  шкала линейна по сопротивлению, влияние сопротивления проводов почти вдвое меньше, что видно из сравнения формул (4.41) и (4.49).

### Линеаризация температурных показаний

Хотя показания компенсационных измерительных приборов с мостовой схемой, приведенной на рис. 4.16, линейны по сопротивлению, однако они не линейны по температуре из-за нелинейности градуировочной характеристики термометра сопротивления. Точная линеаризация весьма затруднительна, однако можно простым методом достичь достаточной для многих целей линейности. В зависимости от того, становится ли градуировочная кривая с повышением температуры более пологой (Pt) или более крутой (Ni и полупроводники), реохорд  $R_p$  должен быть нагружен дополнительным сопротивлением  $R_Z$  между скользящим контактом и началом реохорда или между скользящим контактом и концом реохорда. Напряжение  $U_x$  между скользящим контактом и началом реохорда относится к общему напряжению  $U$  как

$$\frac{U_x}{U} = \frac{x}{ax(1-x) + 1}, \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (4.50a)$$

$$\text{или } \frac{U_x}{U} = \frac{x + ax(1-x)}{ax(1-x) + 1}, \quad (4.50b)$$

$$\text{где } a = R_p/R_Z. \quad (4.51)$$

Обозначив отклонение от линейной зависимости через  $\Delta \frac{U_x}{U}$ , получим

$$\Delta \frac{U_x}{U} = -\frac{ax^2(1-x)}{ax(1-x) + 1}$$

$$\text{или } \Delta \frac{U_x}{U} = \frac{ax(1-x)^2}{ax(1-x) + 1}.$$

Для заданного отклонения от линейности в середине шкалы  $\Delta U_{0,5}$ , т. е. при  $x = 0,5$ , в обоих случаях получим

$$a = 8 \frac{\Delta U_{0,5}/U}{1 - 2\Delta U_{0,5}/U}, \quad (4.52a)$$

а при малых отклонениях

$$a \approx 8\Delta U_{0,5}/U. \quad (4.52b)$$

Это соотношение просто использовать, если напряжение  $U$ , т. е. общее напряжение на потенциометре, не изменяется при изменении положения скользящего контакта. Поэтому реохорд  $R_p$  должен быть запитан от источника тока с малым внутренним сопротивлением. Это условие на практике обычно выполняется достаточно полно, так как для достижения высокой разрешающей способности реохорды изготавливают из возможно более тонкой проволоки. При этом получают сопротивление от 500 до 5000 Ом и затем устанавливают его необходимую величину параллельным включением сопротивления  $R_s$ .

Вследствие характерной кривизны градуировочной кривой платинового термометра сопротивление  $R_Z$  должно быть включено, как показано на рис. 4.16, между скользящим контактом и концом реохорда. Выведенные выражения справедливы и при обратной кривизне градуировочной кривой (у никелевого термометра сопротивления), которая может быть линеаризована включением сопротивления между скользящим контактом и началом реохорда.

Аналогично расчету схемы без  $R_Z$  для равновесия в начале и в конце диапазона получаем (см. рис. 4.16)

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{r_2 + R'_p \beta}{R_4} \quad \text{и} \quad \frac{R_1 + R'_p}{R_3} = \frac{r_2(1 + 1/K)}{R_4}, \quad (4.53)$$

где  $\beta = R_Z/(R'_p + R_Z)$  при условии симметрии уравнения (4.44):

$$K = r_2/R'_p(1 + \beta). \quad [(4.54)]$$

Сопоставление выражений (4.54) и (4.43) дает выражение

$$R'_p = \Delta R/(1 + \beta). \quad (4.55)$$

Подставляя выражение (4.53) в (4.55) и учитывая, что  $R_Z \gg R'_p$ , получаем

$$R'_p = \frac{\Delta R}{2(1 - \Delta R/4R_Z)}. \quad (4.56)$$

Отсюда, используя (4.9) и (4.52), получаем выражение для  $R_s$ :

$$R_s = 0,5\Delta R \frac{1}{(1 - \Delta R/2R_p)(1 + 0,5a)}. \quad (4.57)$$

С помощью этих выражений можно рассчитать все сопротивления моста при заданном отклонении от линейности в середине диапазона. При малой величине диапазона измерения благодаря тому, что  $\Delta R \ll R_p$  и  $\Delta R \ll R_Z$ , можно рассчитать  $R_s$  по приближенной формуле:

$$R_s \approx 0,5\Delta R[(1 + \Delta R/2R_p)(1 + 0,5a)]. \quad (4.58)$$

Это равенство может быть принято строго, если реохорд  $R_p$  запитан от источника тока с внутренним сопротивлением  $R_i = 0$ . Так как это условие в мостовых схемах чаще всего выполняется с достаточным приближением, но никогда не выполняется точно, необходимо провести оценку возникающей из-за этого погрешности. При  $R_i \neq 0$

$$\frac{U_x}{U} = \frac{x + ax(1-x)}{1 + ax(1-x) + (R_i/R_Z)(1-x) + (R_i/R_p)}.$$

При  $a \ll 1$  и  $R_i \approx R_s \ll R_p$  это выражение можно заменить приближенным выражением

$$\frac{U_x}{U} = [ax(1-x) + x] \left[ 1 - ax(1-x) - \frac{R_s}{R_Z}(1-x) - \frac{R_s}{R_p} \right].$$

Отклонение этой функции от прямой, проходящей через точки  $p_1 \{x = 0; U_x/U = 0\}$  и  $p_2 \{x = 1; U_x/U = 1 - R_s/R_p\}$ , в точке  $x = 0,5$  равно

$$\left( \Delta \frac{U_x}{U} \right)_{x=0,5} \approx \frac{1}{8} a - \frac{R_s}{4R_Z}.$$

Сопоставлением с (4.526) можно получить погрешность в середине шкалы

$$f \approx -R_s/4R_Z. \quad (4.59)$$

Такой погрешностью при линеаризации можно пренебречь.

**Примеры расчета.** 1. Пусть надо установить параметры моста по схеме рис. 4.14, б для компенсационного измерительного прибора. Чувствитель-

ность срабатывания системы сервопривода равна  $\pm 10$  мкВ. Погрешность установки скользящего контакта потенциометра должна быть не больше 0,1%, так что выходное напряжение моста при наибольшем рассогласовании должно быть  $U_A \geq 10$  мВ. Блок питания подает на мост напряжение 1 В. Сопротивление потенциометра, включая  $R_s$ , равно  $R'_p = 20$  Ом. В качестве датчика температуры применен термометр сопротивления Pt100. Для диапазона температур 0—100°С  $R_{TA} = 100$  Ом,  $R_{TE} = 138,5$  Ом,  $\Delta R_T = 38,5$  Ом.

Исходя из чувствительности сервосистемы можно оценить требуемую величину тока, мА, через термометр сопротивления

$$i_{RT} = U_A / \Delta R_T = 10 / 38,5 = 0,26.$$

Принимая максимальный ток термометра  $i_{RT} = 0,4$  мА, из уравнений с (4.27) по (4.33) получаем

$$r_3 + R_4 = U_B / i_{RT} = 1 / 0,4 = 2500 \text{ Ом},$$

$$R_4 = 1250 \text{ Ом}, \quad K = \frac{r_3}{\Delta R} = 1250 / 38,5 = 32,467,$$

$$r_3 = 1250 \text{ Ом}, \quad R_2 = 2R_p K = 1298,7 \text{ Ом},$$

$$R_3 = r_3 - R_{TA} = 1150 \text{ Ом}, \quad R_1 = R_2 + R_p = 1318,7 \text{ Ом}.$$

Отклонение от линейности, %, в середине шкалы составляет по уравнению (4.39)  $(\Delta S_x / S)_{\max} \approx 0,4$ .

Отклонение градуировочной кривой платинового термометра сопротивления от линейной зависимости в этом диапазоне составляет примерно 0,4%, так что нелинейность температурной шкалы измерительного прибора оказывается равной около 0,8%.

Изменение сопротивления проводов  $\Delta R_L = 10$  Ом дает согласно (4.4) погрешность в конце шкалы, составляющую, %:

$$f \approx -10 / 32,47 \cdot 38,5 = -0,8.$$

2. Для схемы рис. 4.16 и того же применения при  $R_p = 1000$  Ом по формулам (4.42)—(4.47) получаем следующие значения сопротивлений, Ом:

$$R_1 + r_2 + R'_p = R_3 + R_4 = 1 / 0,4 = 2500,$$

$$R_1 = r_2 + R'_p = R_3 = R_4 = 1250,$$

$$R'_p = \Delta R / 2 = 19,25,$$

$$r_2 = R_1 - R'_p = 1230,75,$$

$$R_2 = r_2 - R_{TA} = 1130,75,$$

$$R_s = 1000 \cdot 19,25 / (1000 - 19,25) = 19,62,$$

$$K = 1230,75 / 38,5 \approx 32.$$

Так как показания моста линейны по сопротивлению, нелинейность шкалы прибора по температуре равна нелинейности градуировки термометра сопротивления, в данном случае около 0,4%.

Погрешность в конце шкалы при изменении сопротивления проводов  $\Delta R_L = 10$  Ом составляет, %, по формуле (4.49)

$$f \approx -10 / 2 \cdot 32 \cdot 38,5 = -0,4.$$

3. Определение параметров приближенно линеаризованного по температуре моста мало отличается от предыдущего расчета. Отклонение градуировки термометра сопротивления от линейной, которое необходимо скомпенсировать, в середине диапазона измерения составляет

$$\left( \Delta \frac{R_{Tx}}{\Delta R_T} \right)_{x=0,5} = \frac{119,40 - 119,25}{38,5} = 3,9 \cdot 10^{-3}.$$

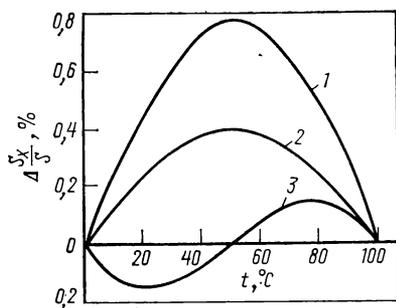


Рис. 4.17. Отклонение от линейности температурной шкалы мостов, используемых для расчета в примерах 1, 2 и 3

В соответствии, с (4.52а) получаем

$$a = \frac{8 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}{1 - 2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}} = 3,14 \cdot 10^{-2}.$$

Из уравнения (4.51)

$$R_Z = \frac{1000}{3,14 \cdot 10^{-2}} = 31,8 \text{ кОм},$$

из уравнения (4.58)

$$R_s \approx 19,25 [1 + (19,25/1000) (1 + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 10^{-2})] = 19,63 \text{ Ом}.$$

Из условия симметрии уравнения (4.44) следует

$$R_1 = R_3 = R_4 = r_2 + \beta R'_p.$$

Для достижения необходимой чувствительности снова принимаем  $R_1 = 1250 \text{ Ом}$ . Из уравнения (4.56) получаем

$$R'_p \approx 19,25 [1 + (38,5/4 \cdot 32) 10^{-3}] = 19,256 \text{ Ом}$$

и из уравнений (4.53) и (4.42)

$$\beta R'_p = R'_p (1 - R'_p/R_Z) = 19,256 [1 - (19,256/31,8) 10^{-3}] = 19,244 \text{ Ом},$$

$$r_2 = R_1 - \beta R'_p = 1250 - 19,244 = 1230,756 \text{ Ом},$$

$$R_2 = r_2 - R_{TA} = 1130,756 \text{ Ом}.$$

Изменение сопротивления проводов вызывает такую же погрешность показаний в конце шкалы, как и в примере 2, т. е. 0,4% при  $\Delta R_L = 10 \text{ Ом}$ . Отклонение от линейности по всей шкале для всех трех примеров показано на рис. 4.17.

#### 4.1.2.1.4. Измерительные преобразователи для термометров сопротивления

Подобно описанным в разделе 4.1.1.2.3 преобразователям для термопар существуют измерительные преобразователи для термометров сопротивления, которые преобразуют определенный диапазон сопротивлений датчика и тем самым определенный температурный диапазон в нормированный электрический сигнал, например 0—20 мА. В то время как выходной сигнал преобразователей для термопар нелинеен по температуре из-за нелинейности градуировочных кривых термопар, измерительные преобразователи для термометров сопротивления могут быть изготовлены с выходным сигналом, линейным как по сопротивлению, так и по температуре. Схема измерительного преобразователя с линейным по сопротивлению выходным сигналом показана на рис. 4.18.

Обозначив сопротивление  $R_T$  в начале измеряемого диапазона температур через  $R_{TA}$ , так что при указанном на схеме направлении  $I_A$  и полярности напряжения  $U$  приращение сопротивления  $\Delta R_T = R_T - R_{TA}$ , и с учетом важного для трехпроводной схемы условия  $R = R_{TA} + R_K$  получим

$$U_E = \frac{U \Delta R_T - 2I_A R_K R}{2(2R + \Delta R_T)},$$

$$(I_A/V) 2(2R + \Delta R_T) = U \Delta R_T - 2I_A R_K R. \quad (4.60)$$

При достаточно большом усилении ( $V \rightarrow \infty$ ) получаем

$$I_A = U \Delta R_T / 2R R_K. \quad (4.61)$$

Линейная зависимость между выходным током  $I_A$  и температурой  $T$  для платинового 100-Ом термометра сопротивления может быть достигнута тем [4.12], что напряжение моста  $U$  изменяется пропорционально  $I_A$ , в результате чего увеличивающийся с повышением температуры наклон градуировочной кривой термометра сопротивления компенсируется.

Соответствующая схема показана на рис. 4.19. Руководство по расчету сопротивлений  $R_K$  и  $R_L$  можно найти в указанной литературе. Известны и другие способы линеаризации показаний платиновых термометров сопротивления. В [4.12а] описан импульсный метод измерения.

Схема измерительного преобразователя для термометров сопротивления, разработанная Тзейван и Банко (рис. 4.20), отличается тем, что особенно просто могут быть установлены начало и величина температурного диапазона. Если сначала принять линеаризующее сопротивление бесконечно большим, то при достаточно большом усилении  $V_1$  справедливо равенство  $I_1 = I_2$  и, следовательно,  $U_E = I_1(\alpha P - R_T)$ .

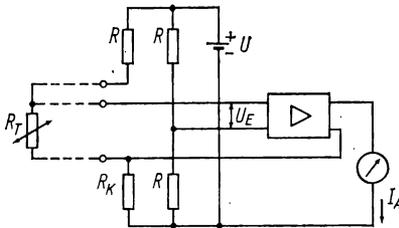


Рис. 4.18. Измерительный преобразователь с линейным по сопротивлению выходным сигналом:

$R$  — сопротивления моста;  $R_K$  — компенсирующее сопротивление;  $R_T$  — термометр сопротивления

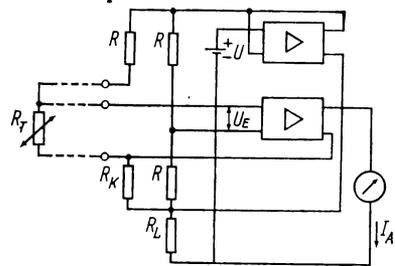


Рис. 4.19. Измерительный преобразователь с линейным по температуре выходным сигналом:

$R$  — сопротивления моста;  $R_K$  — компенсирующее сопротивление;  $R_L$  — линеаризующее сопротивление;  $R_T$  — термометр сопротивления

Если снова принять, что  $R_T = R_{TA} + \Delta R_T$ , то очевидно, что начало диапазона измерения ( $I_A = 0$ ) можно установить, сделав  $\alpha P = R_{TA}$ . Тогда  $U_E = -I_1 \Delta R_T$  и при  $V_2 \rightarrow \infty$

$$I_A = -I_1(\Delta R_T/R_K). \quad (4.62)$$

Таким образом, при постоянном токе  $I_1$  сопротивление  $R_K$  определяет начало диапазона измерения. Линейный по температуре выходной сигнал получается при определенном значении  $R_L$ . При этом особенно важным преимуществом для практического применения является то, что  $R_L$  зависит только от определяемого схемой в целом диапазона измерения, а не от установленных значений сопротивлений реохорда  $P$  и переменного сопротивления  $R_K$ . При конечном значении  $R_L$  получается

$$U_E = \alpha P I_1 - R_L I_L;$$

$$R_L I_L = R_T (I_2 - I_L); \quad I_2 - I_L = I_1 + I_L;$$

$$I_L = \frac{R_T}{R_L} (I_1 + I_L); \quad I_L = \frac{R_T}{R_L - R_T} I_1;$$

$$U_E = \left( \alpha P - \frac{R_L R_T}{R_L - R_T} \right) I_1;$$

$$I_A = \frac{I_1}{R_K} \left( \alpha P - \frac{R_L R_T}{R_L - R_T} \right). \quad (4.63)$$

Величина  $R_L$  может определяться тем, что, например, градуировочная кривая 100-Ом платинового термометра по ДИН 43760 должна точно соответствовать линейной зависимости в трех точках в начале, середине и конце температурного диапазона, устанавливаемого величинами сопротивлений  $P$  и  $R_K$ .

Для диапазона  $(-100) - 600^\circ\text{C}$  рассчитанное значение  $R_L$  равно 2431,4 Ом. При этом сопротивлении погрешность линейризации составляет для всего диа-

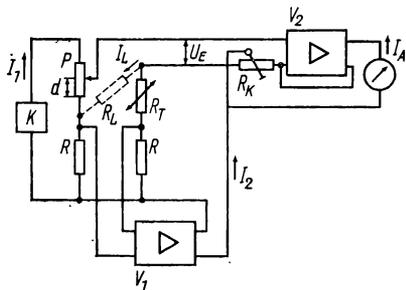


Рис. 4.20. Измерительный преобразователь с выходным сигналом, линейным или по сопротивлению, или по температуре, с облегченной установкой диапазона измерения:

$R$  — сопротивления моста;  $R_K$  — компенсирующее сопротивление;  $K$  — стабилизированный источник тока;  $R_L$  — линейризирующее сопротивление;  $R_T$  — термометр сопротивления;  $P$  — уравнивающий реохрд;  $V_1$  и  $V_2$  — усилители

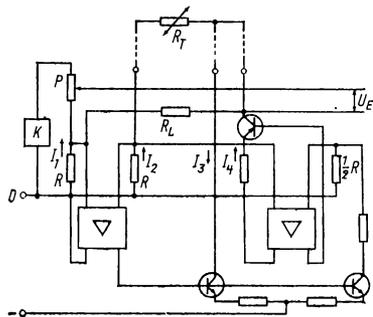


Рис. 4.21. Измерительный преобразователь, аналогичный приведенному на рис. 4.20, но с трехпроводной схемой включения термометра сопротивления

пазона менее 0,05%. Принципиальная схема, приведенная на рис. 4.20, пригодна только для двухпроводного включения термометра. На рис. 4.21 показана схема трехпроводного включения термометра, которая основана на том, что токи  $I_2$  и  $I_4$  равны — каждый  $0,5I_3$ . Благодаря этому компенсируется падение напряжения на соединительных проводах при условии равного сопротивления проводов.

#### 4.1.2.2. МЕТОД ГАЛЬВАНОМЕТРА

##### 4.1.2.2.1. Мостовые схемы с магнитоэлектрическими гальванометрами и их расчет

Если мост не уравнивается изменением сопротивления до исчезновения тока в диагональной ветви, а используют в качестве меры температуры отклонение стрелки гальванометра (рис. 4.22), то результат измерения зависит от напряжения питания. Поэтому для производственных измерений при помощи таких неуравновешенных мостов необходимы стабилизированные источники напряжения и тока. Влияние колебаний напряжения возрастает пропорционально расогласованию моста, т. е. пропорционально показанию гальванометра, и исчезает только в точках равновесия. Соответствующим выбором параметров моста точки равновесия можно поместить в тот диапазон шкалы, в котором предполагается проводить наибольшее число измерений или в котором нужна наибольшая точность. Для того чтобы погрешность измерений не увеличивалась, необходимо, учитывая допустимую погрешность от нагрева, не превышать определенную величину электрической мощности, превращающейся в термометре сопротивления в тепло (см. 3.2.2.4). Поэтому целесообразно выбирать параметры моста таким образом, чтобы при определенной мощности на термометре мощность, поступающая на гальванометр, была как можно больше [4.13]. Оказывается, что

отношение мощности, поступающей на гальванометр, к мощности, превращающейся в тепло в термодатчике  $R_T$ , тем больше, чем больше  $R_4$  и чем меньше  $R_1$ . При  $R_1 = R_T/6$  и  $R_4 = 6R_T$  мощность, поступающая на гальванометр, почти в три раза больше, чем при симметричном мосте, предполагающем оптимальное согласование моста с гальванометром. Однако при этом усиливается влияние изменения сопротивления проводов на показания.

При расчете неуравновешенного моста необходимо учитывать целый ряд противоречивых требований. Как правило, задают диапазон измерения, гальванометр, термодатчик и источник напряжения; мост необходимо рассчитать так, чтобы: 1) гальванометр был оптимально демпфирован; 2) влияние изменения сопротивления проводов на показания было возможно меньшим; 3) электрическая мощность, подаваемая на термодатчик, не превышала определенной величины.

По [4.14] ток в диагонали моста при обозначениях рис. 4.22 равен

$$I_a = \frac{I_{a0}}{1 + \Lambda \Delta R'_T}, \quad (4.64)$$

$$\Delta R'_T = \Delta R_T / R_T^*, \quad (4.65)$$

где  $R_T^*$  — сопротивление термометра, при котором мост уравновешен, т. е. выполняется равенство

$$R_T^* R_2 - R_1 R_4 = 0, \quad (4.66)$$

$\Delta R_T$  — разность сопротивления термометра при температуре  $t$  и при температуре «равновесного» значения, равная

$$\Delta R_T = R_T - R_T^*. \quad (4.67)$$

Величины  $I_{a0}$  и  $\Lambda$  определяют следующим образом:

$$I_{a0} = \frac{R_T^* \Delta R'_T U_S}{[(1 + \gamma) R_1 + (1 + \lambda) R_g] [(1 + \lambda) R_4 + (1 + \gamma) R_S]}, \quad (4.68)$$

$$\Lambda = \frac{R_T^* [R_T^* + R_1 + R_4 + (1 + \lambda) R_g + (1 + \gamma) R_S] + \gamma \lambda R_g R_S}{[(1 + \gamma) R_1 + (1 + \lambda) R_g] [(1 + \lambda) R_4 + (1 + \gamma) R_S]}, \quad (4.69)$$

где  $\gamma = R_T^*/R_1$ ,  $\lambda = R_T^*/R_4$ ,  $R_g = R_V + R_{Cu} + R_{Sp}$ .

Таким образом,  $R_g$  представляет собой полное сопротивление диагональной ветви моста.

Для полностью симметричного моста при

$$R_1 = R_2 = R_T^* = R_4 = R \quad \text{и} \quad \gamma = \lambda = 1$$

выражения (4.68) и (4.69) упрощаются:

$$I_{a0} = \frac{R \Delta R'_T U_S}{4 (R + R_g) (R + R_S)}, \quad (4.70)$$

$$\Lambda = \frac{3R^2 + 2R (R_g + R_S) + R_g R_S}{4 (R + R_g) (R + R_S)}. \quad (4.71)$$

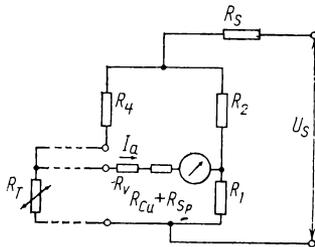


Рис. 4.22. Неуравновешенный мост для измерений температуры термометром сопротивления:

$R_1, R_2, R_4$  — сопротивления моста;  $R_T$  — термометр сопротивления;  $R_V, R_{Cu}, R_{Sp}$  — сопротивления цепи гальванометра (диагональной ветви)

При заданных значениях  $U_S$ ,  $I_a$  и  $R_T$  представляет интерес прежде всего дополнительное сопротивление  $R_S$ , определяющее чувствительность моста. Решение уравнения (4.68) относительно  $R_S$  дает

$$R_S = \frac{R_T^* \Delta R_T' (U_S / I_a) - \{ R_4 (1 + \lambda) [(1 + \gamma) R_1 + (1 + \lambda) R_g] + (1 + \gamma) R_T^* \Delta R_T' + R_T^* (R_T^* + R_1 + R_4) \Delta R_T' + R_T^* R_g (1 + \lambda) \Delta R_T' \}}{(1 + \gamma) [(1 + \gamma) R_1 + (1 + \lambda) R_g] + (1 + \gamma) R_T^* \Delta R_T' + \gamma \lambda R_g \Delta R_T'} \quad (4.72)$$

и для полностью симметричного моста

$$R_S = \frac{\Delta R_T' (U_S / I_a) - (4R + 4R_g + 3R \Delta R_T' + 2R_g \Delta R_T')}{4R + 4R_g + 2R \Delta R_T' + R_g \Delta R_T'} R_T \quad (4.73)$$

Примеры расчета. 1. Надо определить параметры измерительного моста с трехпроводной схемой включения термометра сопротивления (см. рис. 4.22), работающего по методу гальванометра. Гальванометр должен быть таким, как в примере к разделу 4.11.2, термоприемник — термометр сопротивления Pt 100, диапазон измерения 0—100°С при  $R_{TA} = 100$  Ом,  $R_{TE} = 138,5$  Ом и  $U_S = 1$  В.

Если мост симметричен и точка равновесия приходится на начало диапазона измерения, то

$$R_1 = R_2 = R_4 = R_T^* = R_{TA} = 100 \text{ Ом}$$

$$\text{и } \Delta R_T' = \frac{R_{TE} - R_{TA}}{R_{TA}} = 0,385.$$

Отклонения сопротивления проводов и рабочего напряжения  $U_S$  от расчетных значений не оказывают влияния на показания в начале диапазона. Оптимальное для демпфирования гальванометра сопротивление схемы получается по формуле (4.6) равным  $R_{opt} = 273$  Ом. При внутреннем сопротивлении моста  $R_i = 100$  Ом для оптимального демпфирования расчет дает

$$R_g = R_{opt} - R_i = 173 \text{ Ом},$$

$$R_V = R_g - (R_{Cи} + R_{Sp}) = 123 \text{ Ом}.$$

Используя эти значения, можно из выражения (4.73) определить дополнительное сопротивление  $R_S = 412$  Ом.

Расчет электрической мощности термометра сопротивления дает  $I_{RT} \approx 1$  мА и  $P_{RT} \approx 1$  мВт. Характеристику шкалы можно определить подстановкой числовых значений в формулу (4.70):

$$I_a(\Delta R_T') = \frac{0,179 \Delta R_T'}{1 + 0,391 \Delta R_T'}, \quad (0 \leq \Delta R_T' \leq 0,385).$$

Нелинейность шкалы показана на рис. 4.23.

2. Определить параметры моста для измерений в диапазоне 0—20°С; термометр сопротивления, источник напряжения и гальванометр те же, что и в примере 1.

$$R_{TA} = 100 \text{ Ом}, \quad R_{TE} = 107,79 \text{ Ом}.$$

Снова принимаем для оптимального демпфирования гальванометра  $R_g = 173 \text{ Ом}$ ; тогда при  $\Delta R_T = 0,079$  получаем по формуле (4.73)  $R_S = 14,05 \text{ Ом}$ . Электрическая мощность термометра сопротивления при этом составит  $P_{RT} \approx 2 \text{ мВт}$  при токе  $I_{RT} \approx 4,5 \text{ мА}$ .

3. Если такая мощность вызывает повышение температуры термометра сопротивления, которое недопустимо искажает результаты измерения, то ее можно уменьшить следующим образом. Исключая условия оптимального демпфирования, принимаем  $R_V = 0$ . В этом случае  $R_g = R_{Cu} + R_{Sp} = 50 \text{ Ом}$ .

Тогда демпфирующее сопротивление гальванометра составляет

$$R_0 = R_i + R_{Cu} + R_{Sp} = 150 \text{ Ом}$$

и степень затухания по формуле (4.4) будет равна

$$\delta = 190/150 = 1,27.$$

При этом время успокоения по диаграмме (4.1) получается равным около  $1,3T_0$ ,  $t_B \approx 1,3 \cdot 4,2 \approx 5,5 \text{ с}$ .

Эта величина в большинстве случаев вполне допустима для приборов-индикаторов температуры. Из (4.73) получаем значение  $R_S = 108,1 \text{ Ом}$ .

Электрическая мощность на термометре сопротивления будет тогда равна  $P_{RT} \approx 1 \text{ мВт}$  при токе  $I_{RT} \approx 3,2 \text{ мА}$ .

4. Можно достичь лучшего баланса мощности, если внутреннее сопротивление моста (измеренное между клеммами для подключения гальванометра) как можно точнее согласовать с сопротивлением гальванометра. Для этого нужен несимметричный мост. При

$$R_4 = R_T = 100 \text{ Ом}, \quad R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом},$$

$$\gamma = R_T^*/R_1 = 10, \quad \lambda = R_T^*/R_4 = 1$$

в уравновешенном состоянии внутреннее сопротивление равно

$$R_i = 0,5 \cdot 110 = 55 \text{ Ом}.$$

Демпфирующее сопротивление составит тогда

$$R_0 = R_g + R_i = 50 + 55 = 105 \text{ Ом}.$$

При этом

$$\delta = 190/105 = 1,81$$

и время успокоения по рис. 4.1

$$t_B \approx 2,2 T_0 \approx 9,25 \text{ с}.$$

Из (4.72) рассчитываем сопротивление  $R_S = 34,6 \text{ Ом}$ , тогда мощность на термометре сопротивления будет равна

$$P_{RT} \approx 0,3 \text{ мВт} \text{ при токе } I_{RT} \approx 1,7 \text{ мА}.$$

#### 4.1.2.2.2. Логометрический метод

Избежать присущей методу гальванометра зависимости от напряжения питания можно, используя логометрические измерительные приборы. У этих приборов момент вращения подвижной катушки уравновешивается не моментом

пружины, а моментом второй катушки, на которую подается то же напряжение, что и на схему измерения. Благодаря тому что изменение напряжения распределяется на обе катушки, равновесие моментов не нарушается, и тем самым показания этих приборов не зависят от напряжения питания. Так как на практике никогда не удается полностью избавиться от действия силы реакции токоподводов к катушке, у логометров тоже можно зафиксировать (обычно пренебрежимо малую) зависимость показаний от напряжения. По сравнению с обычными магнитоэлектрическими приборами эта зависимость в 10—20 раз слабее.

Наиболее известным прибором этого типа является измерительный прибор со скрещенными подвижными катушками [4.16]. Он имеет, как и магнитоэлектрический прибор, постоянный магнит и систему подвижной рамки. Однако на подвижной рамке намотаны две плоские скрещенные обмотки, которые включены так, что их вращающие моменты направлены навстречу друг другу. Кроме того, магнитное поле в воздушном зазоре, где перемещается подвижная рамка, неоднородно. Для создания неоднородности поля полюсному отверстию или сердечнику придают эллиптическую форму. Если обозначить через  $B_1$  среднюю плотность магнитного потока перпендикулярно плоскости обмотки 1, через  $W_1$  ее число витков и через  $i_1$  ее ток, то для любого отклонения системы скрещенных катушек справедливо равенство

$$B_1 W_1 i_1 = B_2 W_2 i_2. \quad (4.74)$$

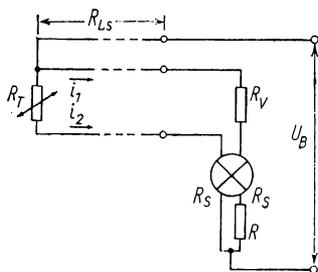
Если уменьшается, например,  $i_1$ , то система поворачивается так, что  $B_1$  становится больше, а  $B_2$  меньше. Если же  $i_1$  и  $i_2$  изменяются в одно и то же число раз, то система остается в покое.

На рис. 4.24 показана обычная трехпроводная схема для измерения температуры с помощью прибора со скрещенными обмотками. Отношение токов, определяющее отклонение стрелки прибора, равно

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_T + R_{Ls} + R_S + R}{R_V + R_{Ls} + R_S} \quad (4.75)$$

Рис. 4.24. Схема измерения температуры термометром сопротивления и логометром (трехпроводная схема включения термометра):

$R_V$  — эталонное сопротивление;  $R_S$  — сопротивление катушек логометра;  $R_{Ls}$  — сопротивление соединительных проводов;  $R_T$  — термометр сопротивления



и не зависит, таким образом, от напряжения  $U_B$ . Изменением величины  $R$  может быть установлен диапазон измерения. Наибольшая чувствительность достигается при  $R = 0$ .

Для оптимального демпфирования логометра сопротивления измерительной схемы и прибора должны быть согласованы. Однако простое определение оптимальной величины демпфирующего сопротивления, исходя из параметров прибора, для логометров невозможно, так как индукция в воздушном зазоре не постоянна и скрещенные катушки, как правило, намотаны на алюминиевые рамки, которые в зависимости от сопротивления сами оказывают демпфирующее воздействие. Поэтому целесообразно определять параметры схемы измерения по рекомендации изготовителя или экспериментально.

Если в схеме неуравновешенного моста вместо магнитоэлектрического гальванометра применить логометр, то можно уменьшить зависимость показаний от напряжения в 10—20 раз.

Для применения в мостах разработаны специальные измерительные приборы, из которых наиболее известны мостовой логометр и прибор с Т-образной катушкой [4.17, 4.18]. Они позволяют, кроме всего прочего, уменьшить влияние изменения температуры прибора и подводящих проводов благодаря тому, что токи в основной и уравнивающей обмотках имеют один и тот же температурный коэффициент.

Для этой цели часть добавочного сопротивления в цепи уравнивающей катушки изготавливают из меди [4.19].

### 4.1.2.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

#### 4.1.2.3.1. Дифференциальные схемы измерения температуры

Для измерения разности или суммы температур наряду с термопарами используют и термометры сопротивления. При измерении разности температур для повышения чувствительности включают два термометра в противоположные плечи моста.

При малой разности температур к точности измерения предъявляют высокие требования. В этих случаях целесообразно использовать компенсационные приборы или измерительные усилители. При измерении больших разностей температуры с использованием платиновых или никелевых термометров сопротивления может возникнуть погрешность из-за нелинейности их характеристик. Никелевые термометры могут быть достаточно хорошо линеаризованы методом трехточечной компенсации (см. 3.2.2). Медные термометры можно применять без линеаризации в диапазоне 0—80°С.

Вследствие повышения сопротивления обоих термометров при повышении температуры относительное изменение сопротивления каждого термометра при постоянной разности температур становится меньше. Из-за этого в простых мостовых схемах, например при использовании метода гальванометра, может возникнуть погрешность, по сравнению с которой погрешность, обусловленная нелинейностью градуировочной кривой, пренебрежимо мала.

Если изменение основной температуры составляет 10% от диапазона измерения, то погрешность измерения разности температур можно считать равной 1%. Поэтому при измерении больших разностей температур следует применять схемы, линейные по сопротивлению. Для этого подходят прежде всего схемы с нулевой компенсацией моста, когда оба термометра располагаются по обе стороны от уравновешивающего потенциометра, т. е. когда второй термометр включен в петлю соединительных проводов (см. рис. 4.11 и 4.1.2.1.4).

С помощью логометрических приборов можно правильно определять разность температур при изменяющейся величине температуры, если схему дополнить двумя вспомогательными термометрами сопротивления, помещенными каждый рядом со своим основным термометром сопротивления, которые воздействуют на ток в уравновешивающей катушке [4.19] (рис. 4.25).

При повышении температуры из-за увеличения сопротивления термометров  $T_1'$  и  $T_2'$  ток через уравновешивающую катушку должен уменьшаться соответственно уменьшению тока через основную катушку. При малой разности температур достаточно одного вспомогательного термометра сопротивления, помещенного рядом с одним из основных термометров сопротивления.

Точно так же разность температур независимо от величины температуры может быть измерена с использованием только двух термометров, включенных в правильно рассчитанную схему двойного моста [4.20].

Подобные схемы используют для реализации параметрических функций, в которых физическая связь между двумя величинами выражается через температуру как через достаточно независимую переменную [4.21]. В качестве примера можно указать на непосредственное представление относительной или абсолютной влажности через температуру при измерении с помощью психрометра или хлористолитиевого влагометра. Далее следует упомянуть об устройствах для компенсации температуры при измерениях проводимости, кислотности (показателя рН) и калориметрических измерениях.

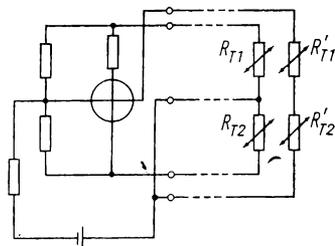


Рис. 4.25. Измерение разности температур с учетом влияния значения температуры ( $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$  — термометры сопротивления)

#### 4.1.2.3.2. Переключение точек измерения

Подобно термометрам несколько термометров сопротивления можно подключить к одному показывающему прибору через многопозиционный переключатель.

Если некоторые контакты переключателя остаются свободными, к ним можно вместо термометров сопротивления подключить калиброванное сопротивление, соответствующее сопротивлению термометра в начале или в конце шкалы. При переключении источник питания должен быть отключен, чтобы избежать повреждения измерительного прибора.

К одному источнику тока нельзя подключать последовательно несколько мостов, так как при недостаточной изоляции одного из термометров сопротивления все остальные будут давать неправильные показания. По этой же причине должны переключаться оба полюса. Если к одному источнику тока подключены параллельно несколько приборов, то соединения должны быть выполнены так, чтобы все термометры сопротивления имели один и тот же потенциал.

## 4.2. ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цифровые методы измерений все больше внедряют не только в прецизионные, но и в производственные измерения. Их преимущество состоит прежде всего в высокой точности, которая может быть достигнута даже в неблагоприятных условиях, а также в том, что результаты измерений могут быть без погрешности заложены в память, обработаны и воспроизведены. Внедрение цифровых вычислительных машин для контроля и управления производственными процессами требует применения цифровых измерительных приборов, которые обычно из соображений экономии используют с большим числом первичных приборов (датчиков) с последовательной их коммутацией. Скорость индикации и возможность согласования с датчиками различного типа являются дополнительными требованиями к цифровым измерительным приборам.

Цифровая техника получила свое название от латинского слова *digitus* (палец). Если вспомнить о том, что раньше считали при помощи десяти пальцев — об этом напоминает основание десятичной системы счисления, то выражение *digital* указывает на то, что в этой технике основную роль играет процесс счета, или представление информации в числовой форме.

### 4.2.1. ЦИФРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ЦИФРОВЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Цифровая измерительная техника отличается от аналоговой тем, что в ней результат измерения может быть представлен только в виде целочисленного множества самых мелких единиц, в то время как в аналоговой технике теоретически возможно деление до бесконечно малых величин. На практике, однако, существует ограничение из-за точности измерения аналоговых приборов и точности отсчета по шкале.

Разложение числового значения измеренной величины на целочисленное множество мельчайших единиц называется квантованием, а мельчайшая единица — квантом измерения. Этот мельчайший квант характеризует естественную погрешность цифровых измерительных приборов, погрешность квантования.

Любое измерение основано на сравнении с эталоном. В цифровой измерительной технике проводится многократное сравнение с квантованным или разбитым на ступени аналоговым эталоном. Весь дальнейший процесс измерения сводится к суммированию числа эталонов, необходимых для сравнения с измеряемой величиной.

Форма представления результатов измерения в виде суммы квантов измерения зависит от того, должен ли результат измерения (цифровое значение) быть индцирован, напечатан или заложен в память, обработан и затем передан дальше.

При непосредственной индикации результатов измерений в цифровой форме наиболее целесообразно числовое значение представлять в десятичной системе счисления, так как человек считает и думает, используя именно эту систему.

Иначе обстоит дело при дальнейшей обработке цифровых данных в электронных устройствах; здесь известен целый ряд форм представления численных величин, обычно называемых кодами. Часто применяется двоичный код, построенный на базе числа 2, так как в нем для представления любого числа достаточно только двух состояний, обозначаемых через 0 и 1. В электротехнике эти состояния означают, например, наличие или отсутствие тока, высокое или низкое напряжение, замкнутый или разомкнутый контакт. Благодаря этому достигается высокая надежность и легкая реализуемость схем. Даже если индицируются цифры десятичной системы, схемотехника построена на двоичном коде, который преобразуется в десятичную систему с помощью так называемых преобразователей кода. При этом наибольшее преимущество дает комбинация обеих систем, при которой каждая декада десятичной системы представлена в двоичном коде (табл. 4.3).

Т а б л и ц а 4.3

**Двоично-десятичное представление декады**

$10^0$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$	$10^0$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
0	0	0	0	0	5	0	1	0	1
1	0	0	0	1	6	0	1	1	0
2	0	0	1	0	7	0	1	1	1
3	0	0	1	1	8	1	0	0	0
4	0	1	0	0	9	1	0	0	1

При передаче результатов измерения на расстояние применяется код с распознаванием ошибок, который благодаря избыточности, т. е. дополнительным комбинационным возможностям и введению опознавательных знаков, обеспечивает повышенную надежность по отношению к помехам.

*Цифровые индикаторы*

Для непосредственного представления результатов измерения существует большое количество цифровых индикаторов, в которых это представление осуществляется по механическому принципу или проецированием цифр через оптическую систему на экран, или индикацией цифр свечением. У механических приборов отдельные цифры нанесены на ленту, ролик или планки, которые при помощи транспортного устройства устанавливаются против смотрового окошца. Приборы со световой индикацией представляют собой чаще всего проекционные или газоразрядные системы, которые индицируют цифры путем управления соответствующими лампочками или электродами тлеющего разряда. Применяются светящиеся элементы или точечные, или сегментной формы, которые через специальный преобразователь кода в своей совокупности образуют нужную цифру. Наконец, существуют индикаторы на базе электроннолучевых трубок, которые благодаря периодическому отклонению луча и яркостной модуляции изображения могут подобно телевизионному устройству представлять на экране целые ряды чисел, буквенных знаков и символов. Из-за сложности схем управления и памяти такие индикаторы применяются преимущественно в качестве выходных устройств цифровых вычислительных машин.

## 4.2.2. МЕТОДЫ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Под аналого-цифровым преобразователем понимается такой прибор, который квантует непрерывно изменяющуюся физическую величину и преобразует ее в код.

В электрических методах измерения температуры в качестве выходного сигнала выступают постоянное напряжение, постоянный ток или сопротивление, которые однозначно зависят от температуры. Сигналы на выходе представляют собой или электрическое напряжение, или положение контактов. В сочетании с выбранным кодом они образуют в комбинационном представлении цифровую выходную информацию, которая при помощи соответствующего устройства может быть индигирована в цифровой форме.

Существует ряд различных методов преобразования, которые различают по сложности, точности, последовательности измерений и подавлению помех от наводок (рис. 4.26). Электрические аналого-цифровые преобразователи по методу преобразования можно разделить на три типа: с преобразованием мгновенных значений (прямое преобразование), со следящим преобразованием, с усредняющим преобразованием.



Рис. 4.26. Наиболее распространенные методы аналого-цифровых преобразований электрических величин

При преобразовании мгновенных значений определяется цифровое значение в момент уравнивания измеряемой величины регулируемой эталонной величиной. Процесс сравнения при этом происходит от момента старта в определенной последовательности. Если, например, в соединительной линии между датчиком измеряемой величины и измерительным прибором возникают помехи, то цифровое значение может принимать мгновенные значения, соответствующие каждому аналоговому сигналу. Это справедливо также и для кратковременных помех.

У следящих преобразователей цифровое значение следует за измеряемой величиной, если превышена заранее заданная величина сигнала рассогласования.

При некотором соотношении между инерционностью схемы управления и ожидаемой скоростью изменения измеряемой величины кратковременные помехи могут быть подавлены.

Еще лучшее подавление помех достигается при усредняющем преобразовании, когда оценивается временной интеграл входной функции. Если время интегрирования выбрано так, что период сигнала помехи (например, сетевой частоты или ее высших гармоник) содержится в нем целое число раз, то достигается полное подавление сигнала помехи.

Если измеряемая величина представлена в виде угла поворота или линейного перемещения, то она может быть преобразована в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя с кодирующим диском или линейкой. Для температурных измерений такие приборы обычно не применяют.

#### 4.2.2.1. СТУПЕНЧАТЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Измерительный процесс ступенчатого преобразователя (рис. 4.27) проходит по жесткой программе уравнивания. Входное напряжение  $U_m$  сравнивается с разделенным на ступени напряжением источника опорного напряжения 4 начиная с высшей ступени делителя напряжения 5  $R_0$  до  $R_n$ . Компаратор 1 при

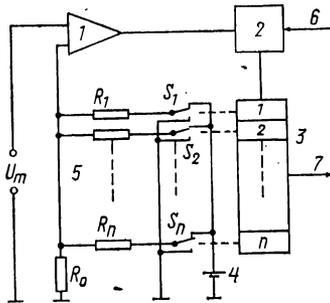


Рис. 4.27. Схема ступенчатого преобразователя:

1 — компаратор; 2 — блок управления; 3 — вычислительные регистры; 4 — источник опорного напряжения; 5 — делитель напряжения;  $R_1 - R_n$  — сопротивления делителя напряжения;  $S_1 - S_n$  — переключатели; 6 — стартовый сигнал; 7 — цифровое значение

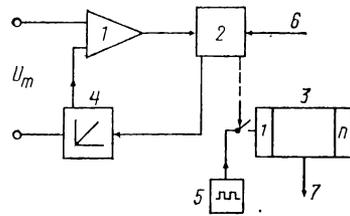


Рис. 4.28. Схема преобразователя с генератором пилообразного напряжения:

1 — компаратор; 2 — блок управления; 3 — счетчик; 4 — генератор пилообразного напряжения; 5 — генератор импульсов; 6 — стартовый сигнал; 7 — цифровое значение

каждом шаге передает в блок управления 2 результат сравнения (больше или меньше сумма включенных ступеней, чем  $U_m$ ). Если она меньше, то последняя ступень не учитывается. После последнего шага компенсирующее напряжение и соответствующее цифровое значение в пределах погрешности квантования равны измеряемому напряжению. Разбивка эталона сравнения на ступени должна соответствовать применяемой системе кодирования. Скорость преобразования по этому принципу очень велика, так как необходимо небольшое число шагов. Например, в 10 двоичных ступенях содержится 1024 возможных цифровых значений. В настоящее время с учетом экономических соображений осуществимы 14-разрядные двоичные преобразователи, которые при разрешении 0,006% обеспечивают предельную погрешность 0,01% и время преобразования около 10 мкс. Благодаря этому приборы этого типа используют преимущественно для периодического опроса большого числа измерительных установок, например для ввода аналоговых величин в цифровую управляющую вычислительную машину.

Другой известный тип преобразователей мгновенных значений работает по принципу пилообразного напряжения (рис. 4.28). Эталонном сравнения служит линейно возрастающее во времени напряжение. Время от момента запуска генератора пилообразного напряжения 4 до совпадения его мгновенного значения (эталонного напряжения) с измеряемым напряжением  $U_m$  измеряется с помощью числа временных отметок, например от стабилизированного кварцевого генератора. Это число пропорционально измеряемому напряжению.

#### 4.2.2.2. СЛЕДЯЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Следящий преобразователь работает подобно представленному на рис. 4.27 ступенчатому преобразователю. Однако в нем выходной регистр 3 заменен реверсивным счетчиком, который получает шаговый импульс от блока автоматического управления только в том случае, если измеряемое напряжение  $U_m$  отличается от компенсирующего напряжения на заранее заданную величину. Знак разности определяет команду счетчику увеличивать или уменьшать результат с помощью импульсов одинаковой величины. При этом одновременно изменяется величина компенсирующего напряжения в цепи управления, пока снова не будет достигнуто равновесие. Стартовый импульс не нужен, так как преобразователь постоянно устанавливается на фактическое значение.

Электромеханические следящие преобразователи в принципе подобны описанному. Система управления состоит здесь из сервомотора, управляемого сигналом схемы сравнения, с механически связанным с ним делителем напряжения и счетчиком-индикатором или кодирующим диском. Последний содержит сегменты, электрически воспроизводящие желаемый код. Таким образом, цифровое значение выражается непосредственно в виде цифр или положения контактов кодирующего диска.

#### 4.2.2.3. ИНТЕГРИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Интегрирующие (усредняющие) аналого-цифровые преобразователи [4.23] получили особенно большое практическое применение для измерения температуры с помощью термопар с их малыми сигналами, так как при возникновении

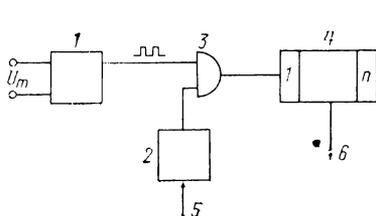


Рис. 4.29. Схема преобразователя напряжения — частота:

1 — преобразователь напряжения в частоту; 2 — генератор временных импульсов; 3 — схема совпадения; 4 — счетчик; 5 — стартовый сигнал; 6 — цифровое значение

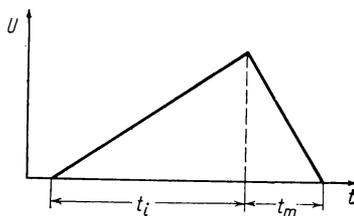


Рис. 4.30. Схема преобразователя напряжение — время

периодических помех интегрирующие аналого-цифровые преобразователи позволяют достичь их полного подавления, если время интегрирования кратно целому числу периодов сигнала помехи. Импульсные помехи подавляются во столько раз, во сколько площадь импульса помехи по времени относится к временному интегралу измеряемой величины. Поэтому время измерения выбирают как можно больше. Наилучшее соотношение между временем измерения и подавлением помех сетевой частоты 50 Гц достигается при времени интегрирования 20 мс.

На рис. 4.29 показана схема устройства, преобразующего измеряемое напряжение  $U_m$  в импульсный сигнал с пропорциональной этому напряжению

частотой. Импульсы суммируются счетчиком 4 в течение действия генератора временных импульсов 2. Тем самым в конце процесса измерения временной интеграл, пропорциональный аналоговым величинам — частоте импульсов и  $U_m$ , представляется счетчиком в цифровой форме.

Другая распространенная схема интегрирующего аналого-цифрового преобразователя работает с интегратором, который непрерывно интегрирует измеряемое напряжение  $U$  в течение всего периода измерения. В конце времени интегрирования  $t_i$  (рис. 4.30) входной сигнал отключается и компенсируется регулируемой опорной величиной противоположного знака, пока не восстановится исходное состояние на выходе. Необходимое для этого время  $t_m$  пропорционально интегралу измеряемого напряжения и может быть отсчитано с помощью кварцевого генератора, как в преобразователе с пилообразным напряжением, и тем самым представлено в цифровой форме.

Это сопоставление важнейших принципов построения схем представляет только раздел в большом ряду аналого-цифровых преобразователей. Путем преобразования схем (например, при замене электрических интеграторов магнитными) и комбинацией различных принципов возможно создание многочисленных типов преобразователей.

### 4.2.3. ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

На рис. 4.31 показаны блок-схемы двух цифровых измерителей температуры [4.24]. В схеме рис. 4.31, а в цифровую систему измерения входят датчик температуры и измерительная схема с нормирующим усилителем АР, аналого-цифровым преобразователем А/Д и цифровым измерительным прибором.

На рис. 4.31, б представлена экономично работающая измерительная система с последовательным подключением нескольких датчиков температуры. Именно в таких системах наиболее выгодно использование цифровых методов измерения температуры.

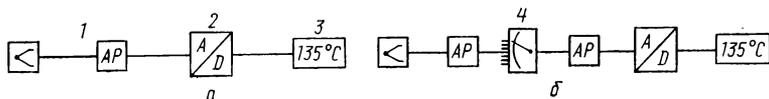


Рис. 4.31. Блок-схема цифровой установки для измерения температуры

Такие установки, работающие с «уплотнением по времени», могут включать в себя большое число датчиков, расположенных в достаточно удаленных точках измерения. При этом особой проблемой является подавление помех, которые накладываются на измеряемое постоянное напряжение через индуктивность и емкость соединительных линий.

Поскольку во многих случаях цифровые системы заземлены, а температурные датчики часто не изолированы от земли, при различных потенциалах земли могут возникать уравнивающие токи, которые через соединительные провода вносят помехи в измерительный контур. Поэтому, особенно при малом уровне измерительного сигнала, как у термоэлектрических термометров, необходимы входные измерительные схемы, свободные от потенциала и с малой емкостью. При малой разности потенциалов достаточно обеспечить симметричность схемы, чтобы она стала приемлемо помехозащищенной в отношении периодических помех.

Исходя из этого температурные датчики необходимо отделять друг от друга при помощи многополюсных переключателей. Целесообразно соединительные провода попарно свивать, экранировать и экран заземлять вблизи точки измерения.

Если, несмотря на эти мероприятия, на входе измерительной схемы наблюдаются возбуждаемые сериями помехи, последние можно подавить с помощью фильтра. Высокочастотные помехи, возникающие при переключении, могут быть легко подавлены небольшими  $RC$ -фильтрами, в то время как от низкочастотных помех, источником которых является в основном силовая сеть, можно избавиться

только с помощью довольно сложных и дорогих фильтров в каждой линии. Если схему упрощают, подключая все первичные приборы к общему фильтру на выходе мультиплексора, то после каждого переключения нужно ждать окончания переходного процесса. Затрачиваемое при этом для опроса время допустимо лишь в некоторых случаях. Например, при коэффициенте подавления помех 60 дБ при частоте 50 Гц для снижения переходных явлений до 0,1% необходимо около 200 мс.

Хорошее сочетание малого времени опроса, оптимального подавления помех и минимальных затрат обеспечивают описанные в 4.2.2 интегрирующие методы преобразования, при которых не нужны дополнительные фильтры. Как показано на рис. 4.32 и 4.33, при времени опроса 20 мс и постоянных частоте помех и времени интегрирования может быть достигнуто такое же

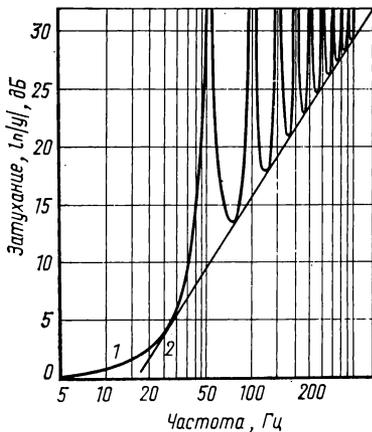


Рис. 4.32. Характеристика затухания интегрирующего аналого-цифрового преобразователя при времени интегрирования 20 мс:

1 — подавление помех; 2 — минимальное подавление аperiodических помех

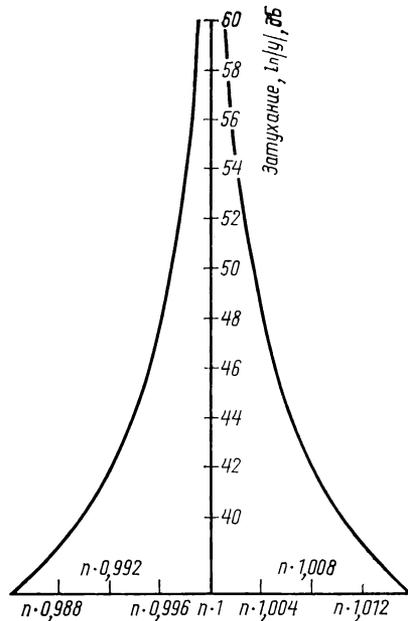


Рис. 4.33. Подавление помех при времени интегрирования 20 мс в окрестностях точек с частотами  $n \cdot 50$  Гц при  $n = 1, 2, 3$  и т. д.

подавление помех, как и при других принципах преобразования, но при длительности переходных процессов в 10 раз большей. Поэтому такие интегрирующие методы преобразования имеют большое практическое значение при работе в режиме временного уплотнения.

Ряд схем согласования для цифровых измерительных систем не отличается от такового для аналоговых систем. Обычно применяют мостовые схемы с источниками тока и напряжения, а также компенсаторы напряжения или термостаты для термоэлектрических термометров (см. 3.2.1.6.3).

#### 4.2.3.1. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Линеаризацию характеристики термометров сопротивления при цифровом методе измерения часто проводят в аналоговой области (см. 3.2.2.3 и 4.1.2.1.3), так как цифровые показания не позволяют исправлять характеристику, как при использовании стрелочных приборов, путем специальной разбивки шкалы.

Однако существуют аналого-цифровые преобразователи с нелинейным компенсационным контуром или цифровые преобразователи, с помощью которых можно скорректировать характеристику.

Один из аналоговых методов линеаризации, применяемых для термометров сопротивления, представлен на рис. 4.34. Источник тока  $I$  питает термометр, включенный по четырехпроводной схеме ( $R_L$  — сопротивление соединительных проводов). Напряжение на термометре при  $0^\circ\text{C}$  компенсируется хорошо стабилизированным противонапряжением  $U_0$ . Разностное напряжение  $U_m$ , соответствующее температуре, подается на аналого-цифровой преобразователь (см. рис. 4.10,б) и управляет источником тока  $I$ . Для линеаризации характеристики ток линейно изменяется с изменением измеряемого напряжения (возрастает с увеличением измеряемой величины). Так как платиновый термометр сопротивления в диапазоне  $(-50) - 500^\circ\text{C}$  имеет почти линейно снижающийся температурный коэффициент, при оптимальном подборе параметров этой схемы достигают отклонения от линейности не более 0,25%. При достаточно высоком входном сопротивлении этой измерительной схемы сопротивление соединительных проводов не оказывает влияния на результаты.

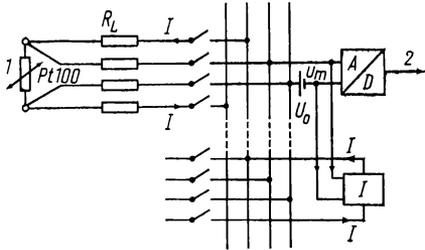


Рис. 4.34. Измерительная схема с аналоговой линеаризацией характеристики термометра сопротивления Pt 100:  $R_L$  — сопротивление соединительных проводов;  $I$  — датчик температуры; 2 — цифровое значение

Этот способ питания постоянным током особенно экономичен благодаря использованию общего для всех датчиков температуры источника тока.

#### 4.2.3.2. КВАРЦЕВЫЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТЕРМОМЕТР

Очень точный и изящный цифровой метод измерения температуры основан на свойстве кристалла кварца изменять резонансную частоту собственных колебаний в зависимости от температуры [4.25, 4.26].

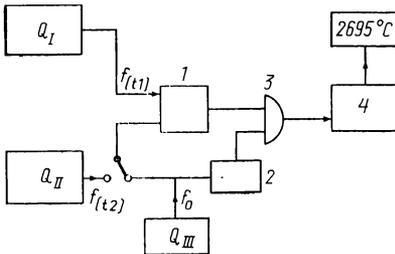


Рис. 4.35. Блок-схема кварцевого термометра:

1 — смеситель; 2 — генератор временных импульсов; 3 — схема совпадения; 4 — счетчик

Известно, что собственная частота колебаний  $f$  пьезоэлектрического кристалла кварца исключительно стабильна. Благодаря высокой стабильности кварцевые осцилляторы используются для высокоточных цифровых измерений времени, которые осуществляются путем отсчета числа колебаний резонансной частоты кристалла в измеряемый интервал времени.

Температурная зависимость частоты кварца может быть описана уравнением

$$f(t) = f_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3). \quad (4.75a)$$

При использовании специальных направлений среза кристаллов кварца можно получить направление оси кристалла, для которого наибольший коэффициент  $\alpha$  равен нулю. Благодаря этому частота колебаний такого кристалла практически не зависит от температуры. Можно, однако, найти такой срез кристалла, для которого практически исчезают коэффициенты высших порядков. Тогда резонансная частота почти линейно зависит от температуры, благодаря

чему кварц является превосходным датчиком для цифровых измерений температуры.

На рис. 4.35 показана блок-схема установки для измерения температуры, работающей по описанному принципу, который в основном соответствует интегрирующему аналого-цифровому преобразованию с представлением напряжения в виде частоты, только здесь совмещены датчик измеряемых величин и генератор квантования.

Кварц  $Q_1$  в сочетании со схемой генератора представляет собой датчик измеряемых величин. Чтобы подавить частоту  $f(t=0)$ , частота  $f(t)$  в схеме смещения  $I$  накладывается на постоянную частоту  $f_0$  и период биений отсчитывается через постоянный промежуток времени. Если выбрать частоту  $f(t=0) = 28 \times$

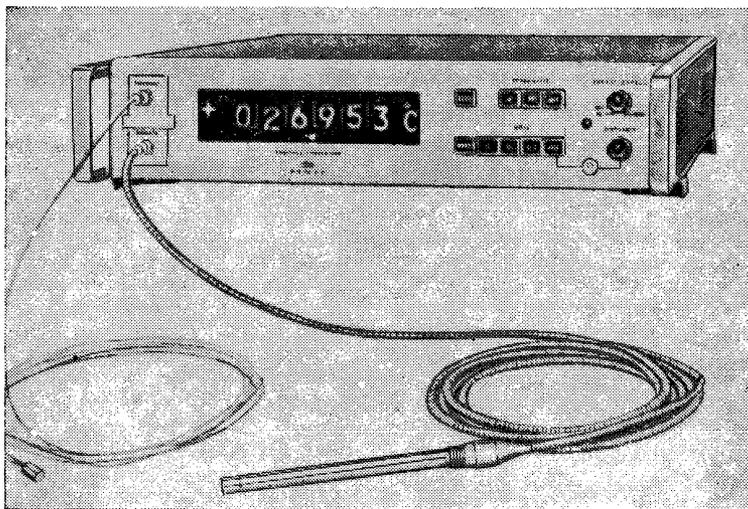


Рис. 4.36. Кварцевый термометр фирмы «Hewlett-Packard»

$\times 24$  МГц, то частота биений равна  $1000$  Гц/К. В конце интервала счета, который может быть определен с помощью частоты  $f_0$ , на счетчике получается значение температуры в цифровой форме. Например, при интервале счета  $10$  мс цифровой индикатор показывает температуру в сотых долях градуса.

Если вместо независимого от температуры генератора  $Q_{II}$  включают второй датчик температуры  $Q_{II}$ , обладающий теми же свойствами, что и  $Q_1$ , то в качестве результата получают разность температур.

На рис. 4.36 показан разработанный на этом принципе прибор фирмы «Hewlett-Packard», имеющий следующие технические характеристики:

Диапазон измерений, °C . . . . .	(-40)—0—230
Линейность, °C . . . . .	$\pm 0,05$
Разрешение (чувствительность), К . . . . .	0,0001 (период счета 10 с) 0,001 К (период счета 1 с)
Стабильность (временной дрейф), К в месяц . . . . .	0,005

Если этот прибор градуирован по образцовому платиновому термометру сопротивления, то можно считать его максимальной погрешность измерения

температуры равной 0,002 К. Поэтому эти приборы, помимо всего прочего, применяют для поверки термометров.

Относительные измерения температуры могут быть проведены с еще большей точностью, соответствующей чувствительности прибора.

#### 4.2.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Получение и обработка результатов измерения с помощью цифровой техники со временем будут приобретать все большее значение. В основном это может быть объяснено двумя причинами.

Во-первых, существует тенденция к укрупнению производственных единиц. При этом технологические процессы усложняются и удорожаются. Взаимная связь параметров становится менее очевидной, так что человек не справляется с контролем и обслуживанием установки. Если для этого применяется управляющая вычислительная машина, то оператор освобождается от необходимости следить одновременно за показаниями большого числа приборов, так как компьютер среди показаний присоединенных к нему приборов указывает наиболее важную на данный момент времени величину.

Во-вторых, все более необходимым становится совершенствование технологических процессов в отношении производительности и качества. Однородность и воспроизводимость качества продукции играет особую роль, так что влияние погрешности измерения становится все более сильным.

До последнего времени для автоматизации управления технологическими процессами имелись в распоряжении только жестко запрограммированные системы, которые преимущественно могли решать задачи периодического контроля предельных значений и протоколирования результатов измерения с помощью автоматической цифрочечатающей машинки.

Внедрение вычислительных машин для управления процессами, программа которых находится в памяти и которая может изменяться самой машиной, во много раз расширяет возможности этой ступени автоматизации. Кроме упомянувшегося выше контроля за производством, вычислительная машина может решать задачи управления и регулирования, рассчитывать параметры и сообщать заданные их значения локальным системам автоматического регулирования. И, наконец, достигается самостоятельная оптимизация процесса: продукция должна производиться при минимальных затратах и оптимальном режиме работы установки с заданными предельными условиями.

Принципиальная схема вычислительной машины для управления технологическими процессами показана на рис. 4.37.

Цифровые вычислительные машины всех видов служат для программируемой обработки данных. Программа состоит из ряда команд в форме указаний, какие данные, как и где должны быть обработаны. Блок управления 1 решает задачу координирования выполнения программы и обмена данными между различными функциональными блоками машины. Вычислительный блок производит все операции, при которых данные должны связываться друг с другом или изменяться. Вся информация, необходимая для процесса обработки, содержится в го-

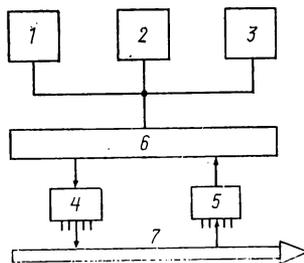


Рис. 4.37. Блок-схема вычислительной машины для управления технологическими процессами:

1 — блок управления; 2 — оперативная память; 3 — вычислительный блок; 4 — выводное устройство; 5 — входное устройство; 6 — каналы входа и выхода; 7 — управляемый процесс

товом виде в оперативной памяти 2 и может по желанию туда вноситься или извлекаться. Эта часть вычислительной машины важна при использовании вычислительных машин для решения комплексных задач. Через каналы входа и выхода вычислительная машина может обмениваться данными с периферийными устройствами 4, 5. Здесь при помощи промежуточной памяти может быть разрешено противоречие между относительно медленно работающими внешними устройствами сбора информации и быстродействующими центральными блоками вычислительной машины. Например, цикл в оперативной памяти, т. е. запоминание или нахождение одного слова информации, в современной вычислительной машине длится 1 мкс, тогда как операционное время аналого-цифрового преобразователя

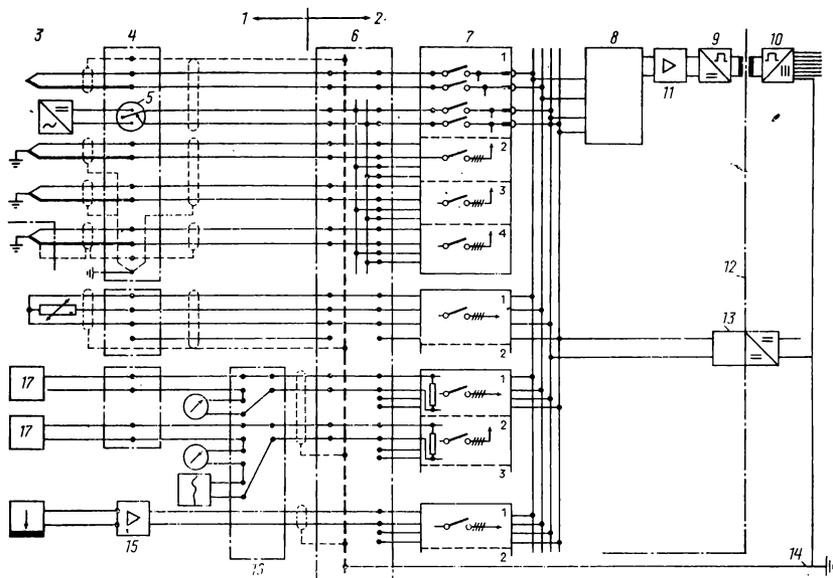


Рис. 4.38. Пример задания аналоговых измеряемых величин в вычислительную машину для управления тепловой электростанцией:

1 — установка теплоэлектростанции; 2 — управляющая вычислительная машина; 3 — датчики измеряемых величин; 4 — распределительный шкаф; 5 — общий компенсатор напряжения; 6 — распределительный шкаф вычислительной машины; 7 — коммутатор точек измерения; 8 — коммутатор диапазонов измерения; 9 — преобразователь напряжения в частоту; 10 — счетчик импульсов; 11 — усилитель; 12 — граница разделения потенциалов; 13 — источник тока; 14 — опорный потенциал вычислительной машины; 15 — шкаф измерительных приборов; 16 — распределительное устройство; 17 — измерительный преобразователь

для задания результата измерения составляет в зависимости от принципа преобразования от 30 мкс до 30 мс.

Наряду с получением и выдачей двоичной информации (например, положения контактов), выдачей команды в аналоговой форме (например, заданного значения параметра для локальной системы автоматического регулирования) особенно важную роль играет получение информации о текущем значении аналоговой измеряемой величины.

Очень часто такой величиной является температура, которая с помощью датчиков должна быть преобразована в электрическую величину. Аналого-цифровые преобразователи осуществляют преобразование аналоговой величины в согласованную с кодом вычислительной машины цифровую форму. Сектор датчиков температуры на входе машины делает возможным путем сжатого во времени адресования многократное использование центрального аналого-цифрового преобразователя.

На рис. 4.38 в качестве примера задания аналоговой величины в вычислительную машину для управления технологическими процессами представлена типичная входная измерительная схема из области автоматизации тепловых электростанций [4.27]. \*

Провода от датчиков измеряемой величины ведут сначала к распределительному шкафу, в котором соединяются отдельные провода от соседних датчиков. Затем измерительные сигналы по общему экранированному многожильному кабелю передаются в вычислительную машину. Здесь же расположена часть согласующих схем, например общий компенсатор напряжения для термоэлектрических термометров, и другие. В указанном примере компенсация напряжения начала шкалы осуществляется с помощью напряжения от переключаемого селектором датчиков компенсатора группы термоэлектрических термометров. Обязательными условиями в этом случае являются постоянная температура клеммной сборки и применение компенсационных проводов от термопар к распределительному шкафу.

Питание термометров сопротивлением осуществляется здесь по трехпроводной схеме от центрального переключаемого заземленного источника тока.

Если нужно сигнал от датчика подавать на дополнительные приборы, такие как показывающий прибор, самописец и т. д., то необходимо применять измерительный преобразователь, к выходу которого можно подключать различные нагрузки. Сопротивление нагрузки управляющей вычислительной машины, конечно, должно быть расположено перед селектором, чтобы измерительный контур оставался замкнутым при открытии ключа селектора.

Распределительный шкаф непосредственно у управляющей вычислительной машины служит, с одной стороны, для разделения жесткого кабеля на внутренние соединительные провода, а с другой — делает возможными избирательное подключение и сортировку разнородных датчиков.

Диапазоны сигналов датчиков измеряемых величин с помощью переключателя диапазонов согласуются с нормированным диапазоном аналого-цифрового преобразователя, который в приведенном примере работает по методу интегрирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 4.1a. *Becker, H.*: Über die analogen elektrischen Meßverfahren nach der Ausschlag und Kompensationsmethode. Arch. techn. Messen V 30—7 Okt. 1966, V 30—8 nov. 1966; V 30—9 Dez. 1966, V 30—10 Jan. 1967.
- 4.1b. *Helke, H.*: Selbstabgleichende Gleichspannungskompensatoren. Arch. techn. Messen Teil I J. 932—13 Juli 1974.
- 4.2. *Schlosser, E. G.; Winterling, K. H.*: Galvanometer. Karlsruhe 1960.
- 4.3. *Disselhorst, H.*: Thermolraffreier Kompensationsapparat mit fünf Dekaden und konstanten kleinen Widerstand. Z. Instrum. Kde 28 (1908), S. 1—13.
- 4.4. *Siegfried, G.*: Thermospannungsfreier Präzisionskompensator. AEG Mitt, 50 (1960), S. 368—371.
- 4.5. *Hunsinger, W.*: Temperaturmessung. In: Flügge, S.: Handbuch der Physik Bd. 23, Berlin, Heidelberg, New York, 1966.
- 4.6. *Palm, A.*: Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen. 4. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1963.
- 4.7a. VDE/VDI Richtlinie: Meßumformer für Temperatur—Beschreibung und Untersuchung, VDE/VDI 2191 Juni 1969.
- 4.7b. *Katz, H.*: TELEPERM—Meßumformer E für elektrische Eingangsgrößen Siemens-Z. 38 (1964), S. 424—429.
- 4.8. *Mueller, E. F.*: Wheatstone bridges and some accessory apparatus for resistance thermometry. Bull. Bur. Stand. 13 (1917), 4, S. 547—561.
- 4.9. *Mueller, E. F.*: Precision resistance thermometry. Temperature, its measurement and control in science and industry. New York 1941, S. 162—179.
- 4.10. *Foord, T. R.; Langlands, R. C.; Binnie, A. J.*: Transformer ratio Bridge network with precise lead compensation. Proc Inst. Electr. Eng. 110 (1963), 9, S. 1693—1699.
- 4.11. *Johnston, J. S.; Charman, J.*: Precision resistance ratio bridge. Instrum. Control System. 39 (1966), 5, S. 117—120.
- 4.12. *Herzog, H.; Weigel, H.*: Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern und linearisiertem Meßumformer. Regelungstechn. Praxis und Prozeß-Rechentechn. 14 (1972), S. 162—164.
- 4.12a. *Kraus, K.*: Eine neue Methode zur Linearisierung eines Platin-Widerstandsthermometers. Arch. techn. Messen J 222—5 Nov. 1975.

- 4.13. *Z'ermann, A.*: Die richtige Bemessung der Widerstände einer zweckgebundenen Wheatstoneschen Brücke. Arch. techn. Messen J 910—1 Juni 1968; J 910—11 Juli 1968; J 910—12 Aug. 1968; J 910—13 Sept. 1968; J 910—14 Okt. 1968.
- 4.14. *Becker, H.*: Die Gleichstrombrücke als Meßumformer. Arch. techn. Messen J 910—6 Jan. 1966; J 910—7 Febr. 1966; J. 910—8 März. 1966; J 910—9 April 1966.
- 4.15. *Moerder, C.*: Quotienten- und Produktanzeigergeräte. Hamburg, Berlin 1963.
- 4.16. *Bruger, Th.*: Über elektrische Widerstands-Thermometer. ETZ 27 (1906), S. 531—534.
- 4.17. *Grüß, H.*: Eine neue Form von Kreuzspulinstrumenten. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 10 (1931) 2, S. 137—152. ETZ 71 (1950), S. 85—87.
- 4.18. *Eggers, H. R.*: T-Spul-Meßgeräte mit Kernmagnet zur Temperaturmessung und Meßwert-Fernübertragung. ETZ 71 (1950), S. 85—87.
- 4.19. *Eggers, H. R.*: Brückenschaltung zur Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern. Arch. techn. Messen J 222—1 März 1941; ferner Messung kleiner Temperaturänderungen. Arch. techn. Messen, Meßtechn. Praxis Lief. 478, Nov. 1975, S. R 171—R 177.
- 4.20. *Hammeke, K.*: Messung von Differenz und Mittelwert zweier Temperaturen mit Widerstandsthermometern. Arch. techn. Messen V 212—6 Okt. 1966; V 212—7 Okt. 1968.
- 4.21. *Lieneweg, F.*: Darstellung von Parameterfunktionen mittels elektrischer Meßanordnungen. Wiss. Veröff. Siemens-Werken 15 (1936) 3, S. 94—108.
- 4.22. *Borucki, L.*; *Dittmann, J.*: Digitale Meßtechnik. Berlin, Hamburg 1966.
- 4.23. *Breunig, H.*; *Kürner, H.*: Elektronische Spannungs-Frequenzumformer für die Digitalmeßtechnik. Arch. techn. Messen (1965) Lief. 456, R 113—118.
- 4.24. *Hück, A.*: Digitale Temperaturmessungen. VDI Bereiche Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 81—88.
- 4.25. *Hammond, D. L.*; *Benjaminson, A.*: Linear quartz thermometer. Instrum. Control Syst. 38 (1965) 10, S. 115—119.
- 4.26. *Schöltzel, P.*: Temperaturmessung mit Quarzsensoren. VDI-Z. 112 (1970), S. 14—18.
- 4.27. *Graf, G.*; *Zankl, A.*: Einordnung des Prozeßrechners im Wärmekraftwerk. Siemens-Z. 44 (1970), S. 8—15.

## **5. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОВЕРКИ КОНТАКТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ**

Для того чтобы обеспечить соответствие термометров предъявляемым к ним требованиям, необходимо еще при их изготовлении строго контролировать материалы и соблюдать установленные способы их обработки. Кроме того, в зависимости от требуемой точности измерения необходимо через большие или меньшие промежутки времени производить поверку термометров [5.1—5.3].

### **5.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ**

У жидкостных стеклянных термометров необходимо контролировать капилляры и термометрическую жидкость, у манометрических и биметаллических термометров — материал измерительной пружины. Проволоку для термометров сопротивления и термоэлектродную проволоку для термопар необходимо тщательно отбирать с учетом их температурных характеристик. Кроме того, в случае необходимости измерения высоких температур предъявляются жесткие требования к свойствам изоляционных материалов.

Изготовленные термометры должны быть подвергнуты различным испытаниям и путем специальной термообработки в достаточной степени стабилизированы с тем, чтобы обеспечивалось надежное постоянство показаний во времени. Электрические термометры необходимо проверять на соответствие нормам сопротивления изоляции в пределах их рабочего интервала температур, измерительные вставки — на их достаточную вибрационную прочность. Керамические и металлические защитные чехлы должны удовлетворять требованиям норм ДИН 43720 и ДИН 43724 относительно газонепроницаемости, термической стойкости и формоустойчивости.

В отдельных термоэлектродах термопар должна отсутствовать неомогенность. Для проверки гомогенности концы термоэлектродов соединяют с чувствительным измерительным прибором. Если протягивать проволоку медленно через какое-либо пламя или короткую электрическую печь, то в местах неомогенности возникает т. э. д.с. Надежные результаты получают при контроле проволоки с точно односторонним температурным градиентом. Для этой цели проволоку помещают в холодную ванну, например в жидкий азот, оба ее конца соединяют с измерительным прибором и один конец проволоки медленно вытягивают из ванны. Если термоэлектроды соединены как у готовых термопар в рабочем спае, то неомогенность можно выявить, изменяя на несколько сантиметров глубину погружения в испытательной ванне. Однако во время испытания не должны возникнуть погрешности измерения вследствие слишком малой глубины погружения.

Изготовленные термометры должны тарировать на заводе-изготовителе или в государственной организации. Кроме того, если на промышленных объектах требуются надежные измерения температуры, необходимо время от времени поверять термометры, так как их показания могут изменяться под влиянием термических, механических или химических воздействий.

Градуировку и поверку можно осуществлять путем сравнения с образцовыми термометрами или по фиксированным (реперным) точкам. При всех поверках необходимо следить за тем, чтобы были исключены погрешности измерения в результате подвода и отвода тепла (см. 7.1). Для этой цели необходимо прежде всего вводить термометры достаточно глубоко в испытательные ванны или печи. Кроме того, измеряемое значение должно надежно достигать своего установившегося значения (см. 7.3). Далее необходимо следить за предотвращением или корректированием всех возможных погрешностей измерения, которые могут возникнуть у различных термометров (см. 3.1.1.2.2, 3.1.2.1.2 и 3.1.2.2.2, 3.2.1.9 и 3.2.2.5).

## 5.2. ПОВЕРКА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВЫМИ ТЕРМОМЕТРАМИ

Поверку и градуировку термометров методом их сравнения с образцовыми термометрами можно осуществлять при любой температуре, если температура испытательной среды достаточно постоянна. Поверяемый термометр сравнивают с образцовым в жидкостных ваннах или трубчатых печах. Образцовые термометры градуируют по фиксированным точкам или же используют для поверки образцовые термометры II разряда, которые в свою очередь сравнивают с показаниями образцовых термометров I разряда. Путем повторных поверок образцовых термометров, а также требующихся дополнительно измерительных приборов (прецизионных измерительных мостов или компенсаторов) обеспечивается малая погрешность измерения.

### 5.2.1. ПОВЕРКА В ЖИДКОСТНЫХ ВАННАХ

Жидкостные ванны с устройствами для электрического нагрева и перемешивания (рис. 5.1) используют для поверок в интервале температур от  $-170$  до  $+630^{\circ}\text{C}$ . В качестве жидкости при температуре  $0-99^{\circ}\text{C}$  применяется вода, при температуре  $20-250^{\circ}\text{C}$  — минеральное или силиконовое масло. Для измерений при температурах  $180-630^{\circ}\text{C}$  используют соляные расплавы, содержащие 55,2% (по массе)  $\text{KNO}_3$  и 44,8% (по массе)  $\text{NaNO}_2$ , а при температурах  $250-630^{\circ}\text{C}$  — расплавленное олово. При температурах от 0 до  $-100^{\circ}\text{C}$  используют метанол, при измерениях до  $-170^{\circ}\text{C}$  — пентан. Ванны охлаждают охлаждающими змеевиками, через которые пропускают водопроводную воду, другие охлаждающие жидкости или жидкий азот. Ванну можно также непосредственно охлаждать при помощи сухого льда (твердая углекислота) [5.4, 5.5].

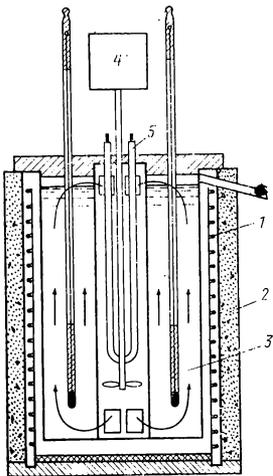


Рис. 5.1. Жидкостная ванна с электрическим нагревом [5.4]:

1 — внешнее нагревательное устройство; 2 — теплоизоляция; 3 — рабочая жидкость; 4 — мешалка; 5 — внутреннее нагревательное устройство

### 5.2.2. ПОВЕРКА В ТРУБЧАТЫХ ПЕЧАХ

Для поверки при температурах примерно до  $800^{\circ}\text{C}$  [5.6—5.8] используют электрические трубчатые печи с хорошей теплоизоляцией и вкладными металлическими блоками (рис. 5.2). Эти блоки изготовляют из алюминия или меди при температурах до  $500^{\circ}\text{C}$ , из алюминиевой бронзы при температурах до  $750^{\circ}\text{C}$  и из чистого никеля при температурах до  $800^{\circ}\text{C}$ . В них имеется несколько отверстий, расположенных параллельно продольной оси для размещения термометров. Диаметры отверстий должны лишь незначительно превышать диаметры поверяемых и образцовых термометров. Торцовые отверстия печи закрывают теплоизолирующими пробками с тем, чтобы предотвратить появление погрешностей измерения в результате воздушных потоков внутри трубы. Для обеспечения максимально равномерного распределения температуры по всей длине печи нагревательную обмотку выполняют вблизи концов трубы более плотной. При двухпозиционном регулировании температуры печи колебания температуры между отдельными отверстиями медного блока составляют менее  $0,1\text{ K}$ . Для поверки жидкостных стеклянных термометров применяют вертикальные печи с металли-

ческими блоками, которые снабжены дополнительными нагревательными обмотками, расположенными ниже и выше блока для равномерного распределения температуры по всему блоку.

В жаростойких стальных блоках можно осуществлять поверку термометров до  $1100^{\circ}\text{C}$ . Термопары из благородных металлов нельзя закладывать непосредственно в металлический блок. Их нужно сначала вводить в защитные керамические чехлы.

Для измерений температур свыше  $1000^{\circ}\text{C}$  большей частью применяют трубчатые печи с электронагревательными элементами, которые при температуре до  $1500^{\circ}\text{C}$  выполняют из карбида кремния, до  $1600^{\circ}\text{C}$  — из сульфата молибдена и до  $1800^{\circ}\text{C}$  — из благородного металла, такого как родий. Поскольку необходимо избегать любых загрязнений трубки, в которой находятся термопары,

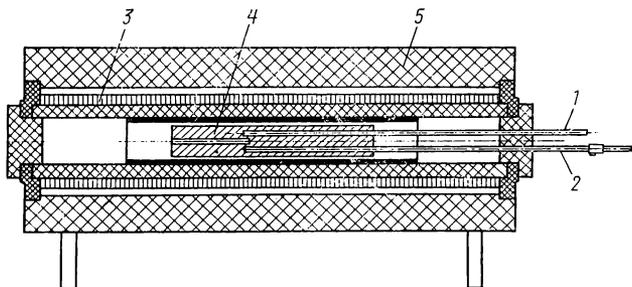


Рис. 5.2. Трубчатая печь с электрическим нагревом с вкладным металлическим блоком с отверстиями для термометров [5.3]:

1 — поверяемый термометр; 2 — образцовый термометр; 3 — нагревательная обмотка; 4 — металлический блок; 5 — теплоизоляция

в связи с возможным изменением их т. э. д. с., в нагревательную трубку печи часто дополнительно вкладывают керамическую трубку. Благодаря этому также улучшается равномерность распределения температуры вдоль печи. Подлежащие поверке, защищенные чехлами термопары необходимо так вставлять в печь, чтобы их рабочие спаи находились в центре печи и чтобы не было касания со стенкой печи. Для получения хорошей теплопередачи между измерительной средой и рабочим спаем платиновых термопар спай можно обмотать платиновой проволокой или поместить в платиновый колпачок. При помощи непрерывно действующего регулирующего устройства необходимо поддерживать температуру в печи постоянной. Можно использовать простое устройство для регулирования температуры, если сначала отрегулировать в печи необходимую температуру, затем отключить систему регулирования и так установить ток нагрева, чтобы температура оставалась во время измерений приблизительно постоянной.

### 5.2.3. ПОВЕРКА В ВОЗДУХЕ

В области температур от комнатной до температур порядка  $100^{\circ}\text{C}$  термометры можно поверять, если их поместить в равномерно нагретое пространство, в котором воздух перемешивается вентилятором. Особенно быстродействующую и надежную установку получают, помещая поверяемый термометр, а также образцовый термометр с таким же временем установления показаний в канал, через который протекает воздух. Таким же образом выполняют подгонку термометров сопротивления на заданное сопротивление и градуировку; при градуировке мостовую схему с градуируемым и образцовым термометрами компенсируют на отсутствие тока в диагонали измерительного моста.

## 5.2.4. ПОВЕРКА ТЕРМОЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПУТЕМ НАГРЕВА И СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВОЙ ТЕРМОПАРОЙ

Если необходимо проверить соответствие термоэлектрических характеристик термоэлектродной проволоки действующим нормам, испытательную печь медленно нагревают или охлаждают и контролируют изменение температуры при помощи контрольной термопары, присоединенной к компенсатору. Подлежащую поверке термоэлектродную проволоку соединяют с аналогичной образцовой термоэлектродной проволокой и также вводят в печь. Эту поверяемую термопару присоединяют ко второй точке компенсатора со значительно более высокой чувствительностью к напряжению. При этом можно с большой точностью определить отклонения т. э. д. с. поверяемой проволоки от т. э. д. с. образцовой проволоки при достигнутых в каждом случае температурах печи.

## 5.2.5. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОТДЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В общем случае термометры следует поверять без защитных чехлов или по возможности с очень тонкими защитными чехлами. Датчики должны закладываться достаточно глубоко в ванны или печи с тем, чтобы исключить возможность появления погрешностей измерений в результате подвода или отвода тепла (см. 7.1). Во время считывания результатов измерения скорость изменения температуры должна быть по возможности небольшой и в зависимости от требований лежать в пределах 0,01—0,1 К/мин. Все образцовые приборы необходимо тщательно проверять. Значения температуры следует считывать по возможности через одинаковые промежутки времени. Результаты отдельных измерений необходимо оценивать в следующей последовательности.

Если, например, для проверки трех испытуемых термометров  $P$  используют лишь один образцовый термометр  $N$ , то последовательность измерений будет

$$N - P_1 - P_2 - P_3 - N - P_3 - P_2 - P_1 - N.$$

Если используют два образцовых термометра, то последовательность будет

$$N_1 - P_1 - P_2 - P_3 - N_2; \quad N_2 - P_3 - P_2 - P_1 - N_1;$$

$$N_2 - P_3 - P_2 - P_1 - N_1; \quad N_1 - P_1 - P_2 - P_3 - N_2.$$

Из соответствующих отдельных результатов термометров  $N$  и  $P$  следует определять средние значения. После того как для отдельных термометров получены необходимые поправки (см. 3.1.1.2, 3.2.1.9 и 3.2.2.5), показания температур сравнивают между собой и на основании этого сравнения получают погрешности измерений для отдельных термометров.

## 5.3. ПОВЕРКА ПО ФИКСИРОВАННЫМ ТОЧКАМ

Поверку термометров по фиксированным (реперным) точкам (см. табл. 2.1 и 2.2) проще всего проводить при температуре таяния льда; кроме того, приняты измерения в тройной точке воды и при температуре кипения воды, а в некоторых случаях также при температуре кипения серы. Измерения по другим постоянным точкам проводят преимущественно при поверке образцовых термометров сопротивления и термопар.

### 5.3.1. ПОВЕРКА ПО ТОЧКЕ ТАЯНИЯ ЛЬДА ИЛИ ПО ТРОЙНОЙ ТОЧКЕ ВОДЫ

Для проверки по точке таяния льда ( $0^{\circ}\text{C}$ ), полученного из обессоленной воды, мелко измельченным льдом [5.1] заполняют сосуд Дьюара (рис. 5.3). В сосуд добавляют столько чистой воды, чтобы ее уровень был примерно на 10—20 мм ниже поверхности льда. При недостаточном количестве воды более легкий лед всплывает на поверхность воды. При этом в сосуде может произойти искажающее результат измерений расслоение температуры. Время от времени необходимо отжимать лед в сосуде вниз, добавлять лед, а излишнюю воду удалять. Если используется водопроводная вода, необходимо учитывать погрешность  $\pm 0,1\text{ K}$ .

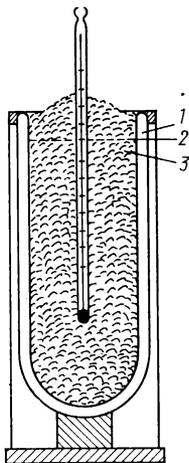


Рис. 5.3. Сосуд Дьюара со льдом:

1 — сосуд Дьюара; 2 — поверхность льда; 3 — смесь льда и воды

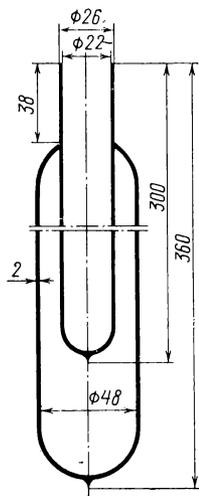


Рис. 5.4. Сосуд для определения тройной точки воды [5.3]

Тройную точку воды ( $0,01^{\circ}\text{C}$ ) можно воспроизвести с погрешностью  $1/1000\text{ K}$ . Из стеклянной трубки, заполненной совершенно чистой водой (рис. 5.4) и снабженной внутренней трубкой для размещения поверяемого термометра, откачивают газы, находящиеся под водой и в воде. После этого штуцер для откачки запаивают. Сосуд помещают в охлаждающую смесь. При этом вода в сосуде сначала переохлаждается до тех пор, пока в ней внезапно в результате спонтанной кристаллизации (а в некоторых случаях лишь после встряхивания сосуда) образуется лед. После этого в воде устанавливается температура тройной точки. Сосуд устанавливают в сосуд Дьюара со льдом, в котором эта температура сохраняется в течение длительного времени. Переохлаждение воды и кристаллизацию контролируют при помощи термометра, который, так же как затем и поверяемый термометр, помещают во внутреннюю трубку при добавке силиконовой смазки или ртути в качестве передающей тепло среды [5.1—5.3, 5.9].

### 5.3.2. ПОВЕРКА ПО ТОЧКЕ КИПЕНИЯ ВОДЫ

Для проверки термометров по точке кипения воды используют кипятильники в соответствии с рис. 5.5. Пар поступает из внешнего цилиндра сверху во внутренний цилиндр, образующий измерительное пространство, в которое введены защитные чехлы для размещения термометров. Затем пар конденсируется в хо-

лодильнике и возвращается в пространство с жидкостью. Мощность нагрева необходимо регулировать так, чтобы кипение воды было достаточно сильным для удаления всех остатков воздуха и газов. Измеренная точка кипения не должна изменяться при изменении мощности нагрева на  $\pm 10\%$ . Превышение давления, измеряемое манометром, может достигать только нескольких миллибар. Оно должно суммироваться с атмосферным давлением. При допустимой погрешности измерения 0,05 К можно использовать aneroid с хорошими характеристиками. Необходимо учитывать зависимость температуры кипения от общего давления (см. табл. 2.1 или таблицы давления водяного пара).

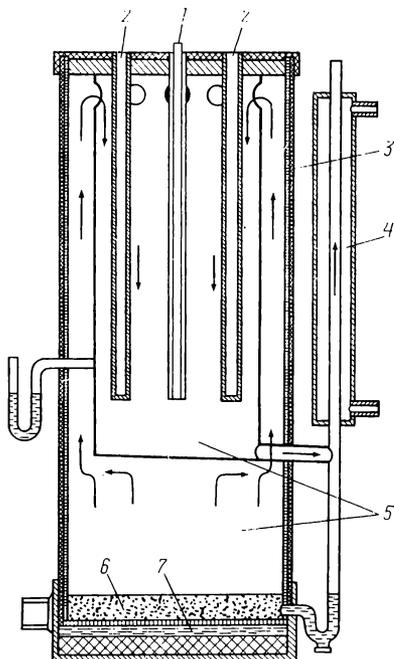


Рис. 5.5. Кипятильник [5.4]:  
1 — термометр; 2 — защитные чехлы для поверяемых термометров; 3 — теплоизоляция; 4 — холодильник; 5 — пар; 6 — вода; 7 — нагреватель

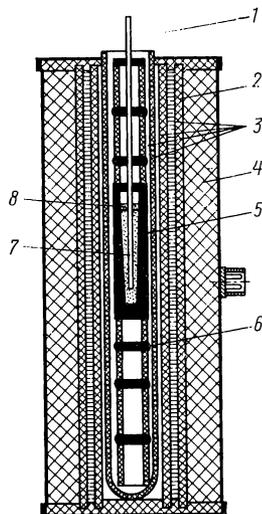


Рис. 5.6. Печь с электрическим нагревом для воспроизведения температур затвердевания [5.3]:

1 — защитный чехол для термометра; 2 — нагревательная обмотка; 3 — теплоизолирующие трубки; 4 — теплоизоляция; 5 — графитовый тигель; 6 — графитовые диски; 7 — металлический расиллав; 8 — графитовый порошок

Если допустима погрешность измерения 0,1 К, то можно измерять непосредственно температуру кипящей дистиллированной воды. Задержку кипения предотвращают путем размещения на дне сосуда фарфоровой «кулитки». Общее давление складывается из атмосферного давления и гидростатического напора столба воды, расположенного над температурным датчиком.

### 5.3.3. ПОВЕРКА ПО ТОЧКЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Для воспроизведения температур затвердевания металлов [5,2, 5.10] используют трубчатые печи с электрическим нагревом, в которых металл расплавляется в тиглях (рис. 5.6). Ниже и выше тигля расположены графитовые диски; кроме того, графитовый тигель накрывается графитовой крышкой и металл засыпается

слоем графита толщиной примерно 1 см. Благодаря этому металл защищается от окисления, тем более что в результате окисления графита образуется восстановительная атмосфера. Сначала весь металл расплавляется и затем мощность нагрева устанавливается такой, чтобы температура снизилась примерно на 0,3 К. Для обеспечения возможности четкого определения площадки затвердевания необходимо, чтобы степень чистоты металлов составляла не менее 99,99%.

### 5.3.4. ПОВЕРКА МЕТОДОМ ПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Если при определении температуры по температуре плавления золота или палладия допустима погрешность измерения 1 К, то поверку можно проводить простым методом плавления проволоки. Обе термоэлектродные проволоки платиновой термопары сваривают в соответствии с рис. 5.7 золотой или палладиевой проволочной перемычкой длиной 5 мм, диаметром 0,5 мм. Температуру записывают присоединенным к поверяемой термопаре самописцем. Термометр медленно нагревается в трубчатой печи. При достижении температуры плавления проволочная перемычка расплавляется и показания прерываются. Рассеяния результатов измерения объясняются тем, что при небольших сотрясениях перемычка в связи с низкой прочностью разрушается еще до достижения температуры плавления. Однако при очень хорошей установке аппаратуры с защитой от сотрясений может быть замерена слишком высокая температура, так как некоторое время жидкая часть перемычки удерживается под действием поверхностного натяжения. Погрешность измерения может быть снижена, если дополнительно использовать вторую образцовую термопару. Кривые самописца при нагреве идут параллельно до тех пор, пока не будет достигнута температура плавления. При температуре плавления показания поверяемой термопары несколько отстают от показаний второй термопары вследствие поглощения скрытой теплоты плавления, а затем немного повышаются снова до момента расплавления перемычки. Расходящиеся кривые обеих термопар показывают температуру плавления, даже если перемычка вследствие поверхностного натяжения еще не разорвалась.

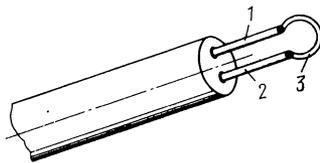


Рис. 5.7. Рабочий спай термопары для проверки по температуре плавления золота методом расплавления проволочной перемычки [5.3]:  
1 — платинородий; 2 — платина;  
3 — золото

## 5.4. ПОВЕРОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

На промышленных предприятиях необходимо время от времени проверять не только датчики температуры, но также контролировать сопротивления соединительных проводов (см. 3.2.1.7 и 3.2.2.3) и вторичных измерительных приборов [5.11].

Для производственных лабораторий часто бывает достаточно проверять термометры в простых жидкостных ваннах или испытательных печах при одной или нескольких температурах. Для проверки термоэлектрических термометров можно при некоторых обстоятельствах использовать прошедшие поверку магнитоэлектрические милливольтметры класса 0,2 или 0,5. При этом необходимо дополнять сопротивление соединительных проводов до заданного значения (например, 20 Ом) путем включения дополнительного резистора. Более целесообразной является проверка при помощи лабораторных или технических компенсаторов напряжения, так как при этих способах измерения величина сопротивления соединительных проводов не влияет на результаты измерения. В соответствии

с рис. 5.8, *а* реохорд компенсатора напряжения устанавливается в такое положение, при котором в нуль-гальванометре исчезает ток. Милливольтметром (примерно класса 0,2) поочередно измеряется напряжение обоих термометров в момент компенсации. В результате сравнения этих напряжений по их разности определяют погрешность измерения поверяемого термометра. При высоких требованиях относительно точности применяют технический компенсатор (рис. 5.8, *б*), рабочий ток которого эталонируется при помощи нормального элемента Вестона

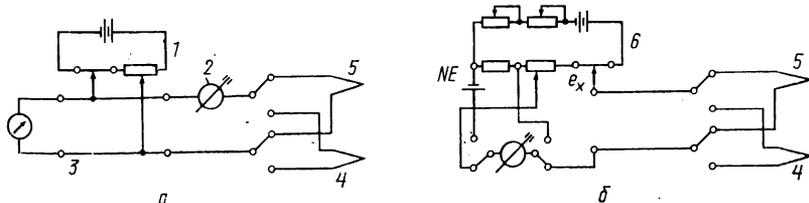


Рис. 5.8. Проверка термоэлектрических термометров [5.11] с датчиком (компенсатором) напряжения (*а*) и с измерительным компенсатором (*б*):

*NE* — нормальный элемент; 1 — датчик напряжения; 2 — нуль-гальванометр; 3 — милливольтметр; 4 — образцовый термометр; 5 — поверяемый термометр; 6 — измерительный компенсатор

(1,01865 В). После переключения на поверяемый или образцовый термометр т. э. д. с. измеряют при помощи измерительного компенсатора (*e<sub>x</sub>*). Предельная погрешность составляет в зависимости от исполнения компенсатора 0,1—0,3% соответствующего заданного значения.

Измерительные приборы для измерения т. э. д. с. можно поверять аналогичным способом, при этом в соответствии с рис. 5.9 к компенсатору напряжения последовательно с резистором, сопротивление которого равно заданному сопротивлению соединительных проводов, присоединяют поверяемый измерительный

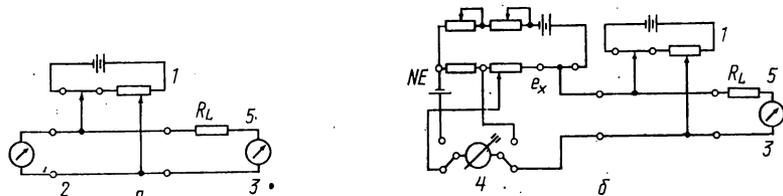


Рис. 5.9. Проверка измерительных приборов [5.11] с датчиком (компенсатором) напряжения (*а*) и с измерительным компенсатором (*б*):

1 — датчик напряжения; 2 — милливольтметр; 3 — поверяемый прибор; 4 — измерительный компенсатор; 5 — дополнительный резистор

прибор. При помощи реохорда компенсатора последовательно задают различные напряжения и показания поверяемого прибора сравнивают с показаниями присоединенного образцового милливольтметра (рис. 5.9, *а*) или технического измерительного компенсатора напряжения (рис. 5.9, *б*). Таким образом можно поверять как магнитоэлектрические, так и компенсационные измерительные приборы.

Показания измерительных приборов, предназначенных для работы с термометрами сопротивления, поверяют более простым способом. Для этой цели к измерительному прибору последовательно подсоединяют различные постоянные резисторы, сопротивления которых соответствуют заданным сопротивлениям термометра для различных значений температуры, соответствующих делениям шкалы, с учетом величины согласующего сопротивления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 5.1. Richtlinie VDE/VDI 3511: Technische Temperaturmessungen. 2. Aufl. Düsseldorf 1967.
- 5.2. *Rahlf's, P.*: Prüfung von Berührungsthermometern. Arch. techn. Messen Z 75—1 Dez. 1962.
- 5.3. *Vanvor, H.*: Prüfen elektrischer Berührungsthermometer für Betriebsmessungen. VDI-Berichte № 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 31—36.
- 5.4. *Rahlf's, P.*; *Blanke, W.*: Flüssigkeits—Glasthermometer—PTB—Prüfregeln. 14.01.67, Deutscher Eichverlag, Berlin 1967.
- 5.5. *Jainz, G.*; *Härtl, H.*: Kryostat zur Eichung und Beglaubigung von mechanischen und elektrischen Temperaturmeßgeräten im Bereich zwischen — 170 und 0° C. Feingerätetechn. 1967, 16, S. 556—558.
- 5.6. Thermocouple calibration. Techn. Bull. Nat. Bur. Stand. 1961, 45, 3, S. 44—48 sowie Calibration of Platinum resistance thermometers. Techn. Bull. Nat. Bur. Stand. 1961, 45, S. 62—66.
- 5.7. *Heyne, W.*: Präzisionsmeßverfahren zur Prüfung der Thermospannungs-Temperatur-Abhängigkeit von PtRh-Pt-Thermoelementen durch Vergleich mit einem Normalthermoelement. Feingerätetechn. 1962, 11, S. 400—402.
- 5.8. *Zysk, F. D.*; *Toenshoff, D. A.* Thermocouple calibration Method above 1500° C. Instrumentation Technol., 1967, 14, 1, S. 49—51.
- 5.9. *Barber, C. R.*; *Handle, Y. R.*; *Herington, E. F. G.*: The preparation and use of cells for the realisation of the triple point of water. Brit. Journ. Appl. Phys. 1954, 5, 1, S. 41—46.
- 5.10. *Heyne, W.*: Präzisionsmeßverfahren zur Prüfung der Thermospannungs-Temperatur-Abhängigkeit von Pt 10% Rh-Pt-Thermoelementen mittels der Erstarrungspunkte von Kupfer, Aluminium und Zink. Feingerätetechn. 1964, 13, S. 311—313.
- 5.11. *Lieneweg, F.*: Meßfehler von Thermometern, ihre Kontrolle, Prüfung und Beseitigung. Feinwerktechn., 1952, 56, S. 325—332.

## 6. ЗАЩИТНАЯ АРМАТУРА ДЛЯ ТЕРМОМЕТРОВ

### 6.1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Термометры, особенно для исследовательских целей, часто применяют без защитной арматуры при условии, что датчик не будет поврежден химическим воздействием измеряемой среды и не возникнут погрешности измерения из-за образования электрических шунтов или возникновения паразитных напряжений.

Обычно необходимо принимать специальные меры с тем, чтобы обеспечить достаточную защиту датчика температуры от механических нагрузок в резуль-

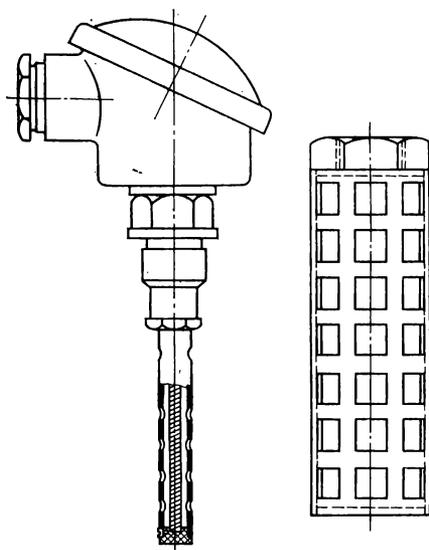


Рис. 6.1. Термометр сопротивления для воздушных каналов с перфорированным защитным чехлом и дополнительным съемным защитным кожухом

тате давления, ударов, трения или вибраций, а также защитить его от химических воздействий, таких как коррозия. Поэтому датчики температуры большей частью помещают в защитные чехлы (гильзы), которые в большей или меньшей степени противостоят всегда имеющимся химическим и механическим воздействиям (например, термометры в защитных чехлах, оправы стеклянных термометров для турбин, жидкостных и паровых термометров, а также защитные гильзы и специальные кожухи для электрических термометров).

Если защитный чехол температурного датчика или термометра оказывается недостаточным для обеспечения необходимой защиты против химических и механических воздействий, то термометр помещают в сменную защитную гильзу или кожух. Так, например, для измерений температуры в каналах охлаждающего воздуха применяют защитные чехлы, снабженные отверстиями, к которым в случае необходимости может быть привинчен еще защитный кожух (рис. 6.1).

При больших механических и химических воздействиях применяют дополнительные защитные чехлы, которые встраивают в каналы, трубопроводы, резервуары или печи. Благодаря этому можно заменять термометр во время эксплуатации или производить его проверку в любое время на месте. Способ монтажа дополнительных защитных чехлов или монтажных гильз зависит от условий применения. Так, в трубопроводы давлением до 80 бар защитные гильзы ввинчивают; при более высоком давлении применяют защитные гильзы конической формы и варивают их. В качестве погружаемых термометров применяют измерительные вставки электрических термометров либо без защитных чехлов, либо помещают их в защитные чехлы, которые вводят в измеряемую среду на необходимую глубину при помощи зажимных хомутиков, зажимных фланцев, упорных фланцев, штуцеров (рис. 6.2 по ДИН 43769) или клиновых затворов (см. рис. 3.40).

Стеклянные и манометрические термометры для турбин, выполненные в виде погружных термометров, монтируют при помощи накидных гаек или штуцерами,

ввинчивающимися непосредственно в трубопровод или в защитную гильзу (см. рис. 3.5 и 3.11). Защитные чехлы для электрических термометров с резьбой, а также свариваемые защитные гильзы по ДИН 43763 (см. рис. 6.5) соединяются с головкой термометра накидной гайкой (рис. 6.3). Снабженная пружиной измерительная вставка (см. рис. 3.35) закреплена в головке термометра так, что конец измерительной вставки прижимается ко дну защитного чехла.

Защитные чехлы термометров, предназначенных для монтажа на находящихся под давлением трубопроводах, ввинчиваются в соответствии с рис. 6.4, а в снабженный внутренней резьбой штуцер, который вваривается в трубопровод. В установках перегретого пара, а также установках высокого давления в химической промышленности защитные чехлы с учетом высоких механических нагрузок

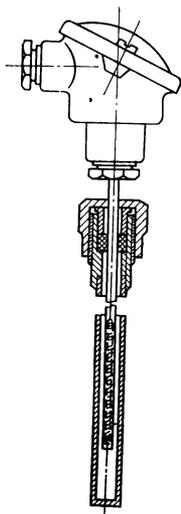


Рис. 6.2. Измерительная вставка термометра сопротивления в защитном чехле

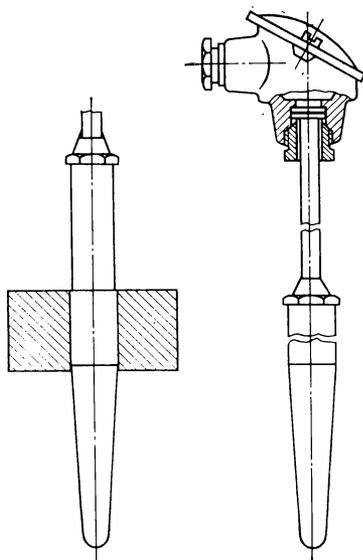


Рис. 6.3. Электрический термометр с свариваемой защитной гильзой высокого давления. Шейка термометра соединяется с головкой при помощи накидной гайки

выполняют коническими с примыкающей цилиндрической частью. Эта часть термометра сваривается с трубопроводом. При слишком малой толщине стенки трубопровода необходимо дополнительно предусматривать свариваемый штуцер в соответствии с рис. 6.4, б. В химической промышленности для установок высокого давления хорошо себя зарекомендовали защитные чехлы с линзовым уплотнением (см. рис. 6.4, в), которые в случае необходимости легко могут быть заменены. Цилиндрическая часть защитного чехла должна быть установлена по возможности без зазора. Она должна достигать измеряемой среды, но не входить в нее, в то время как коническая часть должна полностью обтекаться измеряемой средой. В случае применения для защитного чехла другого материала, чем для трубопровода, необходимо учитывать различие коэффициентов теплового расширения.

Для измерения температуры газов в каналах, печах или резервуарах, а также в установках для отпуска, отжига и закалки в большом количестве применяют прямые или угловые термометры (см. рис. 3.33 и 3.42), которые могут работать лишь при небольших давлениях. К стойкости металлических защитных чехлов против воздействия измеряемой среды предъявляют высокие требования. В некоторых случаях такие защитные чехлы изготавливают из двух различных мате-

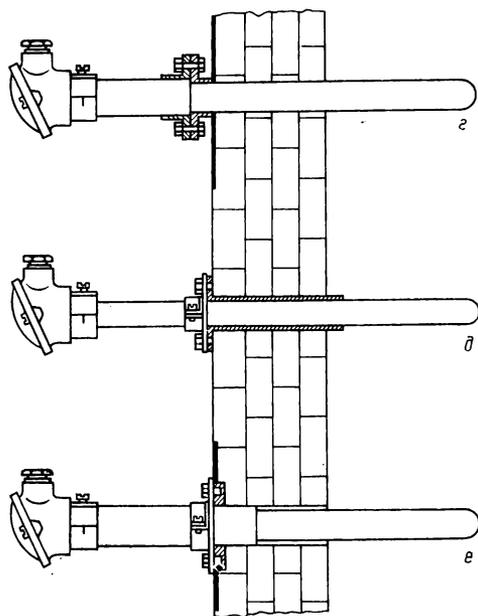
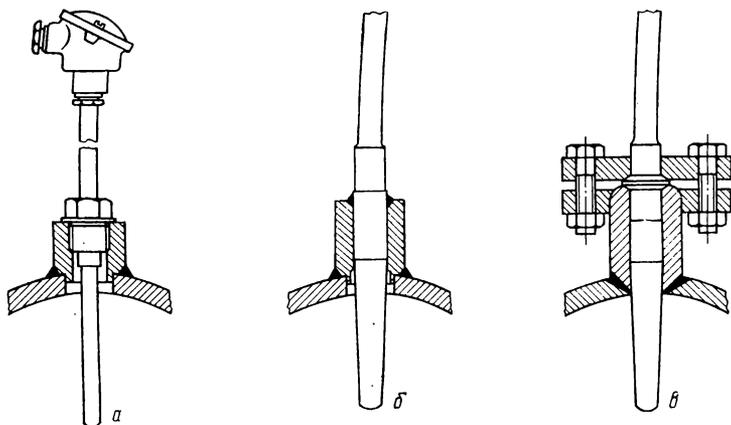


Рис. 6.4. Способы монтажа термометров с защитной арматурой на трубопроводах и печах:

*а* — защитный чехол с резьбовым штуцером; *б* — ввариваемый защитный чехол (гильза); *в* — защитный чехол с чечевицеобразным уплотнением; *г* — керамический защитный чехол с металлическим патрубком, установленный герметично в стене печи с металлической облицовкой при помощи упорного фланца и контрфланца; *д* — металлический защитный чехол, установленный в стене печи без металлической облицовки при помощи упорного фланца с защитным хомутиком; *е* — керамический защитный чехол с металлическим патрубком, установленный в стене печи с листовой облицовкой при помощи упорного фланца с зажимным хомутиком

риалов, один из которых является стойким к действию высоких температур измеряемой среды. Часть защитного чехла термометра, не подвергающаяся воздействию измеряемой среды, выполнена из обычной стали. Кроме того, необходимо следить за тем, чтобы в результате образования гальванических пар между защитным чехлом, стенкой трубопровода и измеряемой средой не могли возникнуть вызывающие коррозию э. д. с. У керамических защитных чехлов, которые используются при измерении температуры газов свыше 1200° С, а в некоторых случаях и для измерения температуры металлических расплавов начиная с 600° С, а также расплавленного стекла, необходимо прежде всего обращать внимание на достаточную герметичность в отношении газов, стойкость против воздействия температуры и формоустойчивость при резких изменениях температуры. При этом внутреннее газовыделение также может повредить датчик температуры, так как термоэлектродные провода термопары большей частью снабжены только изолирующими трубками, которые не обеспечивают защиты термоэлектродов от воздействия газов внутри защитных чехлов.

Если один защитный чехол не имеет достаточной прочности и газопроницаемости, то, кроме металлического или керамического наружного защитного чехла, следует предусмотреть дополнительно второй газоплотный внутренний защитный чехол для увеличения срока службы термопар (см. рис. 3.34). Это необходимо прежде всего для платинородий-платиновых термопар, если наружный защитный чехол термометра не является газоплотным или если при погружении термометра в жидкую металлическую ванну один газоплотный защитный чехол имеет недостаточную прочность при резкой смене его температуры.

Для закрепления прямых защитных чехлов в стенках и сводах печей большей частью используют фланцевые крепления (см. рис. 6.4, *г—е*). В связи с этим керамические защитные чехлы снабжают металлическими поддерживающими патрубками (см. рис. 3.34).

## **6.2. СТОЙКОСТЬ ЗАЩИТНОЙ АРМАТУРЫ ТЕРМОМЕТРОВ К ХИМИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

Выбор защитных чехлов, гильз и кожухов в отношении их химической стойкости против коррозии или повреждения в результате эрозии требует большой тщательности. Необходимо широко использовать и анализировать имеющийся опыт эксплуатации, учитывать обширную литературу по свойствам и коррозионной стойкости различных материалов. В табл. 6.1, 6.2 дается перечень материалов, применяемых для защитных чехлов термометров сопротивления и термоэлектрических термометров, которые хорошо себя зарекомендовали при измерениях температуры на различных промышленных объектах [6.1—6.6а; ДИН 43720, 43724 и 43763].

### **6.2.1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Для изготовления металлических защитных чехлов можно использовать благородные металлы, если они приходят в соприкосновение с мало агрессивными жидкостями. В жидкостях, оказывающих сильное коррозионное действие, прежде всего в кислотах и щелочах, необходимо использовать защитные чехлы из пластмассы, латуни и бронзы, а также эмалированные или покрытые пластмассой защитные чехлы.

#### **6.2.1.1. МЕДЬСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Защитные чехлы из меди, латуни или бронзы можно применять на воздухе, в масле или водяном паре при температурах до 300° С. Для предотвращения повреждения в результате окисления и окалинообразования эти чехлы никелируют или хромируют. При этом необходимо учитывать, что у таких защитных

Т а б л и ц а 6.1

**Материалы, применяемые для защитных чехлов**

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Защитный чехол
<i>А. Паротурбинные электростанции</i>		
Водо- и паропроводы (ввинчиваемые и свариваемые термометры)	300	Бронза (только для воды) St 35,8, материал № 1.0305 13CrMo44, материал № 1.7335 10CrMo9.10, материал № 1.7380 X8CrNiMoNb1616, материал № 1.4981
	400	
	540	
	570	
	750	
Дымовые газы	550	St 35.8 эмалированная, материал № 1.0305
Трубопровод для смеси угольной пыли с воздухом	100	St 35.8, материал № 1.0305 (с отражательным стержнем)
	30	X10CrNiTi189, материал № 1.4541 или X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
Водоподготовка		
<i>Б. Производство бумаги</i>		
Бумажная масса (роллы, машинные чаны, очистители)	60	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
<i>В. Производство целлюлозы</i>		
<i>1. Сульфитная целлюлоза</i>		
Варочная кислота в варочном котле, резервуаре Пита и кислотной башне	150	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
Гипохлоритная башня, щелочная башня	40	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
Выпарная щелочь для сульфитного щелока, подогревателя и сборника для щелочи	140	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
<i>2. Сульфатная целлюлоза</i>		
Варочный котел, нагреватель щелочи	180 *	X10CrNiTi189, материал № 1.4541 или X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
Резервуар для черной щелочи, зеленого щелока и белой щелочи	80	
Многоступенчатое отбеливание целлюлозы (имеется влажный хлорный газ)	40	«Хастеллой С» (59% Ni, 16% Mo, 15,5% Cr, 5,5% Fe, 3,8% W) или X10CrNiMoTi1810 с защитной гильзой из титана
Выпарная щелочь для сульфатного щелока, теплообменники, подогреватели и сборники для щелочи	140	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571
<i>Г. Красильни</i>		
Роликовые красильные машины, автомат для краски пряжи в мотках	110	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Защитный чехол
<i>Д. Пищевая промышленность</i>		
<i>1. Пивоваренные заводы</i>		
Пивоваренная вода	80	Бронза или X10CrNiTi189, материал № 1.4541
Пивное сусло	100	Бронза или X10CrNiTi189, материал № 1.4541
Холодное пивное сусло	4	X10CrNiTi189, материал № 1.4541
<i>2. Производство сахара</i>		
Удаление соли из сахарного сиропа	100	X10CrNiTi189, материал № 1.4541
<i>3. Изготовление пищевых продуктов</i>		
Удаление соли из сыворотки	20	X10CrNiTi189, материал № 1.4541
<i>4. Солодовни</i>		
Вода для замачивания	100	Бронза
<i>5. Изготовление дрожжей</i>		
Охлаждение дрожжей	4	X10CrNiTi189, материал № 1.4541
Брожение дрожжей	33	X10CrNiMoTi1810, материал № 1.4571

Примечание. *Е. Химия и нефтехимия*

Для многих целей могут использоваться коррозионностойкие стали X10CrNiTi189 и X10CrNiMoTi1810. Многообразие измеряемых сред в этих отраслях промышленности делает затруднительным назвать определенные материалы в качестве пригодных для изготовления защитных чехлов. Необходимо учитывать опыт эксплуатации.

\* В варочном котле.

Таблица 6.2

## Примеры использования термоэлектрических термометров

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Термопара	Защитный чехол
<i>А. Заводы черной металлургии</i>			
<i>1. Доменная печь</i>			
Горячее дутье	1000	NiCr—Ni	Открытый защитный чехол X10CrAl18, материал № 1.4742, рабочий спай термопары оголен; монтаж с клиновым затвором с коническим уплотнением

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Термопара	Защитный чехол
Неочищенный газ	300	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742 бесшовный, со сферическим дном; с клиновым затвором
<i>2. Воздухонагреватель</i>			
Купол	1200	PtRh—Pt	Снаружи: X15CrNiSi2419, материал № 1.4841, внутри: KER710; монтаж с клиновым затвором St 35.8, материал № 1.0305, эмалированный; монтаж с клиновым затвором
	300	NiCr—Ni	
<i>3. Мартеновские печи и конверторы</i>			
Каналы отходящих газов	600	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742 бесшовный, со сферическим дном Погружная термопара специального исполнения
Расплав (кратковременно)	1700	PtRh—Pt	
<i>4. Нагревательные колодцы</i>			
Рабочее пространство	1350	PtRh—Pt	Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710 X10CrAl24, материал № 1.4762, бесшовные, со сферическим дном; монтаж с газоплотной нарезной муфтой X10CrAl18, материал № 1.4742 бесшовный, со сферическим дном; установка при помощи муфты с резьбой
Отходящие газы перед или за регенератором	1000	NiCr—Ni	
Воздух для горения за регенератором	700	NiCr—Ni	
<i>5. Толкательные печи, печи с вращающимся подом и другие печи прокатных цехов</i>			
	800	PtRh—Pt или NiCr—Ni	Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710, снаружи: карбид кремния, внутри: KER610 То же
Нагревательная зона	1250	PtRh—Pt	
Томильная зона	1350	PtRh—Pt	Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710
Отходящие газы перед воздушным рекуператором	900	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном; монтаж при помощи газоплотной муфты с резьбой
Отходящие газы перед и за газовым рекуператором	700	NiCr—Ni	То же или KER610
Нагретый воздух за рекуператором	700	NiCr—Ni	То же

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Термопара	Защитный чехол
<b>6. Печи для отжига, нормализации, печи с роликовым подом</b>			
Печное пространство	800	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном
Канал отходящих газов	600	NiCr—Ni	То же
<b>7. Колпаковые печи</b>			
Непосредственно обогреваемый колпак	950	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном или St 35.8; материал № 1.0305, бесшовный, со сферическим дном
Пакеты жести	600—900	NiCr—Ni	Специальное исполнение, голая термопара с приваренным к рабочему спаю листовым теплоконтактом
Пакеты автомобильного листа	700—920	NiCr—Ni	То же
Защитный газ	650	NiCr—Ni	Голая термопара
<b>8. Аглоленты (вакуумные камеры)</b>			
Для схемы измерения максимума температуры решетки	400	Железо—константан То же	Термопара в чехле X10CrAl24, материал № 1.4762 То же, со сдвоенной термопарой
<b>9. Установки для лужения</b>			
Пальмовое масло, травильная ванна, ванна расплавленного олова	650	NiCr—Ni (железо—константан)	St 35.8, материал № 1.0305 бесшовный, эмалированный
<b>10. Установки для цинкования</b>			
Ванна для цинкования	480	Железо—константан	St 35.8, материал № 1.0305, бесшовный или из карбида кремния
<b>11. Установки для термообработки</b>			
I. В газах			
Печи для отпуска	550	NiCr—Ni	St 35.8, материал № 1.0305, бесшовные
Отжиг в окислительных, серу- или углеродсодержащих газах	1050	PtRh—Pt (NiCr—Ni)	Снаружи: X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном, внутри: KER710

Область применения	Максимальная рабочая температура, °C	Термопара	Защитный чехол
Отжиг в окислительных, серу- или углеродсодержащих газах	1200	PtRh—Pt	Снаружи: X10CrAl24, материал № 1.4762, бесшовные, со сферическим дном, внутри: KER710
Отжиг в серусодержащих восстановительных газах	1200		То же
Отжиг в азотсодержащих газах, с низким содержанием кислорода, печи для азотирования с аммиаком	1200	PtRh—Pt	Снаружи: X15CrNiSi2419, материал № 1.4841, бесшовные, со сферическим дном, внутри: KER710
II. В ваннах термических цехов			Целесообразны защитные чехлы, высверленные в сплошном материале (см. 6.2.1.3); большей частью угловые термопары (см. 6.1.1)
Соль и селитра	550	NiCr—Ni	Чистое железо, материал № 1.1003
Циан	950	NiCr—Ni	Чистое железо или X15CrNiSi2419, материал № 1.4841
Хлоридсодержащие ванны	1050	PtRh—Pt	Снаружи: X10CrAl24, материал № 1.4762, внутри: KER710
Свинцовые ванны	1200	PtRh—Pt	Снаружи: хромоникелевый сплав NiCr6015, материал № 2.4867, внутри: KER710
Ванны хлорида бария	1300	PtRh—Pt	Снаружи: хромоникелевый сплав NiCr6015, материал № 2.4867, внутри: KER710

## Б. Заводы цветной металлургии

(в расплавах ограниченный срок службы)

Расплав меди	1250	PtRh—Pt	Снаружи: X10CrSi29, материал № 1.4772, высверленные из сплошного металла, внутри: KER710
Отходящие газы медеплавильных печей	1300	PtRh—Pt	Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710
Расплав латуни	900	NiCr—Ni	X10CrSi29, материал № 1.4772
Расплав алюминия	700	NiCr—Ni	Литейный чугун с перлитной структурой, высверлены из сплошного металла
Литье под давлением, магний	700	NiCr—Ni	Чистое железо, материал № 1.1003
Баббит, расплавы свинца и олова	600	Железо—константан	St 35.8, материал № 1.0305, эмалированные

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Термопара	Защитный чехол
Расплав свинца	700	Железо— константан	Хромоникелевый сплав NiCr6015, материал № 2.4867, высверлены из сплошного металла
Расплав цинка	480	То же	St 35.8, материал № 1.0305, бесшовные
Отходящие газы печей для плавки цинка	600	PtRh—Pt	Карбид кремния Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710
	1300		

## В. Керамическая промышленность

Кольцевые печи для стандартного кирпича	800— 1100	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном
Кольцевые печи для клинкера, камерные, туннельные печи, печи для нанесения глазури	1200— 1300	PtRh—Pt	Снаружи и внутри KER710

## Г. Стекольная промышленность

1. Ванная стекловаренная печь			
Решетка регенеративной камеры: сверху	1300	PtRh—Pt	Снаружи: KER530, внутри: KER710
снизу	600	NiCr—Ni	Фарфор
Боковые стены, свод, подина (в предварительно просверленных каналах до 50 мм ниже ванны)	1550	PtRh18	Снаружи и внутри KER710
Печь для охлаждения	800	NiCr—Ni	X10CrAl24, материал № 1.4762, бесшовные, со сферическим дном
Отжигательная печь	1200	PtRh—Pt	KER710
2. Горшковая стекловаренная печь	1500	PtRh18	Снаружи и внутри KER710
3. Газогенераторы			
Неочищенный газ	750	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742, бесшовные, со сферическим дном
Вращающаяся решетка	180—200	Железо— константан	Специальное исполнение
Верх решетки	500— 1000 *1	То же	То же

Область применения	Максимальная рабочая температура, °С	Термопара	Защитный чехол
--------------------	--------------------------------------	-----------	----------------

## Д. Цементная промышленность

Вращающиеся трубчатые печи:			
вторичный воздух у холодильника	900	NiCr—Ni	X10CrAl24, материал № 1.4762
высокотемпературная камера	900	NiCr—Ni	То же
сушильная камера	400	Железо—константан	St 35.8, материал № 1.0305 или аналогичный, эмалирование

## Е. Целлюлозные заводы

Пространство за печами для сжигания серы, для обжига пирита	1600	PtRh18	Снаружи: карбид кремния, внутри: KER710
Пространство за котлом-утилизатором	600	NiCr—Ni	X10CrAl18, материал № 1.4742

## Ж. Тепловые электростанции

Водо- и паропроводы			
Гильзы:			
ввинчиваемая	300	Железо—константан	Бронза SnNz6 по ДИН 1726 * <sup>2</sup>
»	400	То же	St 35.8, материал № 1.0305
»	500	»	13CrMo44, материал № 1.7335
вариваемая	540	»	То же
»	570	NiCr—Ni	10CrMo910, материал № 1.7380
»	590	NiCr—Ni	X22CrMoV121, материал № 1.4922
	750	Железо—константан (NiCr—Ni)	X8CrNiMoNb1616, материал № 1.4981
Дымовые газы	1000	PtRh—Pt	«Мегапир», 65% Fe, 30% Cr, 5% Al, материал № 1.4765 или снаружи: X10CrAl24, материал № 1.4762, внутри: KER710
	600	Железо—константан	St 35.8, материал № 1.0305, эмалированные
Трубопровод для пыле-угольно-воздушной смеси	100	То же	St 35.8, материал № 1.0305 * <sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> Для кратковременных измерений.\*<sup>2</sup> Только для воды или воздуха.\*<sup>3</sup> С отражательным стержнем.

покрытий при появлении тонких царапин или мелких пор может происходить усиленная коррозия, особенно если между металлом защитного чехла и покрытием присутствует электролит. Следует также по возможности выбирать для защитного чехла тот же материал, из которого выполнен трубопровод или резервуар.

### 6.2.1.2. СТАЛИ ДЛЯ СОЛЕВЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Углеродистая сталь марки St 35.8 пригодна для изготовления защитных чехлов при использовании их для температур до 400°С в нейтральной или окислительной атмосфере, а также в водяном паре. В топочных газах, содержащих углекислоту, углеводороды, соединения серы, защитные чехлы разрушаются или охрупчиваются в результате науглероживания или появления включений серы. Бесшовные стальные трубы можно, кроме того, применять в содержащих селитру или циан солевых расплавах при температурах до 550 или 950°С, а также в расплавах цинка или олова при температурах до 480 или 650°С. Для измерений температуры баббита до 600°С, кроме стали марки St 35.8, применяют также литейный чугун с перлитной структурой марки GG-22, защитные чехлы сверлят из сплошного металла. Если на такие чехлы наносят твердохромовое покрытие, то их можно также применять в свинцовых расплавах при температурах до 700°С. Взамен стали марки St 35.8 для изготовления защитных чехлов, применяемых в расплавах, содержащих селитру и циан, можно также использовать чистое железо М2, которое для цинковых расплавов при длительности эксплуатации 2—3 недели пригодно для температур до 600°С. Кроме того, такие чехлы пригодны для измерений температуры магния или содержащего магний алюминия до 700°С. Для увеличения срока службы защитные чехлы можно покрывать кокильной краской или же в месте погружения, которое подвергается наибольшему воздействию, устанавливают сменную муфту. Эмалированные стальные чехлы применяют в содержащих серу дымовых газах при температурах до 600°С, а также в щелочах, сточных водах и в бензоле.

### 6.2.1.3. ЖАРОСТОЙКИЕ И СТОЙКИЕ ПРОТИВ ОКИСЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЫ

Жаростойкие и стойкие против окисления материалы — сплавы железа с хромом и железа с хромом и никелем с добавками алюминия, кремния, марганца и других элементов — образуют в содержащих кислород газах плотные слои окислов на поверхности и обеспечивают таким образом защиту против дальнейшего окисления и окалинообразования. Однако эти слои окислов не должны повреждаться отложениями пыли, масел и сажи, флюсующими добавками или керамическими глазурями.

Защитные чехлы из хромистой мягкой стали, содержащей 32% хрома («Корромет»), высверленные из сплошной заготовки, пригодны для измерения температуры расплава латуни до 900°С, расплавов меди до 1250°С; их срок службы ограничен. Защитные чехлы «Мегапир» (65% Cr, 5% Al) используют для измерения температуры дымовых газов. Хромоалюминиевые стали, содержащие 18 или 24% Cr и 1 или 1,5% Al (X10CrAl18 или 24), а также хромокремнистые стали, содержащие 18 или 29% Cr и 2 или 1,5% Si, с ферритной структурой могут использоваться на воздухе при температуре 1050 или 1200°С. Они характеризуются высокой стойкостью в окислительных, содержащих серу газах. Однако хромокремнистые стали в содержащих азот при малом содержании кислорода газах более стойки, чем хромоалюминиевые стали. У сталей обеих марок опасность науглероживания очень невелика. Стали, содержащие 24 или 29% Cr, пригодны также для использования в расплавах цинка при температурах до 480°С и расплавах латуни при температурах до 900°С. Кроме того, эти хромо-

алюминиевые и хромокремнистые стали можно использовать в соляных ваннах, содержащих хлориды, с температурой 600—1200°С; в ваннах с хлоридом бария их срок службы мал.

Из числа хромоникелевых сплавов можно использовать материалы X10CrNiTi189 при температурах до 800°С в воздухе; материалы с более высоким содержанием никеля — при температурах до 1200°С. Все эти сплавы характеризуются низкой стойкостью против действия серусодержащих окислительных и восстановительных газов, а также против науглероживания. Напротив, стали марок X15CrNi6015 и X10NiCr3220, содержащие большое количество никеля, стойки против воздействия газов с большим содержанием азота и низким содержанием кислорода. Для цианистых ванн при температурах до 950°С пригоден материал X15CrNiSi2520, для расплавов алюминия при температурах до 700°С — материал X10NiCr3220, а для свинцовых ванн при температурах до 700°С — этот же сплав, а также X15NiCr6015. Сплав, содержащий 60% Ni и 20% Cr («Термохром»), рекомендуется для свинцовых ванн и ванн из хлорида бария с использованием внутренних защитных чехлов из керамики марки KER710 при температурах до 1200 или 1300°С. Сплав, содержащий 72% Ni, 14—17% Cr, 6—10% Fe и менее 10% Mn («Инконель»), является стойким в окислительной атмосфере при температурах до 1150°С, в серусодержащих окислительных газах — до 815°С, а в серусодержащих восстановительных газах — до 540°С. При высоких температурах сплав становится проницаемым для водорода. Он часто используется для выполнения чехлов термопар.

Защитные чехлы из чистого никеля начиная с температуры 400°С чувствительны к воздействию серы, водорода и восстановительных газов. В углеродсодержащей атмосфере они становятся хрупкими, однако их можно применять в воздухе при температурах до 1000°С и ограниченно при температурах до 1250°С. Никель при высоких температурах также становится проницаемым для водорода.

В качестве защитных чехлов для измерений при высоких давлениях и температурах, особенно для измерения температуры пара на паротурбинных электростанциях, пригодны жаропрочные хромомолибденовые стали марки 13CrMo44 при температурах до 500°С, 10CrMo910 при температурах до 570°С, 22CrMoV121 при температурах до 590°С и 8CrNiMoNb1616 при температурах до 750°С (см. табл. 6.1).

При измерениях температуры в расплавах стекла применяют также защитные чехлы из платинородиевых сплавов.

#### 6.2.1.4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВСТАВОК

Гильзы для измерительных вставок термометров сопротивления выполняют из латуни или бронзы SnBz6 при температурах до 300°С; при более высоких температурах — из никеля или сплава X10CrNiMoTi1810. Для измерительных вставок термопар применяют трубки из стали марки St 35.8 при температурах до 400°С для термопар железо—константан и вставные трубки из никеля для термопар никельхром—никель.

#### 6.2.1.5. ЗАЩИТА ОТ ЭРОЗИИ

Кроме химического воздействия, защитные чехлы могут также разрушаться в результате эрозии, когда они сошлифовываются минеральными частицами. Так, следует учитывать эрозию в бетономешалках и смесительных барабанах, а также в потоках жидкостей и газов, которые транспортируют при своем движении твердые частицы, например в трубопроводах для пыле-угольно-воздушной смеси. Эрозию можно предотвратить путем размещения отражательных стержней или путем нанесения на поверхность стальных чехлов износостойких покрытий на основе карбида или борида.

## 6.2.2. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 6.2.2.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Механическая прочность и стойкость к изменениям температуры керамических защитных чехлов значительно ниже, чем у металлических. Поэтому их монтаж и демонтаж необходимо выполнять осторожно при медленном нагреве или охлаждении, с тем чтобы в чехле не появились трещины и чтобы он не разрушился. Поэтому керамические защитные чехлы используют только в тех случаях, когда металлические чехлы оказываются при длительных измерениях недостаточно стойкими, главным образом при измерениях температур свыше 1200°С. Керамические чехлы необходимо проверять через определенные периоды времени для своевременной замены изношенных или поврежденных чехлов. Особенно часто следует проверять новые чехлы. При агрессивных газах даже мельчайшие волосяные трещины в защитном чехле могут оказаться опасными для термопары. При монтаже необходимо учитывать, что при измерениях температуры свыше 1200°С защитные чехлы надо монтировать вертикально с тем, чтобы они не могли в результате изгибающей нагрузки деформироваться или разрушиться.

Если газонепроницаемые защитные чехлы могут быть повреждены вследствие резких изменений температуры, то применяют стойкий к изменениям температуры наружный защитный чехол, который обычно не должен быть газонепроницаемым. При измерениях температуры с использованием металлических защитных чехлов необходимо, особенно при измерениях платиnorodий-платиновыми термопарами, предусматривать еще один защитный керамический чехол с тем, чтобы термопара не могла быть повреждена проникающими газами в результате явления неплотностей в металлическом чехле при высоких температурах. В восстановительной атмосфере при температурах выше 1000°С необходимо всегда следить за тем, чтобы платиновые термопары были надежно защищены от загрязнения кремнием и тяжелыми металлами.

### 6.2.2.2. СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ

Защитные чехлы из керамических материалов типа *KER110* по ДИН 40685 (твердые фарфоры) представляют собой газонепроницаемые, содержащие силикат алюминия изделия, предназначенные для температур до 1000°С, характеризующиеся средней термостойкостью. В процессе работы они подвергаются воздействию фтористоводородной кислоты и паров щелочей, а также окислов металлов. Поскольку при высоких температурах они могут сплавляться с другими керамическими материалами, их следует использовать только в качестве отдельных защитных чехлов.

Защитные чехлы типа *KER610* (торговые названия «фарфор для термометров», «силлиманит 10 А», «масса Пифагора» и др.) представляют собой газонепроницаемые изделия, содержащие 50—80% окиси алюминия, предназначенные для температур до 1500°С, характеризующиеся повышенной термостойкостью по сравнению с защитными чехлами типа *KER110*. Поскольку они также подвергаются воздействию фтористоводородной кислоты и паров щелочей, а также расплавленных окислов металлов и летучей золы, их необходимо в некоторых случаях защищать дополнительными наружными защитными чехлами (например, из карбида кремния).

Защитные чехлы типа *KER410* представляют собой газонепроницаемые изделия, содержащие «Кордиерит», характеризующиеся хорошей термостойкостью, и предназначены для температур до 1400°С. Подвержены воздействию газов, содержащих фтористоводородную кислоту или пары щелочей.

Защитные чехлы *KER708* (торговое название «глиноземистая масса ТЕ» и др.) содержат 90—99% окиси алюминия, в то время как защитные чехлы типа *KER710* (торговое название А123, «глинозем ТЕН», «Альсинт 99,7» и др.) содержат свыше 99% высокоогнеупорной окиси алюминия. Керамики обоих типов могут подвергаться воздействию температур до 1600°С, их термостойкость, как

и у типа *KER110*, лишь средняя. Они не подвержены действию паров щелочей и могут использоваться в стеклоплавильных печах и печах для обжига гончарных изделий при температурах до  $1600^{\circ}\text{C}$ . В расплавах стекла они выдерживают температуры до  $1500^{\circ}\text{C}$ . При этом целесообразно применять два защитных чехла *KER710* — один внутренний и один наружный.

Защитные чехлы типа *KER530* представляют собой мелкопористые газопроницаемые изделия из силиката алюминия с большим содержанием окиси алюминия (торговое название «силлиманит 60») с очень хорошей термостойкостью, предназначенные для температур до  $1600^{\circ}\text{C}$ . Они не подвергаются воздействию газов и применяются в качестве наружных защитных чехлов в сочетании с газонепроницаемыми внутренними защитными чехлами.

Защитные чехлы из карбида кремния (масса  $\text{SiC70}$ ) используются для железо—константановых термопар при температурах до  $700^{\circ}\text{C}$  и для никельхром—никелевых термопар в качестве наружных защитных чехлов с чехлами типа *KER610* в качестве внутренних. Однако чаще всего их используют как чехлы типа *KER530* в качестве наружных защитных чехлов для платинородий—платиновых термопар с внутренними защитными чехлами типа *KER710*. Карбиды кремния очень стойки против химических воздействий, однако они подвергаются сильному воздействию содержащих хлор газов и основных шлаков.

В некоторых случаях для измерений температуры металлических расплавов, например расплавов цинка и алюминия, чаще всего расплавов меди, при необходимости исключить даже самые незначительные загрязнения термопар, вместо металлических применяют керамические защитные чехлы.

Высокотермостойкие и окислостойкие материалы разработаны прежде всего для измерений температуры жидкой стали. Для кратковременных измерений температуры погружением для платиновых термопар наряду с защитными трубками из кварца используют также металлокерамические защитные чехлы на основе окиси алюминия и молибдена.

Более или менее длительные измерения температуры жидкой стали можно выполнять, используя защитные чехлы из керметов или крометов — материалов, состоящих в основном из окислов хрома. С их помощью оказалось возможным непрерывно измерять температуру в конверторах без прекращения продувки. При этом стойкость таких чехлов составила 3—6 плавов [6.66]. Кроме того, для измерений температуры жидкой стали оказались пригодными защитные чехлы из сплавов борида циркония с молибденом, из окиси алюминия и нитрида алюминия, а также из окиси циркония, стабилизированной окисью магния. В дуговых электросталеплавильных печах высокую стойкость показали защитные чехлы из окиси алюминия и титана.

С использованием защитных чехлов из окиси алюминия и нитрида алюминия можно измерять температуру жидкой стали методом кратковременного погружения. При этом стойкость при температурах до  $1620^{\circ}\text{C}$  оценивается в 40 замеров, а в расплавах алюминия при температурах до  $1000^{\circ}\text{C}$  и расплавах свинца при температурах до  $450^{\circ}\text{C}$  — до 200 замеров.

Для измерений температуры в расплавах цветных металлов хорошо себя зарекомендовали защитные чехлы из дисилицида молибдена.

### 6.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ЗАЩИТНУЮ АРМАТУРУ ТЕРМОМЕТРОВ

Снабженные защитными чехлами термометры для измерения температуры газов, паров и жидкостей требуют особого внимания к механическим нагрузкам [6.7—6.11].

Защитный чехол должен иметь достаточную длину и по возможности тонкую стенку, чтобы обеспечить возможность быстрой передачи тепла к датчику температуры. Несмотря на это, он должен отличаться высокой прочностью, так как во многих современных технологических процессах и агрегатах имеют место давления до 300 бар, температуры пара до  $650^{\circ}\text{C}$  (на силовых установках, работающих с горячим воздухом, до  $750^{\circ}\text{C}$ ) и скорости потока до 100 м/с, которые

обуславливают высокие и разнообразные механические нагрузки на защитные чехлы.

Защитные чехлы выполняются как цилиндрической формы с резьбовым креплением, так и коническими для соединения сваркой (рис. 6.5) \*. Конические чехлы предназначены главным образом для измерения температуры воздуха, воды и водяного пара в трубопроводах при высоких давлениях.

Нагрузочная способность защитного чехла зависит от свойств материала, из которого он изготовлен, свойств измеряемой среды, а также от способа и качества исполнения его крепления на объекте. При расчете прочности защитного

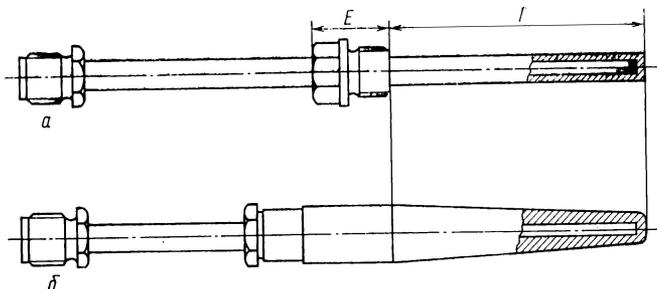


Рис. 6.5. Защитные чехлы по нормам ДИН 43763:

а — ввинчиваемый (для низкого давления); б — ввариваемый (для высокого давления)

чехла необходимо определить допустимую нагрузку его погружаемой части  $T$  (см. рис. 6.5) в отношении давления, температуры и обтекания потоком, а для ввинчиваемых защитных чехлов, кроме того, допустимую нагрузку ввинчиваемой части в отношении давления, температуры и момента затяжки, а также герметичности резьбового соединения (см. резьбовой штуцер  $E$  на рис. 6.5). Кроме того, необходимо соблюдать зависящие от различных условий применения коэффициенты запаса прочности. Расчет защитного чехла на прочность в нормальном режиме дополняется расчетом на прочность при резонансных колебаниях, вызванных потоком измеряемой среды.

### 6.3.1. МАТЕРИАЛ ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ

Материал защитных чехлов должен по возможности соответствовать материалу объекта в месте установки термометра; его выбор определяется также химическими свойствами измеряемой среды (см. 6.2). По прочностным свойствам материал защитного чехла должен соответствовать конкретным условиям применения <sup>1</sup>.

Для ввариваемых защитных чехлов можно применять только материалы с приемочными сертификатами по ДИН 50049. Следует учитывать, что у заготовок трубчатой формы прочностные характеристики могут быть ниже, чем у материала, из которого они выполнены.

В расчетах следует использовать (рис. 6.6): предел текучести при повышенных температурах  $\sigma_T$  (или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ ) для нижнего диапазона температур; предел длительной прочности  $\sigma_{дл/100\ 000}$  <sup>2</sup> и предел ползучести  $\sigma_{пл/100\ 000}$  <sup>2</sup> (усталостные характеристики [6.8]) для верхнего диапазона температур.

\* В нормах ДИН 43763 такие защитные чехлы классифицированы по размерам и материалам. В каждом случае указаны допустимые нагрузки.

<sup>1</sup> По этому вопросу см. ДИН 43763. ДИН 17175, технические условия «Штальайзен» на материалы 472 и 400, таблицу материалов «Дехема» и фирменные технические условия на материалы.

<sup>2</sup> Предел длительной прочности  $\sigma_{дл/100\ 000}$  представляет собой напряжение, относенное к исходному сечению, которое привело к разрушению через 100 000 ч; предел ползучести  $\sigma_{пл/100\ 000}$  представляет собой соответствующее напряжение, которое обуславливает остаточное удлинение на 1% через 100 000 ч.

Предел текучести при повышенных температурах указывается в технических условиях на материалы минимального значения; для усталостных характеристик приводятся средние значения для полученной до сих пор полосы разброса, которые после получения новых результатов исследований проверяются и при некоторых обстоятельствах корректируются<sup>1</sup>. Нижний предел полосы разброса примерно на 20—22% ниже приведенных средних значений.

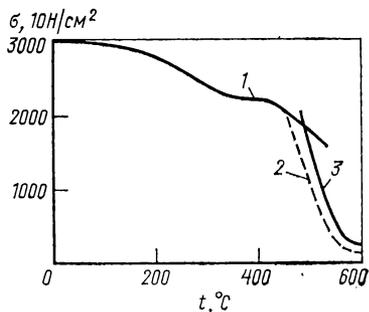


Рис. 6.6. Прочностные характеристики жаропрочной ферритной стали: 1 —  $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ ; 2 —  $\sigma_{1/100\,000}$ ; 3 —  $\sigma_{дл/100\,000}$

При расчетах прочности защитных чехлов используют минимальные значения; лишь для расчета толщины стенки на конце защитного чехла, где требуется хорошая теплопередача к рабочему спая и где имеется только гидростатическое давление в качестве нагрузки, в области усталостных характеристик используют средние значения.

Для расчета устойчивости требуются также значения предела пропорциональности, которые для повышенных температур не определялись. Эквивалентные значения можно получить, если взамен  $\sigma_{пл}$  в области предела текучести подставить  $\sigma_{T/1,5}$ , а в области усталостных характеристик  $\sigma_{пл/100\,000}$  ср<sub>1,22</sub> [6.8].

### 6.3.2. ЭНЕРГОНОСИТЕЛИ

Энергоносителями прежде всего являются водяной пар и воздух. Точные значения удельного объема водяного пара и воды можно взять из таблиц свойств водяного пара [6.12]. Для расчета защитных чехлов в силовых установках, работающих на горячем воздухе, можно с достаточной степенью точности использовать удельный объем (или плотность) по уравнению состояния идеального газа, плотность которого в общем случае больше плотности реального газа [6.8].

Очень важно знать изменение плотности, т. е. обратной величины удельного объема пара и воздуха в зависимости от температуры и давления с тем, чтобы иметь возможность определить и рассчитать влияние обтекания на величину допустимой нагрузки защитного чехла. На  $p, t$ -диаграмме (рис. 6.7), [6.8] \* приведена плотность насыщенного и перегретого пара и воды, рассчитанная по таблицам состояния пара М. П. Вуколовича [6.12]. Далее указана плотность воздуха, рассчитанная по уравнению состояния идеального газа:  $p/\rho = RT$ , где  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

На рис. 6.7 линия раздела фаз для сухого насыщенного пара проходит начиная от критической точки (374,15° С; 306,748 кг/м³) вниз, а граница раздела фаз для кипящей воды — вверх. Ниже первой находится перегретый пар, между обеими линиями раздела фаз — насыщенный пар, а над ними — вода. Выше критической температуры имеется только перегретый пар. При давлениях ниже критического (225,65 бар) кривые плотности проходят (начиная с высоких температур) сначала до линии раздела фаз для сухого насыщенного пара, затем через область насыщенного пара вертикально вверх (постоянная температура)

<sup>1</sup> Приведенные здесь и использованные в расчетах диаграмм усталостные характеристики соответствуют данным на август 1964 г. Они были изменены после написания этой работы (см. ДИН 17175 лист 2, дополнительный лист за июнь 1969 г.). Например, у стали 13CrMo44 величина  $\sigma_{пл/100\,000}$  снижается при температуре 500° С с приведенной ранее величины 170 до 140 Н/мм². Приводившиеся ранее значения для допустимой нагрузки защитных чехлов, особенно по ДИН 43763, должны быть рассчитаны заново.

\* Приведена красочная диаграмма в большом масштабе, включая кривые для воздуха (реальные), рассчитанная по уравнению состояния М. Якоба [6.13].

до линии раздела фаз для кипящей воды и оттуда дальше в направлении низких температур, повышаясь. Для давлений выше критического кривые имеют непрерывный характер и повышаются, не касаясь граничных кривых для области насыщенного пара.

Точки пересечения кривых для пара и воздуха при одинаковом давлении расположены на переходной линии. Справа от нее преобладает при одинаковом давлении плотность воздуха по сравнению с плотностью пара, слева от нее имеется

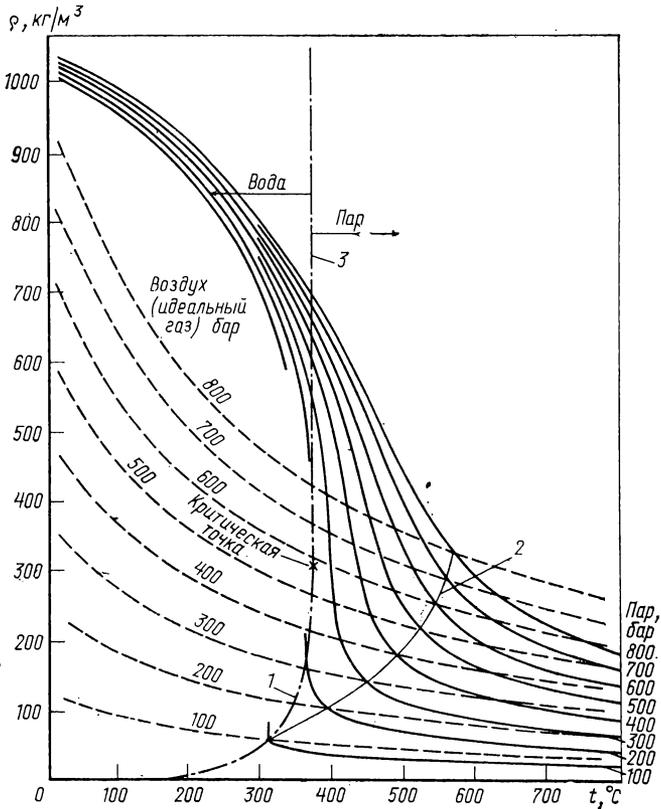


Рис. 6.7. Плотности пара (сплошные линии) и воздуха (штриховые линии): 1 — линия раздела фаз; 2 — линия одинаковой плотности и давления для пара и воздуха; 3 — линия критической температуры

обратное соотношение; плотность пара повышается резко при всех давлениях. Переходная линия пересекает при давлении пара свыше 120 бар линию раздела фаз для сухого насыщенного пара; это означает, что при давлениях до 120 бар плотность воздуха больше плотности пара.

Эти данные показывают, что при обтекании защитного чехла паром он испытывает большую нагрузку, чем при обтекании воздухом, однако в диапазоне высоких температур до линии перехода и при давлениях до 120 бар и при обтекании паром можно без какой бы то ни было опасности использовать параметры воздуха, что облегчает расчет.

### 6.3.3. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПОГРУЖНОЙ ЧАСТИ ЗАЩИТНОГО ЧЕХЛА

Под действием гидростатического давления защитный чехол находится в объемном напряженном состоянии, т. е. на него действуют осевые, тангенциальные и радиальные напряжения. При обтекании к ним добавляются изгибающие напряжения и напряжения среза. При расчете прочности определяют все напряжения и суммируют их в результирующее напряжение. Отношение этого напряжения к прочностной характеристике материала представляет собой коэффициент запаса прочности.

Давление, действующее по оси, рассматривается (особенно совместно с динамическим давлением донного натекания, которое изменяется в зависимости от места установки) как напряжение на продольный изгиб. Путем расчета устойчивости определяется величина напряжения с достаточным запасом от допустимого напряжения на сжатие.

Необходимая минимальная толщина стенки на конце защитного чехла, где имеется только гидростатическая нагрузка, наиболее просто рассчитывается при помощи уравнения для определения тангенциального усилия  $k$  по К. Баху [6.14] для цилиндров, подвергающихся наружному давлению; в этом уравнении учтено также влияние усилий по двум другим осям:

$$k = 1,7 \frac{r_a^{2i}}{r_a^2 - r_i^2} p_a, \quad (6.1)$$

где  $r_a$  и  $r_i$  — наружный и внутренний радиусы;  $p_a$  — наружное избыточное давление.

Если принять  $r_i$  в соответствии с используемой измерительной вставкой и подставить для  $k$  отношение прочностной характеристики материала к запасу прочности, то для каждого давления  $p_a$  определяются  $r_a$  и, следовательно, толщина стенки  $r_a - r_i$ .

Для чехла определенной конструкции уравнение (6.1) при чисто гидростатической нагрузке дает допустимое наружное давление, которое в некоторых случаях надо снижать только из соображений устойчивости. Допуски и эксцентриситет необходимо учитывать в наиболее неблагоприятном с точки зрения прочности сочетании.

Возникающие при обтекании защитного чехла дополнительные изгибающие напряжения и напряжения среза вызываются динамическим напором  $Q$  в сочетании с осевым давлением  $K_a$ . В то время как напряжения среза можно учитывать коэффициентом запаса прочности, так как они лишь незначительно увеличивают нагрузку, изгибающие напряжения  $\sigma_b$  необходимо вводить в расчет:

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{M_1}{W} + \frac{M_2}{W}, \quad (6.2)$$

где  $M$  — момент, действующий в определенном сечении;  $W$  — момент сопротивления.

$M_1$  представляет собой момент, образуемый распределенно действующим динамическим напором; его величина равна произведению усилия  $Q$  на плечо, равное половине длины погружной части чехла  $l/2$ . При этом в основу расчета положено вертикальное обтекание. Для компенсации дефектов зажатия для ввариваемых защитных чехлов принимают длину плеча несколько больше  $l/2$ .

Усилие динамического напора на плоскость проекции  $F$  составляет

$$Q = F (\rho/2) v^2 \xi, \quad (6.3)$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $v$  — скорость течения;  $\xi$  — коэффициент сопротивления.

Плотность  $\rho$  при свободном обтекании и размерах стандартизованных защитных чехлов принимается равной 1 [6.15]. При обтекании внутри трубопроводов

коэффициент сопротивления  $\xi$  при увеличении отношения  $F/F_R$  сильно увеличивается (рис. 6.8) \* ( $F_R$  — сечение потока).

$M_a$  представляет собой момент, равный произведению осевого усилия  $K_a$  на плечо, равное суммарной стреле прогиба  $f_{ges}$ .

Осевое усилие может быть в общем случае записано как

$$K_a = r_a^2 \pi p_a. \quad (6.4)$$

Динамический напор донного течения необходимо проверять аналогично уравнению (6.3). Обычно он по сравнению с гидростатической нагрузкой очень невелик; иначе его необходимо было бы прибавлять к значению по уравнению (6.4). При конических чехлах за расчетную величину берут радиус  $r_a$  на половине встраиваемой длины.

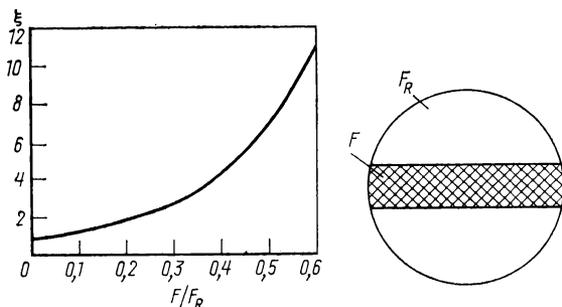


Рис. 6.8. Коэффициент сопротивления  $\xi$  цилиндра, обтекаемого в трубе, в зависимости от отношения площади динамического напора  $F$  к площади сечения трубопровода  $F_R$ . Длина цилиндра равна внутреннему диаметру трубопровода

Суммарная стрела прогиба  $f_{ges}$  складывается приблизительно из прогиба под действием  $Q$  и  $K_a$ , увеличенного на удвоенный эксцентриситет отверстия и (при цилиндрических трубах) удвоенный начальный изгиб. Удвоение необходимо для учета вибраций

$$f = \frac{Q}{K_a} \left[ -\frac{l}{2} + \frac{EI}{lK_a} \left( \frac{1}{\cos[l \sqrt{K_a/EI}]} - 1 \right) \right], \quad (6.5)$$

где  $E$  — модуль упругости;  $I$  — осевой момент инерции (у конических защитных чехлов — на половине встраиваемой длины).

$\sigma_b$  из уравнения (6.2) представляет собой осевое напряжение с положительным и отрицательным знаком. Если бы потребовалось (например, для расчета коэффициента запаса прочности для имеющегося защитного чехла при определенных условиях эксплуатации) обычным образом составить уравнения для напряжений по трем осям для внутренней и наружной поверхностей [6.14] и затем в соответствии с гипотезой максимальной работы формоизменения определить эквивалентное напряжение, то следовало бы прибавить  $\sigma_b$  с обоими знаками к осевому напряжению, полученному по гидростатической нагрузке. Однако для этого пришлось бы выполнять громоздкие расчеты. При составлении диаграммы, в которой пределы нагружаемости должны определяться по точкам в функции температуры в различных областях характеристик материала, которые пересекаются для различных сред при различных скоростях течения, необходим более простой способ расчета.

\* Диаграмма, приведенная на рис. 6.8, была получена в 1968 г. на кафедре аэродинамики университета в г. Карлсруэ. При этом длина цилиндрического обтекаемого тела равнялась внутреннему диаметру трубопровода. Полученные значения более высокие, чем можно ожидать у встроенного защитного чехла, который достигает лишь середины трубопровода.

Общая нагрузка обтекаемого чехла может быть сведена к двум основным нагрузкам — к тангенциальной  $k$  по К. Баху [уравнение (6.1)] и изгибающей нагрузке  $\sigma_b$  [уравнение (6.2)], которые могут быть легко представлены эквивалентным напряжением  $\sigma_V$  [6.7—6.9].

Эквивалентное напряжение получают, прибавляя к большему из двух напряжений треть меньшего:

$$\sigma_V = k + \sigma_b/3 \text{ при } k > \sigma_b; \quad \sigma_V = \sigma_b + k/3 \text{ при } k < \sigma_b. \quad (6.6)$$

Этот значительно более простой способ расчета позволяет получить достаточно хорошие результаты, которые по сравнению с результатами подробного расчета к тому же являются и более надежными [6.8].

Уравнения (6.6) следует применять к сечению в месте заделки чехла. При этом должно выполняться условие

$$S = \sigma_K/\sigma_V, \quad (6.7)$$

где  $S$  — коэффициент запаса прочности;  $\sigma_K$  — характеристика материала.

У конических защитных чехлов (гильз) необходимо, кроме того, проверять нагрузочную способность конца по уравнению (6.1).

### 6.3.4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ

Расчет устойчивости лучше всего проводить по уравнению для определения действительного сопротивления продольному изгибу А. Фёппля [6.16], которое учитывает имеющиеся начальные изгибы и применимо также для коротких прутков. Это уравнение имеет следующий вид:

$$K_k = \frac{K_p + (1 + f_{ges}q/W) K_E}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{K_p + (1 + f_{ges}q/W) K_E}{2}\right)^2 - K_p K_E}, \quad (6.8)$$

где  $K_p$  — усилие сжатия на границе пропорциональности, равное  $q\sigma_p$ ;  $K_E$  — коэффициент Эйлера, равный  $(\pi^2/4)(E/l^2)$ ;  $q$  — сечение.

Для конических чехлов используют значения  $l$ ,  $W$  и  $q$  для середины свободной монтажной длины.

Уравнение (6.8) с  $f_{ges}$  справедливо при обтекании защитного чехла; при нагрузке только статическим давлением необходимо взамен  $f_{ges}$  подставлять простое значение эксцентриситета отверстия, а для цилиндрических чехлов, кроме того, также значение начального изгиба. Коэффициент запаса прочности при продольном изгибе получают из отношения  $K_a$  к  $K_k$ .

### 6.3.5. КРИВЫЕ И ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ

Кривая чисто статического нагружения, определенная в результате расчета прочности, при использовании цилиндрических защитных чехлов может быть в некоторых случаях значительно снижена на основе расчета устойчивости. Для кривой нагрузочной способности обтекаемых защитных чехлов достаточен дополнительный расчет устойчивости в нескольких важных точках, из которых потом при определенных обстоятельствах некоторые могут быть снижены.

У пара давление, температура и плотность находятся в сложной зависимости (см. диаграмму состояния водяного пара), так что оказывается невозможным составить простое уравнение, по которому можно непосредственно по данной температуре, скорости течения и коэффициенту запаса прочности рассчитать избыточное давление  $p_a$ .

Поэтому кривую нагрузочной способности для защитного чехла в потоке пара можно определить только следующим образом: оценивают отдельные точки кривой (давления), а затем исходя из значений давления, температуры и характеристик потока вычисляют коэффициент запаса прочности; точка кривой опре-

делена в том случае, если полученный коэффициент запаса прочности совпадает с требуемым.

При обтекании воздухом можно, напротив, представить плотность  $\rho$  и таким образом также и  $\sigma_b$  (так же, как и  $k$ ) в виде простой функции  $p_a$  и при этом получить уравнение расчета для  $p_a$ , если взять  $\rho$  из уравнения состояния для идеальных газов:

$$\rho = p/RT, \quad (6.9)$$

где  $p$  — давление;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура. Более подробно см. [6.9].

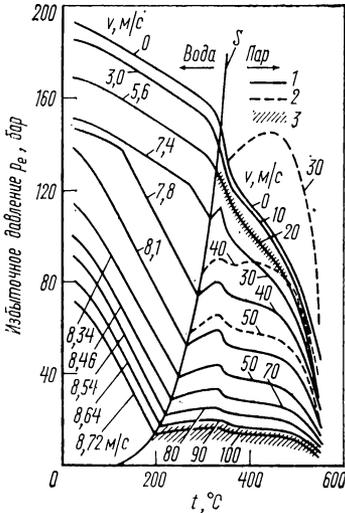


Рис. 6.9. Нагрузочная способность для обтекаемого паром или водой цилиндрического защитного чехла из жаропрочной стали (длина погружения 200 мм) при различных скоростях течения (необходимо дополнительно учитывать допустимую нагрузку резьбового штуцера и удерживаемое давление):

1 — кривая нагрузочной способности; 2 — кривая нагрузочной способности при учете только напряжения изгиба вследствие обтекания; 3 — область резонансных колебаний; S — кривая насыщенного пара

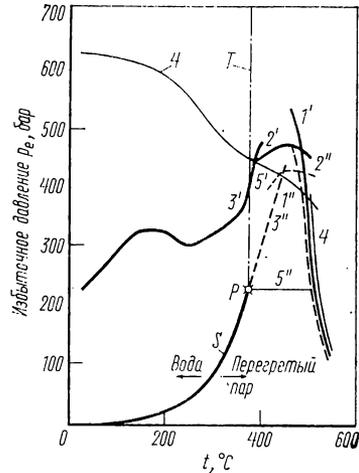


Рис. 6.10. Нагрузочная способность для обтекаемого паром или водой ввариваемого защитного чехла из жаропрочной стали (длина погружения 100 мм):

1 — рассчитано с использованием усталостных характеристик (превалирует гидростатическая нагрузка); 2 — рассчитано с использованием пределов текучести (превалирует гидростатическая нагрузка); 3 — рассчитано с использованием пределов текучести (превалирует напряжение изгиба); 4 — рассчитано только с учетом статической нагрузки; 5 — ограничение нагрузки; P — критическая точка; S — кривая насыщенного пара; T — линия критической температуры

Расчет кривых для обтекаемых защитных чехлов в области воды проводится аналогично расчету кривых для области водяного пара.

Кривые нагрузочной способности для защитных чехлов наносят на поле диаграммы, на которое нанесена кривая насыщенного пара (линия раздела фаз для сухого насыщенного пара) рис. 6.9, которая в случае необходимости продляется через критическую точку линией критической температуры (рис. 6.10). При помощи этой линии поле диаграммы делится на области горячего пара и воды. Благодаря этому четко изображаются все условия нагружения (особенно при изменении агрегатного состояния теплоносителя). Условия нагружения в воздухе и чисто статические состояния нагружения наносят на поле диаграммы без учета этой линии раздела.

На рис. 6.9 и 6.10 приведены расчетные диаграммы для обтекаемых паром или водой защитных чехлов. На рис. 6.9 параметром является скорость течения

в области пара; она нанесена с интервалом 10 м/с. С увеличением скорости течения допустимое давление падает. На рис. 6.10 приведены нагрузочные способности при скоростях течения 60 м/с (кривая 1', 2', 3'), 80 м/с (кривая 1'', 2'', 3'') и 0 м/с (кривая 4). Нагрузочная способность резко повышается от максимальных температур в сторону низких температур на ветвях кривых 1, что существенно определяется кривыми параметров усталостных характеристик (см. рис. 6.6). Ветви кривых 2 и 3 получают путем расчета с использованием значений предела текучести при высоких температурах; при этом для ветвей 2 преобладают напряжения от гидростатической нагрузки, для ветвей 3 — напряжения изгиба.

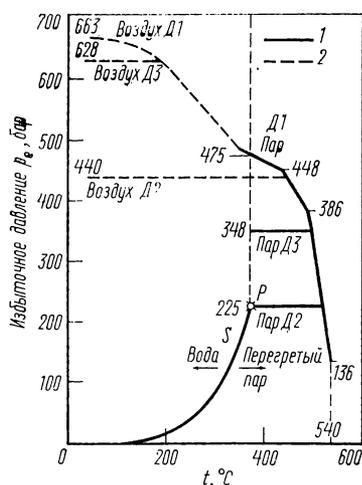


Рис. 6.11. Нагрузочная способность по ДИН 43763 для трех свариваемых защитных чехлов форм D1, D2 и D3 из стали 13CrMo44 для пара (1) и воздуха (2):

S — кривая насыщенного пара; P — критическая точка

Снижение кривых при уменьшении температуры примерно от 450°C обусловлено крутым подъемом плотности пара в этой области температур (см. рис. 6.7), по сравнению с которым влияние повышения предела текучести незначительно. Чем больше длина погружной части чехла или чем больше скорость течения, тем резче падают ветви кривых 3. Путем соответствующего уменьшения погружной части чехла можно избежать уменьшения нагрузочной способности при снижении температуры.

В рабочей диаграмме, такой как показана на рис. 6.11, кривые для области горячего пара обычно не продолжают до области воды, так как на электростанциях высокие скорости воды не встречаются. На диаграмме указано: до 450 бар и 5 м/с; допустимая скорость потока для воздуха и перегретого пара 60 м/с. В области горячего пара максимальная нагрузочная способность — это нагрузочная способность в точке пересечения расчетной кривой с линией раздела агрегатных состояний. Из этой точки пересечения проводят горизонтальную линию (на рис. 6.10 линии 5' и 5''), которая и является границей. Эта граничная прямая позволяет исключить возможные ошибки, так как иначе действительное снижение

нагрузочной способности при снижении температуры легко может оказаться незамеченным и защитный чехол при этом будет перегружаться.

При построении рабочей диаграммы можно в случае необходимости объединить несколько расчетных диаграмм; при этом правая граница диаграммы составляется из минимальных значений давлений, полученных в расчетных диаграммах в соответствующем месте (см. рис. 6.11).

Для нагрузочной способности днища защитного чехла определяющим является напряжение среза

$$\tau' = 1,5K_s/F_s, \quad (6.10)$$

где  $\tau'$  — максимальное значение напряжений среза, имеющих параболическое распределение;  $K_s$  — усилие среза;  $F_s$  — площадь среза, равная  $2r$ ;  $s$  — минимальная толщина днища.

В величинах  $K_s$  (так же, как и  $K_a$ ) необходимо учитывать обтекание днища.

Коэффициент запаса прочности должен составлять

$$S = \sigma_K/2\tau'. \quad (6.11)$$

### 6.3.6. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ РЕЗЬБОВОГО ШТУЦЕРА

Для ввинчиваемых защитных чехлов по ДИН 43763 предусматриваются резьбовые штуцеры, к которым чехлы приваривают или припаивают твердыми припоями выше шестигранника (рис. 6.12). На резьбовой штуцер действуют

приложенный момент затяжки и давление измеряемой среды. Используя стандартизованный по ДИН гаечный ключ различных исполнений, можно получить при максимально больших длинах и предельных усилиях ручной затяжки диапазон рассеяния максимально возможного в производственных условиях момента затяжки. Он может быть рассчитан по эффективному плечам рычага гаечного ключа и усилию ручной затяжки, равному примерно 400 Н; при этом получают три—четыре крутящих момента, с которыми проводят расчет.

По этим крутящим моментам можно рассчитать момент затяжки штуцера по уравнению (6.12) [6.17]:

$$M_S = M_G + M_R = V \times \left[ r_f \frac{\operatorname{tg} \alpha + \mu / \cos (\beta / 2)}{1 - \operatorname{tg} \alpha \mu / \cos (\beta / 2)} + r_D \mu_1 \right], \quad (6.12)$$

где  $M_S$  — момент на гаечном ключе;  $M_G$  — момент на резьбе;  $M_R$  — момент трения;  $\alpha$  — угол поворота;  $\beta$  — угол подъема резьбы;  $\mu$  — коэффициент трения резьбы;  $\mu_1$  — коэффициент трения уплотняемой поверхности;  $r_D$  — радиус трения уплотняемой поверхности;  $r_f$  — радиус профиля.

Из уравнения (6.12) видно, что величина  $V$ , кроме момента на ключе  $M_S$ , зависит от коэффициентов трения  $\mu$  и  $\mu_1$ . Более подробно об этом влиянии сказано в последнем абзаце 6.3.6.3.

Момент затяжки штуцера защитного чехла, смонтированного в холодном состоянии, уменьшается при рабочей температуре соответственно уменьшению модуля упругости резьбового соединения:

$$V_t = VE_t/E_{20}. \quad (6.13)$$

Для упрощения расчетов по этому уравнению используют значения модулей упругости материала резьбового штуцера.

### 6.3.6.1. УДЕРЖИВАЕМЫЕ ДАВЛЕНИЯ

Давление  $D$ , которое надо удерживать, представляет собой рабочее давление на площади  $F_0$  (см. рис. 6.12):

$$D = pa'F_0. \quad (6.14)$$

При определении  $F_0$  необходимо также учитывать влияние диаметра защитного чехла. Давление, удерживаемое резьбовым соединением, зависит от силы предварительного натяжения  $V$ , от рабочей температуры и от упругости резьбового соединения, а также от качества уплотняющих поверхностей. Анализ упругих воздействий можно провести на основе диаграммы затяжки [6.7].

Однако в связи с многочисленными взаимозависимостями всех указанных факторов влияния определить момент затяжки путем расчета точно нельзя. Поэтому используют опыт, накопленный при эксплуатационных условиях с достаточно точно известным  $V$ , согласно которому достаточная для удержания плот-

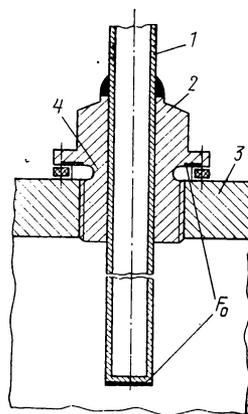


Рис. 6.12. Защитный чехол с резьбовым штуцером:

1 — защитный чехол; 2 — резьбовой штуцер; 3 — трубопровод; 4 — канавка для выхода резьбы

ность соединения достигается, если давление, которое необходимо удержать, определяется из отношения  $V/D = 2,5$ , т. е.

$$D = V/2,5^* \quad (6.15)$$

При помощи уравнений (6.12)—(6.15) можно рассчитать кривые удерживаемых давлений для приложенных моментов затяжки; они представляют собой приближенные значения. Представленная также на рис. 6.13 кривая удерживаемого давления (эксплуатационные данные) была принята для резьбы  $R 1''$  и  $R 3/4''$  из стали 13CrMo44 на основании упомянутых опытов с холодной водой [6.7].

При других размерах или других материалах уплотняемые давления необходимо рассчитывать или определять при помощи специальных опытов.

### 6.3.6.2. НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЗЬБЫ

Нагрузка на резьбу обуславливается усилием предварительного натяжения  $V$  и сжимающим усилием  $P_{ges}$ . Усилие  $I_{ges}$  создается давлением  $p_a$  на круговой поверхности  $F_{ges}$  со средним диаметром уплотнения. Приложение усилия распределено на верхнюю и нижнюю поверхности. Усилие  $V$  и часть усилия  $P_{ges}$  действуют на сечение по канавке для выхода резьбы как растягивающие усилия; другая часть усилия  $P_{ges}$  содержится в сжимающем усилении, действующем на кольцевую торцовую поверхность резьбового штуцера. По этой причине в качестве несущей длины резьбы можно принять  $l = d_K 0,7$ , где  $d_K$  — внутренний диаметр резьбы. Исполнительная длина резьбы должна быть по конструктивным соображениям и в связи с возможным охрупчиванием в нагретом состоянии больше расчетной. Соответствующая резьба гайки должна иметь длину, обеспечивающую надежное соединение.

В расчетах прочности для упрощения и увеличения надежности взамен величин  $V_t$  принимаю величину  $V$ .

Значения  $p_a$  на основе прочности резьбы могут быть рассчитаны при помощи следующего уравнения [6.7]:

$$\sigma_{red} = \frac{\sigma_K}{S} = 0,7 \frac{V + F_{ges} p_a}{d_K^2 \pi / 4} \cdot \frac{d_K}{l} 1,5. \quad (6.16)$$

Поскольку  $V$  зависит от приложенных крутящих моментов, для допустимого избыточного давления ( $p_a = p_e$ ) получается семейство кривых. На рис. 6.13 представлены нагрузочные способности резьбы  $Tr 1''$  резьбового штуцера из стали марки 13CrMo44; ясно видны области усталостной прочности и предела текучести. Слева от этих характеристик приведены соответствующие данные для резьбового штуцера из того же материала, длина резьбы которой на 5,5 мм меньше, а еще левее — кривые для неукороченного резьбового штуцера из углеродистой жаропрочной стали. Точки пересечения кривых нагрузочной способности с кривыми уплотняемых давлений показывают пределы применимости резьбовых штуцеров различных конструкций и из различных материалов.

\* Исследования Е. Зибеля, результаты которых использованы в нормах ДИН 2505, относятся к фланцевым соединениям. Для резьбовых соединений, у которых во время затяжки уплотняющие поверхности скользят одна по другой, за исключением нескольких исследований с холодной водой [6.7], нет никаких результатов, соответствующих результатам Е. Зибеля.

За время издания этой книги автор совместно с Г. Ванором (Ганау) провел дальнейшие опыты уплотнения с холодной водой и защитными чехлами  $R 1$  и уплотняющими кольцами современной конструкции. При помощи колец из мягкой стали удерживались давления от 200 до 300 бар избыточного давления. При плохо изготовленных уплотнительных кольцах были получены значения ниже 200 бар избыточного давления. При помощи медных колец таких же размеров, состоящих из трех частей, получали меньшие, часто недостаточные давления; эти кольца нельзя применять при больших рабочих давлениях.

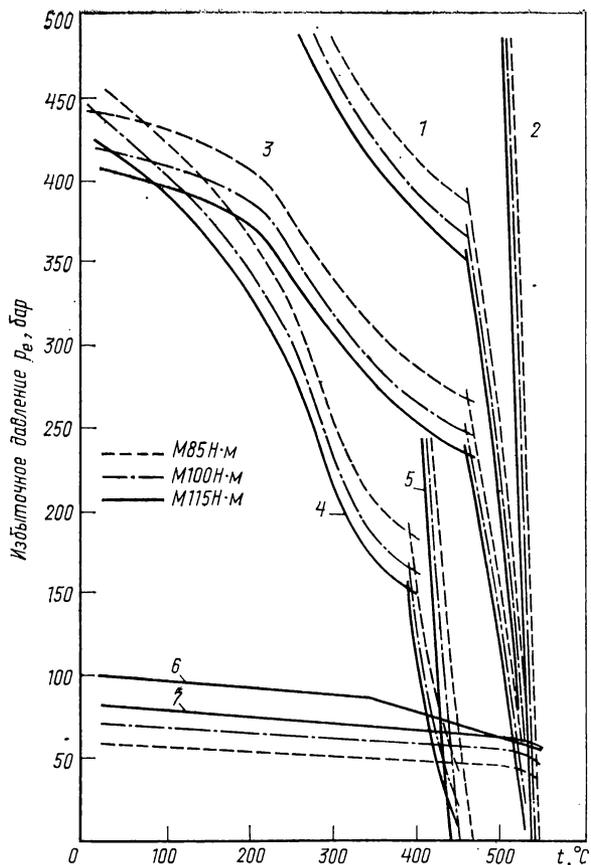


Рис. 6.13. Допустимая нагрузка на резьбовой штуцер  $Tp1''$  (при диаметре трубы 11 мм): 1—3 — штуцер из стали марки 13CrMo44 (1 — для резьбы; 2 — для выхода резьбы; 3 — для укороченной на 5,5 мм резьбы); 4, 5 — штуцер из углеродистой жаропрочной стали (4 — для резьбы; 5 — для канавки); 6 — удерживаемое давление (рабочее); 7 — то же (расчетное)

### 6.3.6.3. НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ КАНАВКИ ДЛЯ ВЫХОДА РЕЗЬБЫ

Под действием момента затяжки и эксплуатационных усилий в канавке для выхода резьбы развиваются напряжения растяжения и кручения. Напряжение растяжения равно

$$\sigma = \frac{V + F_0 p_a}{qh}, \quad (6.17)$$

где  $V$  — предварительное напряжение;  $F_0$ ,  $p_a$  — эксплуатационное усилие;  $qh$  — сечение канавки для выхода резьбы.

Напряжение кручения равно

$$\tau = M_G \frac{16D}{\pi (D^4 - d^4)}, \quad (6.18)$$

где  $M_G$  — момент резьбы из уравнения (6.12);  $D$  и  $d$  — наружный и внутренний диаметры канавки для выхода резьбы.

Зная допустимое напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sigma_K / 2S, \quad (6.19)$$

получают расчетное уравнение для  $p_e (= p_a)$ :

$$p_e = -AV \pm \sqrt{Bo_K^2 - CV^2}, \quad (6.20)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — числовые величины.

На рис. 6.13 приведены семейства кривых нагрузочной способности. Нагрузочные способности резьбы и канавки для выхода резьбы по величине уплотняемых давлений почти одинаковы. На диаграмме ясно видны пределы применимости резьбового штуцера; видно также, что рассеяние приложенных крутящих моментов имеет очень незначительное влияние и поэтому не требуется точно указывать момент затяжки.

Полную характеристику ввинчиваемого защитного чехла можно получить в результате совместной оценки диаграмм, приведенных на рис. 6.9 и 6.13. Возможность использования такого защитного чехла ограничивается линией уплотняемых давлений, если предел нагрузочной способности самого чехла (например, бронзового) не лежит ниже.

При меньшем коэффициенте трения уплотняемое давление возрастает, однако снижается нагрузочная способность защитного чехла под действием рабочего давления. Коэффициент трения зависит от участвующих материалов, чистоты обработки их поверхности, степени деформируемости, нагрузки на единицу поверхности и вида смазки. В отдельных случаях он может быть определен только при помощи специальных исследований. Для расчета диаграмм автором использованы следующие коэффициенты трения: для резьбы (сталь по стали)  $\mu = 0,25$ ; для уплотнения (сталь по кольцу из мягкой стали)  $\mu_1 = 0,22$ . Если для оценки прочности в расчете принять для резьбы и уплотнительных поверхностей принятый в машиностроении коэффициент трения для стали по стали  $\mu = 0,18$ , то для нагрузочной способности резьбы при  $500^\circ\text{C}$  и моменте затяжки  $10\,000 \text{ Н}\cdot\text{см}$  получилось бы допустимое рабочее давление  $185 \text{ бар}$  избыточного давления. Это значение на  $120 \text{ бар}$  превышает «уплотняемое давление» в этой точке.

При использовании новых установленных усталостных характеристик для тех же условий получают допустимое  $p_a$ , равное  $133 \text{ бар}$  избыточного давления, что на  $67 \text{ бар}$  превышает «уплотняемое давление».

### 6.3.7. КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ

Используемые в расчетах защитных чехлов коэффициенты запаса прочности следует выбирать с учетом вибрационных нагрузок и напряжений среза, которые не вычисляются, а также с учетом возможных дефектов заделки, коррозии, эрозии при отсутствии контроля в производственных условиях. Вследствие этого они, как правило, выше, чем при обычных расчетах труб.

В соответствии с предписаниями ДИН 2413 и нормами Рабочего объединения по сосудам высокого давления AD — лист В11 были установлены коэффициенты запаса прочности для различных стальных защитных чехлов, которые справедливы при условии, что используются материалы с приемочным свидетельством по ДИН 50049.

В остальном следует основываться на данных работы [6.8]. При цилиндрических защитных чехлах расчет ведут только с минимальными значениями и частично с более высокими значениями коэффициента запаса прочности.

До тех пор, пока в ДИН или нормами AD не внесены прочностные характеристики для бронзы, их необходимо запрашивать у изготовителей. При этом следует учитывать более высокие коэффициенты запаса прочности.

### 6.3.8. РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ПОТОКОМ

За обтекаемыми защитными чехлами периодически образуются завихрения. Если их частота равна или приблизительно соответствует частоте собственных колебаний защитного чехла, то возникают резонансные колебания. Если эти колебания продолжительны, то датчик температуры или даже защитный чехол разрушаются.

Частота отрыва вихрей  $n_{\text{в}}$  зависит от скорости течения  $v$ , диаметра обтекаемого тела  $d$  и коэффициента Штрюгала  $St$  [6.18—6.23]:

$$n_{\text{в}} = St/d. \quad (6.21)$$

Величина коэффициента Штрюгала  $St$  зависит от величины числа Рейнольдса  $Re = vd/\nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость. При  $Re > 10^3$  коэффициент Штрюгала имеет постоянное значение 0,21 [6.20].

Если в уравнение (6.21) взамен  $n_{\text{в}}$  подставить частоту собственных колебаний  $n_0$  защитного чехла и его диаметр  $d$ , то полученное значение  $v$  и есть возбуждающая резонансные колебания скорость течения.

Для определения числа собственных колебаний способную колебаться часть защитного чехла рассматривают как стержень с собственной распределенной массой и точечной массой (дно).

У цилиндрического защитного чехла круговая частота трубки равна [6.23]:

$$\omega_{Rn} = \frac{Z_n^2}{l^2} \sqrt{\frac{1}{q} \cdot \frac{E}{\rho}}, \quad (6.22)$$

где  $n$  — порядковое число высоты тона;  $n = 0$  — основной тон;  $n = 1$  — первая высшая гармоника;  $Z_n$  — коэффициент, зависящий от высоты тона ( $Z_0 = 1,875$ ;  $Z_1 = 4,694$ ).

Круговая частота стержня нулевой массы с точечной массой (дно) равна:

$$\omega_B = \sqrt{3EI/l^3 m}, \quad (6.23)$$

где  $m$  — масса дна, равная  $r^2 \pi s \rho$  ( $s$  — толщина дна;  $\rho$  — плотность материала). Суммарная круговая частота равна

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{1/\omega_{Rn}^2 + 1/\omega_B^2}}. \quad (6.24)$$

Частота собственных колебаний равна

$$n_0 = \omega/2\pi. \quad (6.25)$$

У конических защитных чехлов в уравнении (6.22) в правой части появляется еще одно выражение, учитывающее форму [6.23]; в уравнении (6.23) можно приближенно принимать в качестве величины  $I$  осевого момента инерции на половине встраиваемой длины защитного чехла.

Частоту высших гармоник можно приближенно вычислить, если не учитывать влияние днища.

Частота собственных колебаний уменьшается при повышении температуры. Если принять определенные полосы резонанса, можно нанести на диаграмму зоны, вызывающие колебания скоростей потока. На рис. 6.9 заштрихованные области являются опасными в связи с возбуждением резонансных колебаний: при низких скоростях течения вследствие основных колебаний, при высоких скоростях — под влиянием первой высшей гармоники.

У конических защитных чехлов диаметр значительно изменяется, вследствие чего на различных участках по его длине возбуждаются колебания под влия-

Т а б л и ц а 6.3

Число собственных колебаний  $n_0$  и возбуждающая колебания скорость течения  $v$  для защитного чехла со свободной длиной 125 мм и диаметром 24 мм у точки зажима

$t, ^\circ\text{C}$	$n_0, \text{с}^{-1}$	$v, \text{м/с, в месте замера}$		
		основание	середина	конец
20	1648	188,5	143	98
350	1525	174,5	132,5	124
570	1426	163	124	85

П р и м е ч а н и е. Допустимая рабочая скорость течения составляла 60 м/с.

нием различных скоростей течения (табл. 6.3). В связи с этим поглощаемая защитным чехлом энергия колебаний уменьшается.

В случае необходимости число собственных колебаний защитного чехла можно значительно снизить при помощи вставки. Если вставка находится у дна защитного чехла и при этом отсутствует возможность смещения в радиальном направлении, то частота в связи со значительным увеличением массы днища снижается, в то время как амплитуда изменяется лишь незначительно. Если вставка может скользить по дну в радиальном направлении благодаря наличию зазора, то колебания демпфируются до значительно меньшей амплитуды, в то время как частота в связи со слабой связью снижается лишь незначительно.

В производственных условиях в связи с названными причинами частота колебаний защитного чехла и, следовательно, возбуждающая эти колебания скорость течения меньше расчетной. Все расчеты имеют лишь ориентировочный характер. Возбуждение резонансных колебаний в результате сотрясений не может быть рассчитано предварительно. В этих случаях необходимо руководствоваться наблюдениями и принимать соответствующие меры, которые выбираются в зависимости от конкретных условий [6.10].

Нагрузка под действием колебаний также до настоящего времени не может быть определена расчетным путем в связи со многими не поддающимися предварительному определению факторами влияния и случайными моментами. Влияние отрыва вихрей вне резонансной области можно учесть при помощи коэффициента усиления динамического напора [6.10, 6.11]. Однако в случае резонанса нагрузка определяется не только динамическим напором. Более целесообразным при расчете прочности является повышение общего коэффициента запаса прочности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 6.1. Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 472—50. Düsseldorf.
- 6.2. Richter, F.: Korrosionstabellen metallischer Werkstoffe. Wien 1952.
- 6.3. Lieneberg, F.: Temperaturmessung. In Handbuch der technischen Betriebskontrolle. Bd. 3. Physikalische Meßmethoden. 3. Aufl., Leipzig 1959, S. 162—376.
- 6.4. Lindorf, H.: Technische Temperaturmessungen. 3. Aufl., Essen 1968.
- 6.5. Obrowski, W.: Auswahl von Thermometerschutzrohren. VDI-Berichte № 112. Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966.
- 6.6a. Samsonow, G. W.; Kisly, P. S. (Самсонов Г. В., Кислый П. С.): Nichtmetallene Thermopaare und Schutzrohre, Teil 1. Werkstoffe und deren Eigenschaften. Teil 2. Einsatz in der Industrie. VDI-Z. 111 (1969), S. 1337—1342 und 1706—1712.
- 6.6b. Fischer, A.: Die kontinuierliche thermoelektrische Messung des Temperaturverlaufs bei den Blasstahlverfahren. Stahl und Eisen 1962, 82, S. 797—808.
- 6.7. Dittrich, P. Berechnung von Schutzrohren für Thermometer zum Einbau in Leitungen und geschlossene Behälter. Allgem. Wärmetechn. 1954, 5, S. 253—263.
- 6.8. Dittrich, P.: Beiträge zur Berechnung von hochbeanspruchten Schutzrohren für Thermometer. Allgem. Wärmetechn. 1963, 11, S. 163—176.

- 6.9. *Dittrich, P.*: Belastungsdiagramme von Einschweißschutzrohren für Widerstandsthermometer und Thermoelemente nach DIN 43763. Allgemeine Wärmetechn. 1964, 12, S. 1—9.
- 6.10. *Murdock, J. W.*: Power test code thermometer wells. Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Ser. A. 1959, S. 403—415.
- 6.11. Amer. Soc. mech. Engrs. Power test code, Instruments and apparatus, Part 3. Temperature measurement. New York 1961.
- 6.12. *Wukolowitsch, M. P.*: Thermodynamische Eigenschaften des Wassers und des Wasserdampfes. Berlin 1958.
- 6.13. *Jakob, M.*: Thermodynamische Drosselgleichung und Zustandsgleichung der Luft von weitem Gültigkeitsbereich. Forschungsarb. Geb. Ing. Wes. № 202, 1917, S. 19—45.
- 6.14. *Bach, C.*: Elastizität und Festigkeit. Berlin, 1920, S. 481, 584—595.
- 6.15. *Sass, F.; Bouche, Ch.*: Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau. Bd 1, Berlin 1956, S. 743—745.
- 6.16. *Föppl, A.*: Festigkeitslehre. Berlin 1920, S. 364—367.
- 6.17. *Bestehorn, R.*: Die zulässige Belastung von Schrauben. Technik 1946, 1, S. 183—185.
- 6.18. *Falkenhagen, H.*: Experimentelles zur Wirbelstraßenbildung. In Handbuch der Experimentalphysik. Bd. 4, Teil 1, Leipzig 1932, S. 175—182.
- 6.19. *Kalähne, A.*: Theorie der Hieb-, Spalt- und Schneidetöne. Handbuch der Physik, Bd. 8, Berlin 1927, S. 270.
- 6.20. *Schlichting, H.*: Grenzschicht-Theorie, Karlsruhe, 1958, S. 29.
- 6.21. *Krüger, F.; Louth A.*: Theorie der Hiebtöne. Ann. Phys. 1914, 44, S. 801—812.
- 6.22. *Michel, F.*: Strömungserregte Resonanzschwingungen von Thermometerhülsen. Meßtechnik 1931, 7, S. 59—63.
- 6.23. *Hort, W.*: Berechnung von Eigenschwingungszahlen mechanischer Gebilde. In Hütte, Bd. 1, 26. Aufl., Berlin 1936, S. 435—449.

## **7. СТАТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ПОКАЗАНИЯ ТЕРМОМЕТРОВ**

При измерении температуры тепло передается от измеряемой среды через защитную арматуру термометра к датчику температуры, фиксирующему температуру измеряемой среды. Однако при этом происходит теплообмен между датчиком температуры и арматурой, включая и выступающие за пределы измеряемой среды детали, такие как верхняя часть термометра, монтажный фланец и головка, так как между ними и измеряемой средой обычно имеется разность температур. Появляющиеся вследствие этого отклонения измеренной температуры от действительной зависят от условий теплопередачи, которые определяются, с одной стороны, конструкцией термометра, а с другой — характеристиками измеряемого объекта. Для того чтобы исключить или поддерживать эти отклонения в допустимых пределах, необходимо использовать для конкретных измерений наиболее пригодный для этой цели термометр. Аспекты, которые нужно учитывать при конструировании, выборе и монтаже термометра, вытекают из законов теплопередачи [7.1—7.4].

Вследствие теплообмена датчик температуры принимает измеряемую температуру с некоторым запаздыванием во времени. Этим определяются динамические (временные) характеристики термометра, т. е. время установления или запаздывание показаний. Если установилось тепловое равновесие, то термометр будет иметь только статическую погрешность измерения, которая называется погрешностью теплопроводности. В общем случае различают следующие факторы влияния:

- 1) конструкция и способ монтажа термометра на объекте измерения;
- 2) условия контактирования термометра при измерении температуры по-вержности;
- 3) временные характеристики термометра;
- 4) погрешность нагрева рабочим током (для термометров сопротивления).

### **7.1. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБА МОНТАЖА ТЕРМОМЕТРА НА ЕГО ПОГРЕШНОСТЬ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ**

Погрешность в результате теплопроводности может достигать больших величин прежде всего при измерении температуры газов и пара низкого давления и при малых скоростях течения. Однако часто ею нельзя пренебрегать и при измерениях температуры в установках высокого давления, а также в жидкостях. Ниже приведен расчет погрешности теплопередачи для термометров, имеющих защитные чехлы, с некоторыми упрощениями.

В соответствии с рис. 7.1, если температура окружающей среды ниже температуры объекта измерения, в трубопроводе, в котором закреплен электрический термометр так, что он находится в тепловом контакте со стенкой трубопровода, в результате разности температур возникают в основном тепловые потоки  $\Phi_1$ — $\Phi_8$ . От защитного чехла тепловой поток  $\Phi_1$  воспринимается в результате конвективного теплообмена. Через защитный чехол и измерительную вставку в результате теплопроводности к точке крепления направлены тепловые потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , в то время как поток  $\Phi_4$  отводится в результате обмена энергии путем излучения между защитным чехлом и стенкой трубопровода. От точки крепления защитного чехла одна часть  $\Phi_5$  тепловых потоков  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  течет в радиальном

направлении в стенку трубы, остальные части  $\Phi_6$  и  $\Phi_7$  отводятся через шейку и головку термометра в результате теплообмена в окружающую среду. Кроме того, в окружающую среду в результате теплообмена отводится тепловой поток  $\Phi_8$ , отдаваемый в результате конвективной теплопередачи от измеряемого объекта к стенке трубы. Под влиянием тепловых потоков  $\Phi_4$  и  $\Phi_5$  в стенке трубы образуется радиальный перепад температур от точки крепления, так что отдаваемый в окружающую среду тепловой поток вблизи места крепления при некоторых обстоятельствах может оказаться больше потока  $\Phi_8$ . Поскольку воспринятое защитным чехлом тепло должно быть равно отданному теплу  $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$  и так как сумма  $\Phi_2 + \Phi_3$  переходит в сумму  $\Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7$ , то, пренебрегая  $\Phi_8$ , получим тепловой баланс  $\Phi_1 = \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7$ .

В связи с отводимым от защитного чехла теплом возникает перепад температур  $t_1 - t_w$  между дном защитного чехла и его креплением, а также перепад  $t - t_{Th}$  между температурой вдоль защитного чехла и измерительной вставкой по отношению к температуре  $t_{Th}$  датчика. Точный расчет изменения температуры и, следовательно, погрешности, определяемой конструкцией и способом монтажа термометра, в общем случае невозможен, так как защитная арматура термометра состоит из нескольких материалов с различными физическими свойствами. Кроме того, в связи с необходимостью оснащения термометров резьбовыми штуцерами, фланцами, головками и т. п. получаются настолько сложные схемы для расчета, что их трудно использовать. Поэтому для определения величины погрешности, зависящей от способа монтажа термометра, необходимо вводить те или иные упрощающие допущения.

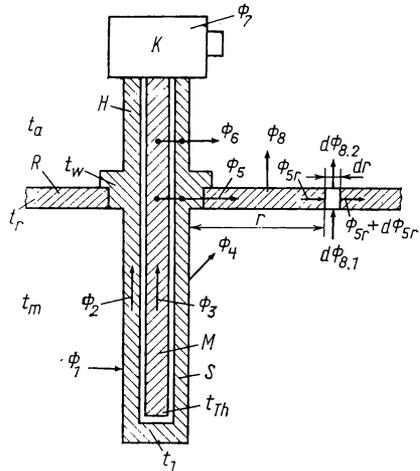


Рис. 7.1. Схема тепловых потоков армированного термометра, встроенного в трубопровод:

$\Phi_1 - \Phi_8$  — тепловые потоки;  $R$  — стенка трубопровода;  $S$  — защитный чехол;  $M$  — измерительная вставка;  $H$  — шейка защитной арматуры термометра;  $K$  — головка термометра;  $t_{Th}$  — температура датчика;  $t_1$  — температура дна защитного чехла;  $t_r$  — температура стенки трубопровода;  $t_w$  — температура фланца в точке крепления защитного чехла;  $t_m$  — температура измеряемой среды;  $t_a$  — температура окружающей среды

## 7.1.1. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ И ИЗЛУЧЕНИЕМ

### 7.1.1.1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ ТЕРМОМЕТРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ. ЗАЩИТНАЯ АРМАТУРА БЕЗ ВЫСТУПАЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ

В соответствии с рис. 7.2 сначала следует рассмотреть только тепловой поток по длине защитного чехла со стенкой одинаковой толщины; этот чехол имеет тепловой контакт со стенкой трубопровода и не имеет выступающих наружу деталей. Кроме того, принимается, что через поверхность дна защитного чехла не происходит подвода или отвода тепла и что отвод тепла от места крепления (от фланца защитного чехла) настолько хороший, что температура фланца  $t_w$

равна температуре стенки трубопровода  $t_r$  [7.5—7.7]. Тогда поток тепла через продольный элемент  $dx$  защитного чехла с наружным диаметром  $d$  в результате конвективной теплопередачи от измеряемой среды с температурой  $t_m$  составляет

$$d\Phi_1 = \alpha_k \pi d dx (t_m - t). \quad (7.1)$$

Поток тепла, отдаваемый излучением продольным элементом  $dx$  стенке трубопровода, составляет

$$d\Phi_2 = -\alpha_{S1} \pi d dx (t - t_w). \quad (7.2)$$

Поскольку обмен энергией путем излучения формально можно рассматривать как теплопередачу,  $\alpha_{S1}$  получают на основе закона излучения:

$$C [(T/100)^4 - (T_w/100)^4] = \alpha_{S1} (t - t_w). \quad (7.3)$$

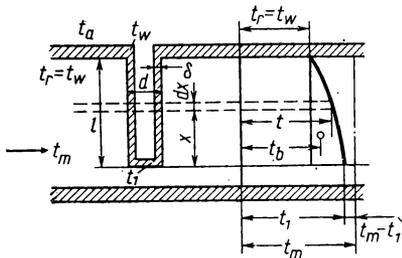


Рис. 7.2. Распределение температуры в полости погружаемого защитного чехла:

$t_a$  — температура окружающей среды;  
 $t_r$  — температура стенки трубопровода;  
 $t_w$  — температура фланца;  $t_m$  — температура измеряемой среды;  $t_b$  — измеренная температура у дна защитного чехла;  $d$  — наружный диаметр защитного чехла;  $\delta$  — толщина стенки защитного чехла;  $l$  — глубина погружения защитного чехла

Такое предположение справедливо до тех пор, пока не допускается появление экстремальных значений  $t$  и  $t - t_w$ .

Осевой тепловой поток в продольном элементе  $dx$  составляет

$$\Phi = -\lambda_t F \frac{dt}{dx}. \quad (7.4)$$

В этих уравнениях приняты следующие условные обозначения:  $t$  или  $T$  — температуры продольного элемента  $dx$ ;  $t_m$  — температура измеряемой среды;  $t_w$  или  $T_w$  — температура фланца термометра или защитного чехла;  $\alpha_k$  или  $\alpha_{S1}$  — коэффициент теплопередачи на поверхности термометра (без площади дна защитного чехла) путем конвекции или излучения;  $C = C_s \varepsilon$  — постоянная излучения поверхности без площади дна защитного чехла, где  $C_s = 10^8 \sigma$  — постоянная излучения абсолютно черного тела ( $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана);  $\varepsilon$  — излучательная способность поверхности трубопровода;  $\lambda_t$  — теплопроводность материала при температуре  $t$ ;  $d$  — наружный диаметр защитного чехла, м;  $F$  — площадь поперечного сечения стенки трубы, м<sup>2</sup>. При толщине стенки  $\delta$  площадь  $F$  составляет  $F = [d^2 - (d - 2\delta)^2] \pi / 4$ ;  $\Phi$  — тепловой поток.

Использованные в формулах условные обозначения, единицы СИ (по ДИН 1301, ноябрь 1971 г.), применяемые до настоящего времени единицы измерения и их пересчет в единицы СИ приведены в табл. 7.1.

В системе единиц СИ постоянные имеют следующие численные значения: постоянная Стефана—Больцмана  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ ;

постоянная излучения  $C_s \approx 5,67$ .

В ряде справочников используется численное значение этой величины, полученное в результате более ранних измерений (5.77).

Т а б л и ц а 7.1

## Некоторые величины и их единицы измерения

Величина и обозначение	Единицы		Пересчет в систему СИ
	в системе СИ	ранее используемые	
Количество тепла $Q$	Дж; Втс	ккал	1 ккал = 4,1868 кДж $\approx$ $\approx 4,2$ (кВт·с) = = 1,163 (Вт·ч)
Тепловой поток $\Phi$	Дж/с; Вт	ккал/ч	1 ккал/ч = 1,163 Вт
Теплопроводность $\lambda$	Вт/(К·м)	ккал/(К·м·ч)	1 ккал/(К·м·ч) = = 1,163 Вт/(К·м)
Коэффициент теплоотдачи $\alpha$	Вт/(К·м <sup>2</sup> )	ккал/(К·м <sup>2</sup> ·ч)	1 ккал/(К·м <sup>2</sup> ·ч) = = 1,163 Вт/(К·м <sup>2</sup> )
Коэффициент теплопередачи $k$	Вт/(К·м <sup>2</sup> )	ккал/(К·м <sup>2</sup> ·ч)	1 ккал/(К·м <sup>2</sup> ·ч) = = 1,163 Вт/(К·м <sup>2</sup> )
Удельная теплоемкость $c$	Дж/(кг·К)	ккал/(кг·К)	1 ккал/(кг·К) = = 1,163 Вт·ч/(кг·К) $\approx$ $\approx 4,2$ кДж/(кг·К)
	Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	ккал/(м <sup>3</sup> ·К)	1 ккал/(м <sup>3</sup> ·К) = = 1,163 Вт·ч/(м <sup>3</sup> ·К) $\approx$ $\approx 4,2$ кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
Плотность $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>	1 кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> $\approx$ 10 кг/м <sup>3</sup>
Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	ккал/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ) = = 1,163 Вт·ч/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Коэффициент излучения $C_s$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	ккал/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ) = = 1,163 Вт·ч/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )

По уравнениям (7.1), (7.3) и (7.4) получают нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее распределение температуры вдоль защитного чехла:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\pi d}{\lambda_t F} \left\{ \alpha_k (t_m - t) - C \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \right\} = 0; \quad (7.5a)$$

используя уравнение (7.2), получаем

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\pi d}{\lambda_t F} [\alpha_k (t_m - t) - \alpha_{St} (t - t_w)] = 0. \quad (7.5b)$$

Решая линейное дифференциальное уравнение (7.5b) для распределения температуры  $t_x$  по длине защитного чехла, получают закон наложения Тевеса и Клостерхальфена [7.8—7.10]:

$$\frac{t_m - t_x}{t_m - t_w} = \varphi_{1x} - \varphi_{1x}\varphi_{2x} + \varphi_{2x} = \varphi_x,$$

$$\text{или } \frac{t_x - t_m}{t_w - t_m} = \varphi_x. \quad (7.6)$$

В соответствии с этим  $\varphi$  является относительной погрешностью в результате теплопроводности и излучения при

$$\varphi_{1x} = \frac{\text{ch}(Ax)}{\text{ch}(Al)} \quad (\text{мера для оценки влияния теплопроводности при длине защитного чехла } l). \quad \text{Здесь} \quad (7.7)$$

$$A = \sqrt{\frac{\alpha_k + \alpha_{St}}{\lambda_t} \cdot \frac{\pi d}{F}}. \quad (7.8)$$

$$\text{Далее } \varphi_2 = \frac{\alpha_{St}}{\alpha_k + \alpha_{St}} \quad (\text{мера влияния излучения}). \quad (7.9)$$

Часто температура стенки или фланца ( $t_r = t_w$ ) не известна, однако известна температура окружающей среды  $t_a$  (см. рис. 7.1). Так как  $t_m - t_w = \Phi_w(t_m - t_a)$  при  $\Phi_w = k/\alpha_i$ , то можно относить относительную погрешность температуры также к  $t_m - t_a$ . Тогда

$$\frac{t_m - t_x}{t_m - t_a} = \Phi_w \Phi_x = \Phi_x \frac{k}{\alpha_i}. \quad (7.6a)$$

В уравнении (7.6) и в следующих уравнениях для  $\Phi$  в соответствии с этим следует умножать погрешность  $\Phi_x$  на коэффициент  $\Phi_w$  ( $\alpha_i$  представляет собой коэффициент конвективной теплопередачи для внутренней стенки трубы,  $k$  — коэффициент теплопередачи стенки) [7.12].

Если датчик температуры имеет практически точечный контакт с дном защитного чехла, как у термомпар, то при  $x = 0$  и температуре  $t_1$  относительная погрешность, обусловленная способом монтажа, в этой точке равна

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 = \Phi_0 = \frac{t_m - t_1}{t_m - t_w}$$

или  $\frac{t_1 - t_m}{t_w - t_m} = \Phi_0, \quad (7.10)$

где  $\Phi_1 = 1/\text{ch}(Al). \quad (7.11)$

Если погрешность измерения возникает преимущественно в результате теплопроводности, как у жидкостей, или если (как при измерениях температуры помещений) теплообмен в результате излучения невелик по сравнению с обменом в результате конвекции, то  $\Phi_2 = 0$  и относительная погрешность измерения  $\Phi_0 = \Phi_1$ .

Если погрешность измерения обуславливается преимущественно излучением, а погрешность измерения в результате теплопроводности невелика по сравнению с погрешностью в результате излучения, как у термометров, которые встроены в трубопровод с хорошей теплоизоляцией, то  $\Phi_1 = 0$ . Путем преобразования уравнения (7.9) получаем  $\alpha_k/\alpha_{St} = (t_1 - t_w)/(t_m - t_1)$ . С учетом уравнений (7.3) и (7.9) окончательно имеем

$$\Phi_2 = \frac{t_m - t_1}{t_m - t_w} = \frac{C}{\alpha_k(t_m - t_w)} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]. \quad (7.9a)$$

Если датчик температуры воспринимает не температуру  $t_1$  поверхности дна, а среднюю температуру  $t_a$  эффективной длины  $a$  датчика температуры, получают для относительной погрешности измерения  $-\Phi_a$  [7.10, 7.12]

$$\Phi_a \approx \Phi_1 \alpha + \Phi_2 - \Phi_1 \alpha \Phi_2, \quad (7.12)$$

где  $\Phi_{1a} = \text{sh}(Aa)/Aa \cdot \text{ch}(Al). \quad (7.13)$

Если длина датчика равна всей длине погружной части термометра, как у палочного термометра расширения, то в уравнение (7.12) необходимо вместо  $\Phi_{1a}$  подставить величину

$$\Phi_{1l} = \text{th}(Al)/Al. \quad (7.14)$$

Из закона наложения [уравнения (7.6), (7.10) и (7.12)] следует, что при одновременном отводе тепла за счет теплопроводности, конвекции и излучения погрешность, обусловленная способом монтажа, может быть значительно меньше, чем погрешность, которая получилась бы по отдельным значениям  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Пусть, например, в вентиляционный канал диаметром 2,6 м встроены защитный чехол длиной  $l = 100$  мм, диаметром  $d = 18$  мм, с толщиной стенки  $\delta = 3$  мм, теплопроводностью  $\lambda_t = 50$ , постоянная излучения при этом  $C = 4$ . Скорость течения воздуха 2,8 м/с, температура окружающей среды 20°С, измеренная температура дна защитного чехла 153°С. Тогда в соответствии с уравнением (7.10) погрешность  $t_1 - t_m = -58$  К. В то же время суммарная погрешность по выражению ( $\Phi_1 + \Phi_2$ ) составила бы  $-78$  К.

В этих расчетах принята постоянная средняя температура для теплообмена путем излучения и, кроме того, не учитывается поток тепла через дно защитного чехла. Для того чтобы учесть этот поток, необходимо при расчетах взамен действительной длины  $l$  брать эквивалентную длину  $l' = l + z$ . Дополнительную длину  $z$  вычисляют на основании условия, что приращение боковой поверхности за счет отрезка  $z$  равно поверхности дна ( $\pi d^2/4 = \pi dz$ ). В соответствии с этим для плоского дна  $z = d/4$ , а для полусферического  $d/2$ .

### 7.1.1.2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ДНО ЗАЩИТНОГО ЧЕХЛА НА МИНИМАЛЬНУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ОТВОДА ТЕПЛА

Если тепловым потоком через дно  $F_B$  не пренебрегают, то необходимо учитывать величину этого потока как в результате конвекции, так и за счет излучения ( $\alpha_{kB}$  и  $\alpha_{StB}$ ). Из этого вытекает несколько выводов относительно величины связанной с этим погрешности измерения.

В результате интегрирования дифференциального уравнения (7.5б) получаем взамен  $\varphi_1$  уравнение (7.11) для  $\varphi_{1B}$  при  $x = 0$  (конец защитного чехла):

$$\varphi_{1B} = \frac{1 + (\epsilon/A) \operatorname{sh} Al}{\operatorname{ch} Al + (k/A) \operatorname{sh} Al}, \quad (7.15)$$

где

$$\epsilon = \frac{1}{\lambda_t F} \left( \frac{\alpha_{StB}}{\alpha_{kB}} - \frac{\alpha_{St}}{\alpha_k} \right) F_B \alpha_{kB};$$

$$k = \frac{1}{\lambda_t F} (\alpha_{kB} + \alpha_{StB}) F_B, \quad (7.16)$$

где  $k$  — положительное число.

Если  $\alpha_{StB}/\alpha_{kB}$  меньше или больше  $\alpha_{St}/\alpha_k$ , то в соответствии с уравнениями (7.15) и (7.16) погрешность измерения температуры  $t_{1B} - t_m$  у дна меньше или больше, чем если  $\alpha_{StB}/\alpha_{kB} = \alpha_{St}/\alpha_k$ . Кроме того, получается, что вследствие подвода тепла

через дно его температура  $t_{1B}$  становится больше температуры  $t_1$  и вследствие этого относительная погрешность измерения  $\varphi_{1B} < \varphi_1$  по уравнению (7.11). Только тогда, когда  $\epsilon/A$  и  $k/A$  становятся достаточно малыми, получается погрешность измерения температуры, соответствующая уравнению (7.11).

Изменение температуры по длине защитного чехла  $t(x)$  только тогда подчиняется закону гиперболического косинуса (рис. 7.3, кривая 2), когда через поверхность дна не происходит теплообмена. Если же, напротив, к поверхности дна подводится тепло (см. рис. 7.3, кривая 1), то кривая подходит к оси ординат при  $x = 0$  с тенденцией роста; в случае отвода тепла от дна чехла получается плоский участок кривой и при  $x = 0$  имеется тенденция к спаду (рис. 7.3, кривая 3). Мерой отвода тепла, равновесия или потери тепла на нижней поверхности термометра является независимо от размеров защитного чехла и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  выражение

$$\frac{\alpha_{kB}}{\alpha_{StB}} \geq \frac{t_m - t_1}{t_1 - t_w}. \quad (7.17)$$

При больших значениях  $t$ ,  $t_w$  и  $t_w - t$  нельзя принимать линейную зависимость от температуры для теплопередачи излучением и при некоторых обстоятельствах также и для теплопередачи конвекцией. Тогда путем приближенного

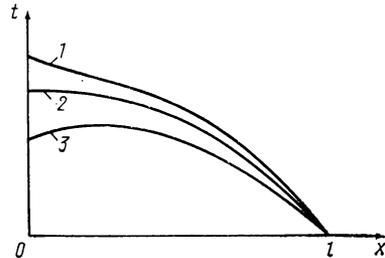


Рис. 7.3. Распределение температуры вдоль односторонне закрепленного защитного чехла:

1 — при подводе тепла; 2 — при тепловом равновесии; 3 — при потере тепла, через дно защитного чехла

интегрирования нелинейного дифференциального уравнения (7.5а) получают зависимость искомой температуры  $t_1$  на свободном конце чехла, а также зависимость погрешности измерения  $t_1 - t_m$  от длины защитного чехла. В соответствии с этой зависимостью погрешность при увеличении длины  $l$  уменьшается сначала медленно, затем быстрее и, наконец, снова медленнее. Она достигает минимального предельного значения, при котором в каждом элементе чехла  $dx$  подводимое и отводимое количество тепла одинаковы. Путем выбора большей длины нельзя достичь величин, меньших, чем это предельное значение.

Практически такие же результаты, а также дальнейшие выводы можно получить при помощи графического решения нелинейного дифференциального уравнения (7.12). При подводе тепла через нижнюю поверхность на кривой температуры получают точки перегиба, при отводе тепла — плоские участки. Эти точки перегиба температур  $t_{we}$  получаются аналогично погрешности в результате теплообмена излучением (7.9а):

$$t_m - t_{we} = \frac{C}{\alpha_k} \left[ \left( \frac{T_{we}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]. \quad (7.18)$$

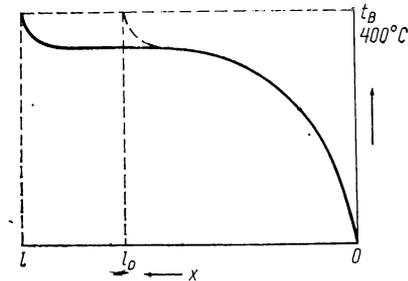
В соответствии с этим выражением при данной температуре стенки  $t_w$  температура  $t_{we}$  зависит от отношения  $C/\alpha_k$ , а также от температуры измеряемой среды  $t_m$ . Положение точки перегиба кривой  $t = f(x)$  и таким образом величина погрешности измерения  $t_{1B} - t_m$  (где  $t_{1B}$  — измеренная температура дна защитного чехла) зависят от значения  $dt/dx$  при  $x = 0$  и от длины  $l$ .

Зависимость  $t = f(x)$  после выполнения первого интегрирования уравнения (7.5а) не может быть представлена в виде формулы. Путем графического анализа численных примеров получают,

что минимально возможная погрешность измерения  $(t_{1B} - t_m)_{\min}$  зависит от отношения постоянных излучения к коэффициентам теплоотдачи дна защитного чехла и самого защитного чехла. Следует различать следующие возможности:

1. Если  $C_{1B}/\alpha_{kB} = C/\alpha_k$ , т. е. если условия теплоотдачи у дна и на свободном конце чехла одинаковы, то  $(t_m - t_1)_{\min} = (t_m - t_1)_{st}$ . Погрешность измерения возникает только вследствие обмена излучением в соответствии с уравнением (7.9а), поэтому величина площади поперечного сечения  $F$ , периметра чехла  $\lambda d$  и теплопроводности  $\lambda_t$  его материала не оказывают влияния.

Рис. 7.4. Влияние длины защитного чехла на распределение температуры ( $l$  или  $l_0$  — минимальная длина при наименьшей достижимой температуре  $t_B$ )



2. Если  $C_{1B}/\alpha_{kB} < C/\alpha_k$ , то  $(t_m - t_1)_{\max} < (t_m - t_1)_{st}$ . При уменьшении  $\lambda_t$  и  $F$  погрешность измерения снижается, однако при увеличении периметра  $\lambda d$  она становится больше. Это наблюдается безусловно на всех защитных чехлах, обтекаемых вдоль.

3. Если  $C_{1B}/\alpha_{kB} > C/\alpha_k$ , то при уменьшении  $\lambda_t$  и  $F$  погрешность измерения становится даже больше, однако при увеличении периметра  $\lambda d$  она становится меньше.

По изменению температуры  $t = f(x)$ , определенному графическим путем, получают минимальную погрешность измерения  $(t_{1B} - t_m)_{\min}$  при минимальной длине  $l_0$ , которая обусловлена размерами, а также физическими параметрами чехла и измеряемой среды. При длине, меньшей, чем  $l_0$ , погрешность становится больше. Однако увеличение длины не приводит к уменьшению погрешности измерения (рис. 7.4). Длина  $l_0$  получается тем меньше, чем меньше отношение  $C_B/\alpha_{kB}$  по сравнению с  $C/\alpha_k$  для термометров, обтекаемых в продольном направлении. Длина  $l_0$  при увеличении значения  $\lambda$  и уменьшении площади поперечного сечения  $F$  уменьшается медленнее при увеличении площади дна  $F_B$ .

### 7.1.1.3. СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПУТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Погрешность измерения в результате обмена энергией путем излучения может быть в значительной мере уменьшена при помощи цилиндра, устанавливаемого вокруг защитного чехла. В этом случае поверхность защитного чехла обменивается энергией путем излучения только с экранирующим цилиндром. Температура цилиндра  $t_z$  находится между температурой измеряемой среды  $t_m$  и температурой стенки  $t_r = t_w$ . Температура на поверхности дна защитного чехла  $t_1$  может быть определена из уравнения (7.9а):

$$t_m - t_1 = \frac{C}{\alpha_k} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 \right]$$

и

$$t_m - t_z = \frac{C_z}{2\alpha_{kz}} \left[ \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (7.19)$$

методом подбора. Здесь  $C_z$  — постоянная излучения наружной поверхности экранирующего цилиндра;  $\alpha_{kz}$  — коэффициент теплопередачи к экранирующему цилиндру.

В соответствии с этим тепловой поток при одинаковых постоянных излучения  $C$  и  $C_z$  и одинаковых коэффициентах теплопередачи  $\alpha_k$  и  $\alpha_{kz}$  снижается наполовину. Защитное действие экранирующего цилиндра увеличивается в несколько раз, если для его изготовления используются материалы с малыми значениями излучательной способности, такие как металлы с блестящей полированной поверхностью. Кроме того, защитное действие усиливается, если ци-

Т а б л и ц а 7.2

**Погрешности измерения температуры в результате теплопроводности и излучения без защиты и с защитой от излучения**  
**Размеры экранирующего цилиндра: диаметр  $d = 0,012$  м,**  
**толщина стенки  $\delta = 0,0015$  м, длина  $l = 0,1$  м,**  
**диаметр трубопровода 0,6 м, температура измеряемой среды (воздуха)  $200^\circ \text{C}$**

Наименование	Нетеплоизолированный трубопровод, низкая температура стенки трубы		Теплоизолированный трубопровод, высокая температура стенки трубы	
	5	10	5	10
Скорость потока воздуха, м/с	5	10	5	10
$\alpha_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	22	37	21	36
Без защиты от излучения				
Температура стенки $t_w$ , °С	138	157	183	190
Погрешность в результате теплопроводности $t_1 - t_m$ , К	-47,1	-27,9	-12,9	-6,5
Погрешность в результате излучения, К	-24,8	-13,2	-7,9	-3,4
Необходимая длина защитного чехла (см) при допустимой погрешности 1 К	35	23	25	13
При наличии защиты от излучения				
Температура стенки $t_w$ , К	198,4	199,27	199,45	199,81
Погрешность в результате излучения, К	-0,7	-0,25	-0,27	-0,07

линдр снабжен ребрами или если используется несколько цилиндров, вставленных с зазорами один в другой.

При измерении температуры в селективно излучающих газах, таких как водяной пар, дымовые газы или светящееся пламя, необходимо для расчета погрешности измерения учитывать излучательные свойства газов, благодаря которым погрешность измерения в результате теплообмена излучением также уменьшается.

В табл. 7.2 приведены данные относительно погрешности измерения у дна защитного чехла ( $x = 0$ ) в результате теплопроводности в соответствии с уравнением (7.11), а также в результате излучения в соответствии с уравнением (7.9) при различных условиях измерения для полностью погружаемого защитного чехла [7.5]. Видно также влияние экранировки. Кроме того, указана необходимая длина защитного чехла, если погрешность за счет способа монтажа должна составлять 1 К.

#### 7.1.1.4. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ ТЕРМОМЕТРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ С ЧАСТИЧНО ВЫСТУПАЮЩИМИ ДЕТАЛЯМИ ЗАЩИТНОЙ АРМАТУРЫ

При измерениях температуры при помощи технических термометров большей частью более или менее проводящие тепло детали арматуры выступают из измеряемой среды с тем, чтобы, например, верхняя часть стеклянных технических термометров была обеспечена достаточной механической защитой, или для того,

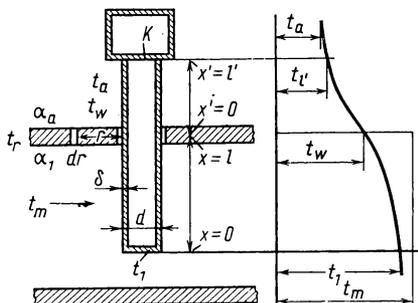


Рис. 7.5. Распределение температуры в частично выступающем защитном чехле:

$l'$  — длина выступающей части до головки;  $K$  — коэффициент теплоотдачи головки;  $\alpha_a$  и  $\alpha_i$  — коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей стенки трубопровода; остальные обозначения те же, что и на рис. 7.2

туры дымовых газов, когда защитный кладку дымохода.

Изменение температуры вдоль защитного чехла в этом случае должно иметь непрерывный характер от дна защитного чехла до головки термометра с точкой перегиба в месте его прохода через стенку трубопровода согласно рис. 7.5 [7.5]. Для изменения температуры выступающей верхней части стеклянного технического термометра или электрического термометра с головкой должно быть справедливо то же дифференциальное уравнение (7.5), как и для погружной части, но с иными константами решения. В точке перегиба первые производные обоих уравнений должны иметь одинаковое значение. Необходимо дополнительно учитывать поток тепла  $\Phi_7$  через головку (см. рис. 7.1). Поскольку потери тепла через головку должны соответствовать потоку тепла через удлинительную трубку (шейку) термометра в точке  $x' = l'$  (рис. 7.5), то величина  $\Phi_7$  может быть опре-

чтобы у электрических термометров головка термометра и соединительные провода не перегревались.

Теплоотвод через выступающие детали арматуры в окружающую среду повышает погрешность измерения, обусловленную способом монтажа. Если защитный чехол привинчен или приварен к стенке трубы, то при некоторых обстоятельствах необходимо также учитывать радиальный поток тепла  $\Phi_8$  (см. рис. 7.1) от места крепления защитного чехла в трубопровод. Этот поток тепла (обычно  $t_w > t_r$ ) может быть в значительной мере уменьшен путем теплоизоляции трубопровода. Напротив, погрешность измерения под влиянием выступающих деталей арматуры становится тем больше, чем лучше защитный чехол изолирован от стенки трубы в месте его заделки, как это бывает при измерении температуры чехол проходит через огнеупорную

делена экспериментальным путем при помощи измерения температуры шейки термометра вблизи головки. При помощи эмпирического коэффициента теплоотдачи  $K$ , имеющего размерность Вт/К, получают поток тепла  $\Phi_{\tau} = (t_{l'} - t_a) K$ , где  $t_a$  — температура окружающей среды. Решение дифференциальных уравнений дает для изменения температуры по длине защитного чехла, включая головку, выражение [7.13]

$$\frac{t_m - t_x}{t_m - t_a} = \varphi_k \varphi_{1x} + \varphi_w \varphi_{St} - \varphi_w \varphi_{St} \varphi_{1x}, \quad (7.20)$$

где влияние выступающих деталей арматуры

$$\varphi_k = \varphi_f \varphi_{St} \varphi_w + (1 - \varphi_f) [1 - \varphi'_{St} (1 - \varphi_w)]. \quad (7.21)$$

Здесь

$$\varphi_f = A \operatorname{th}(Al) / \left[ A \operatorname{th}(Al + A' \times \right. \\ \left. \times \frac{A' \operatorname{sh}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{ch}(A'l')}{A' \operatorname{ch}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{sh}(A'l')} \right]; \quad (7.22)$$

$$\varphi_{1x} = \operatorname{ch}(A_x) / \operatorname{ch}(Al) \quad (\text{влияние теплопроводности}); \quad (7.23)$$

$$\varphi_w = k/\alpha_i = (t_m - t_w)/(t_m - t_a) \quad (\text{влияние температуры стенки}); \quad (7.24)$$

$$\varphi_{St} = \alpha_{St}/(\alpha_k + \alpha_{St}); \quad \varphi'_{St} = \alpha'_{St}/(\alpha'_k + \alpha'_{St}) \quad (\text{влияние излучения}). \quad (7.25)$$

Величины  $A$  и  $A'$  получают из уравнения (7.8).

В приведенных выше уравнениях величины со штрихами относятся к выступающим деталям защитной арматуры термометра. В уравнении (7.21) величина  $\varphi_k$  характеризует влияние выступающих деталей. В уравнении (7.22) величина  $A \operatorname{th}(Al)$  характеризует влияние датчика, а величина  $K/\lambda F$  — влияние головки. Уравнение (7.23) выражает влияние теплопроводности [сравнить с уравнением (7.7)]. В случае необходимости следует использовать уравнения (7.11), (7.13) или (7.14), если датчик температуры сосредоточен у дна защитного чехла или если его эффективная длина равна  $x$  или  $l$ . Уравнение (7.24) выражает влияние стенки чехла, а уравнение (7.25) — влияние излучения.

Для расчета изменения температуры частично выступающих деталей защитной арматуры необходимо дополнительно учитывать радиальный поток тепла в стенку трубопровода  $\Phi_b$  (см. рис. 7.1), если температура стенки трубопровода  $t_r$  не равна температуре фланца  $t_w$ . Это влияние можно учесть, если принять поток тепла  $\Phi_b$  пропорциональным разности температур  $t_w$  и  $t_r$  и ввести (рассчитанный или измеренный) коэффициент  $W$  термической связи со стенкой трубопровода (Вт/К) в расчет для определения точки перегиба. Вместо значения  $\varphi_k$  [уравнение (7.21)] получается выражение  $\varphi_k W$ , в котором величина  $W/\lambda F$  отражает влияние теплового контакта:

$$\varphi_k W = \\ = \frac{\varphi_f \varphi_{St} A \operatorname{th}(Al) + [1 - \varphi_{St} (1 - \varphi_w)] A' \frac{A' \operatorname{sh}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{ch}(A'l')}{A' \operatorname{ch}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{sh}(A'l')} + \varphi_w \frac{W}{\lambda F}}{A \operatorname{th}(Al) + A' \frac{A' \operatorname{sh}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{ch}(A'l')}{A' \operatorname{ch}(A'l') + (K/\lambda F) \operatorname{sh}(A'l')} + \frac{W}{\lambda F}}. \quad (7.26)$$

Если влиянием радиального теплового потока для защитных чехлов, встроенных с наличием тепловой связи, можно пренебречь, то уравнение (7.26) переходит в уравнение (7.21). При  $K = 0$  и  $W = \infty$  температура  $t_r$  становится равной температуре  $t_w$  и получают выражение для защитной арматуры без выступающих деталей [уравнение (7.6)].

Для встроенных в трубопровод с тепловым контактом защитных чехлов с выступающей верхней частью без головки диаметр которой может отличаться

от диаметра защитного чехла, можно определить температуру фланца  $t_w$  в месте встройки термометра в трубопровод и, следовательно, распределение температуры даже без опытных замеров или упрощенных расчетов, если известны размеры и основные тепловые параметры [7.14]. Для того чтобы иметь возможность определить температуру  $t_w$  в месте встройки термометра (фланца защитного чехла), необходимо, чтобы тепловой поток  $\Phi_2$  от дна защитного чехла по его длине  $l$  к фланцу (см. рис. 7.1), был равен сумме тепловых потоков от фланца в трубопровод  $\Phi_5$  и в выступающую часть защитной арматуры термометра  $\Phi_6$ . Тепловой поток  $\Phi_2$  у фланца термометра может быть рассчитан по уравнению для распределения температуры по длине защитного чехла (7.6)

$$\frac{t_m - t_x}{t_m - t_w} = \varphi_x.$$

Тепловой поток  $\Phi_5$  у фланца защитного чехла получают из теплового баланса для стенки трубопровода. Пусть на расстоянии  $r$  от защитного чехла термометра (см. рис. 7.1) имеется тепловой поток  $\Phi_5$  через радиальный элемент трубопровода и, кроме того, тепловой поток  $d\Phi_{8,1}$  к элементу трубопровода от измеряемой среды. В точке  $r + dr$  тепловой поток складывается из суммы тепловых потоков  $\Phi_{5r} + d\Phi_{5r}$  и из теплового потока  $d\Phi_{8,2}$  от радиального элемента  $dr$  в окружающую среду. При равновесии имеет место равенство

$$\frac{\Phi_{5r}}{d\Phi_{8,1}} = \Phi_{5r} + d\Phi_{5r} + d\Phi_{8,2}.$$

Из применяемого в этом случае дифференциального уравнения Бесселя находят распределение температуры вдоль стенки чехла и по нему тепловой поток при  $r = 0$  у фланца защитного чехла. Аналогичным образом получают распределение температуры в выступающей части защитной арматуры по ее длине  $l'$  в зависимости от  $t_w$  и от температуры окружающей среды  $t_a$  по тепловому балансу кольцевого элемента  $dx'$  в функции  $x'$  (см. рис. 7.5). Этим определяется также тепловой поток  $\Phi_6$  (см. рис. 7.1). Поскольку у фланца защитного чехла  $\Phi_{2w} = \Phi_{5w} + \Phi_{6w}$ , то путем подстановки рассчитанных значений тепловых потоков получают температуру фланца  $t_w$ . Расчет изменения температуры по всей длине выступающей части защитной арматуры обычно не требуется.

#### 7.1.1.5. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ СПОСОБА МОНТАЖА, ПО ЗАКОНУ СУПЕРПОЗИЦИИ

Настоящие расчеты погрешности измерения, зависящей от способа монтажа, могли быть выполнены только при введении упрощающих предположений для цилиндрических защитных чехлов. Для определения влияния головки термометра на погрешность необходимо провести экспериментальные исследования. Кроме того, для того, чтобы учесть влияние выступающих частей защитной арматуры и дна защитного чехла, необходимо выполнить громоздкие расчеты. Нельзя также всегда с достаточной точностью определить в каждом случае условия измерения. Однако полученные теоретическим путем зависимости дают ценные рекомендации относительно целесообразной конструкции и места установки термометров. Для того чтобы ориентировочно оценить место установки термометра, достаточно определить его в соответствии с законом суперпозиции [уравнение (7.6)].

По заданным размерам защитного чехла и значению теплопроводности материала  $\lambda_t$ , а также по коэффициентам теплопередачи  $\alpha_h$  и  $\alpha_{st}$  рассчитываются величина  $A$  по уравнению (7.8) и величина  $\Phi_2$  по уравнению (7.9). Значение  $\lambda_t$  следует взять из справочных таблиц Штальбайзен 472—50. Для металлических защитных чехлов  $\lambda_t = 11 \div 350$  Вт/(м·К); для огнеупорного кирпича  $\lambda_t = 0,09 \div 1,8$  Вт/(м·К); для теплоизоляционных материалов трубопроводов  $\lambda_t = 0,03 \div 0,12$  Вт/(м·К). Коэффициенты теплопередачи для газов, паров и жидко-

стей приведены в учебниках и справочниках по теплопередаче [7.1—7.4]. Ориентировочные данные относительно коэффициентов конвективной теплопередачи  $\alpha_k$  при турбулентном потоке приведены в табл. 7.3. Для расчета коэффициентов теплопередачи от трубопровода в окружающую среду  $\alpha_a$  необходимо учитывать  $\alpha_k$  и  $\alpha_{St}$  (рис. 7.6).

Внутри трубопровода при температурах до 500°С влияние излучения на теплопередачу тем меньше, чем меньше температура стенки трубы  $t_r$ , отличается от температуры измеряемой среды  $t_m$ . Однако при температурах свыше 500°С необходимо учитывать влияние излучения, которое сильно возрастает при повышении температуры. Если в отдельных случаях отсутствуют численные значения

коэффициента теплопередачи излучением  $\alpha_{St}$ , их можно при некоторых обстоятельствах определить по временной зависимости, такой как переходная функция термометра (см. 7.3.3.2).

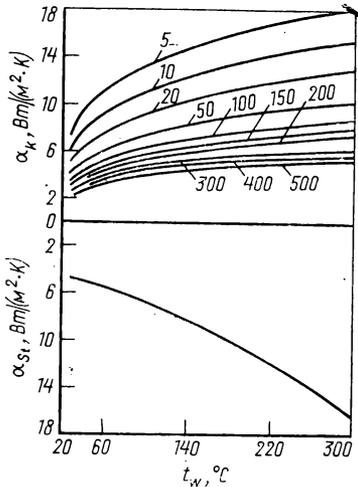


Рис. 7.6. Коэффициенты теплоотдачи трубопроводов различных диаметров, мм, в спокойном воздухе при температуре  $t_a = 20^\circ\text{C}$

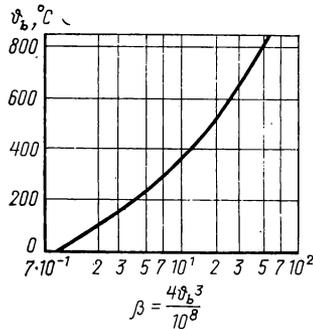


Рис. 7.7. Определение  $\beta = 4\phi_b^3/10^8$  по температуре  $\phi_b$  для получения  $\alpha_{St}$  по  $\beta$  и  $C$

При теплопередаче исключительно излучением значение  $\alpha_{St}$  получают из уравнения (7.3). Для целей расчета это уравнение преобразуют в нужную форму и при  $T = T_1$  и  $T_w = T_2$  получают

$$\alpha_{St} = \frac{C [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]}{t_1 - t_2} = C\alpha_s = C \frac{T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3}{10^8} = C \frac{4T_b^3}{10^8} = C\beta_s, \quad (7.27)$$

где  $\alpha_s$  — температурный коэффициент по ДИН 5496;  $\beta_s$  — температурный коэффициент при  $T_1 \approx T_2$ ;  $T_b$  — относительная температура, получаемая по  $T_1$  и  $T_2 = T_w$ , которая при расчете  $\alpha_{St}$  должна была бы выбираться различной в связи с падением температуры вдоль защитного чехла. Однако практически для защитного чехла, обтекаемого в поперечном направлении, можно принимать среднее значение, которое получается по центру тяжести площади между линиями  $t$  и  $t_w$  (см. рис. 7.2) и равно

$$T_b = 0,4T_1 + 0,6T_w. \quad (7.28)$$

Для расчета влияния излучения  $\alpha_{StB}$  дна следует подставлять в качестве  $T_b$  температуру дна  $T_B$ . Значение  $\beta$  в зависимости от  $\phi_b$  можно взять из рис. 7.7 или из табл. 7.3, а. При умножении на коэффициент излучения  $C$  материала защитного чехла (табл. 7.4) получают  $\alpha_{St} = C\beta_s$  для температуры  $\phi_b$ .

Таблица 7.3

**Коэффициенты теплопередачи  $\alpha$** 

Коэффициент конвективной теплопередачи  $\alpha_k$  при турбулентном потоке, Вт/(м<sup>2</sup>·К) (ориентировочные значения, рассчитанные по работам [7.4, 7.35])

1.  $\alpha_k$  в трубах

а. Для воздуха:  $\alpha_{k20}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ , при внутренних диаметрах трубы  $d_i$  0,1 и 0,4 м; при  $d_i/L = 0,02$  (из этого можно определить длину трубы  $L$ ), скорости течения  $v$  от 1 до 50 м/с и давлении  $p$  от 1 до 100 бар.

p, бар	v, м/с						v, м/с					
	1	2	5	10	20	50	1	2	5	10	20	50
	$d_i = 0,1 \text{ м}$						$d_i = 0,4 \text{ м}$					
1	5,8	9,5	20	35	60	128	4,3	7,3	15	29	44	93
2	11	18	38	70	110	220	8	13	27	50	82	175
5	20	35	77	128	215	430	15	26	53	95	160	335
10	35	60	130	210	370	740	25	45	90	166	280	560
20	60	107	220	380	640	1400	44	77	165	280	480	1050
50	130	230	475	800	1320	—	100	165	370	580	1100	—
100	245	420	870	—	—	—	185	315	650	—	—	—

Примечание. Для более высоких температур эти значения  $\alpha_{k20}$  следует умножить на коэффициент  $c_t$  согласно таблице

t, °C	$c_t$ при давлении p, бар	
	1—20	100
100	0,85	0,83
200	0,75	0,65
300	0,67	0,56

б. Для воды:  $\alpha_{k20}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ , при внутренних диаметрах трубы  $d_i$  от 0,01 до 0,3 м, при  $d_i/L = 0,03$ , скорости течения  $v = 0,1 \div 4$  м/с,  $\alpha_k$  практически не зависит от давления p.

v, м/с	$d_i, \text{ м}$			
	0,3	0,1	0,03	0,01
0,1	370	490	580	760
0,2	640	810	1 050	1 400
0,4	1160	1400	1 750	2 300
1	2300	2900	3 700	4 900
4	7500	8700	11 000	15 700

Примечание. Для более высоких температур эти значения  $\alpha_{k20}$  следует умножить на коэффициент  $c_t$ :

t, °C	60	100	200
$c_t$	1,50	1,98	2,40

в. Для получения данных для других газов и жидкостей необходимо значения  $\alpha_k$  для потоков воздуха и воды в трубах умножить на соответствующие коэффициенты, зависящие от  $t$  по данным [7.4] или [7.35a], например:

Дымовые газы (200° С)	1,07
Перегретый водяной пар (200° С)	1,44
Пары бензола (200° С)	1,35
Бензол жидкий (20° С)	0,312
Масло вязкотекучее (20° С)	0,058
Масло жидкотекучее (20° С)	0,104

2.  $\alpha_k$  для труб (защитных чехлов), обтекаемых в поперечном направлении.

а. Для воздуха: при внешнем диаметре трубы  $d_a = 10$  мм, скорости течения  $v$  в пределах от 0,5 до 20 м/с, давлении  $p$  от 1 до 100 бар  $\alpha_k$  в диапазоне температур 10—100° С приближенно не зависит от температуры  $t$ .

p, бар	v, м/с						
	0,5	1	2	3	5	10	20
1	23,5	33,6	46	56	72	108	153
2	31	44,7	61	74,5	96	144	203
5	51	73	100	122	156	234	333
10	70,5	100	138	168	216	324	459
20	115	164	224	273	351	527	747
50	223	320	437	532	683	1025	1454
100	350	500	690	840	1080	1620	2295

Примечания: 1. Для более высоких температур эти значения  $\alpha_k$  следует умножить на коэффициент  $c_t$ :

Давление p, бар	$c_t$ при температуре, °С		
	200	300	1000
1	1	1	1
2	0,98	0,94	0,89
5	0,97	0,92	0,87
10	0,95	0,90	0,85
20	0,93	0,88	0,82
50	0,90	0,84	0,78
100	0,88	0,81	0,75

2. Для других диаметров трубы  $d_a$  значения  $\alpha_k$  необходимо умножить на коэффициент  $c_d$ :

$d_a$ , мм	1	2	5	10	15	20
$c_d$	3,5	2,4	1,3	1	0,85	0,76

При измерениях в воздухе необходимо, кроме  $\alpha_k$ , учитывать также коэффициент теплопередачи излучением  $\alpha_{St}$ . Таким образом,

$$\alpha_{Gesamt} = \alpha_k + \alpha_{St} = \alpha_k + C\alpha_s$$

Здесь  $C$  — постоянная излучения термометра или защитного чехла (см. табл. 7.4);  $\alpha_s$  — температурный коэффициент (ДИН 5496) в соответствии с формулой

$$\alpha_s = \left| \frac{(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4}{T_1 - T_2} \right|,$$

где  $T_1$  — температура термометра;  $T_2$  — температура стены.

Если температура воздуха примерно равна температуре стенки и если имеют место лишь небольшие разности температур  $T_1 - T_2$  (например, при регулировании), то можно определять  $\alpha_{st}$  по уравнению (7.27) из  $C\beta_s$  в зависимости от температуры  $T_1 \approx T_2$ . Значения  $\beta_s$  для различных значений температуры  $\vartheta$  находят по кривой рис. 7.7 или из следующих данных:

$\vartheta, ^\circ\text{C}$ . . . . .	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\beta_s$ . . . . .	0,82	2,05	4,2	7,6	12,2	18,3	26,3	37	49	65	83

б. Для воды:  $\alpha_{k20}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ , при скорости течения  $v$  от 0,1 до 5 м/с, для диаметров трубы  $d_a$  от 1 до 20 мм практически не зависит от давления  $p$ .

$d_a, \text{мм}$	$v, \text{м/с}$							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	5
1	6410	9160	10 900	12 800	14 200	21 500	33 400	64 100
2	4280	6120	7 280	8 580	9 500	14 400	22 300	42 800
3	3370	4820	5 730	6 750	7 470	11 300	17 600	33 700
5	2550	3645	4 340	5 110	5 660	8 570	13 300	25 500
10	1820	2604	3 100	3 645	4 040	6 120	9 500	18 200
20	1275	1825	2 170	2 550	2 830	4 280	6 650	12 700

Пр и м е ч а н и е. Для более высоких температур  $t$  значения  $\alpha_k$  следует умножить на коэффициент  $c_t$ :

$t, ^\circ\text{C}$ . . . . .	60	100	150	200	300
$c_t$ . . . . .	1,06	1,25	1,45	1,50	1,37

в. При косо обтекаемых защитных чехлах  $\alpha_k$  уменьшается в воздухе и воде. Например, при угле набегания  $\varphi = 45^\circ$   $\alpha_k$  необходимо умножить на коэффициент  $c_\varphi = 0,80$ .

г. Значения  $\alpha_k$  для других газов и жидкостей при косо обтекаемых чехлах могут быть приближенно получены по значениям  $\alpha_k$ , приведенным для воды и воздуха, путем умножения на коэффициенты, указанные в п. 1, в.

д. Для термометров, имеющих защитные покрытия, влияние на теплопередачу может быть ориентировочно оценено по толщине покрытия и его теплопроводности. По диаграмме можно определить поправочный коэффициент  $K_c$ , на который следует умножить коэффициент теплопередачи для термометров без защитного покрытия, с тем чтобы получить значение действительного коэффициента теплопередачи. Однако оценка влияния различных отложений, например в результате коррозии, этим способом сопряжена с большими погрешностями [7.35а].

Таблица 7.4

Суммарная излучательная способность  $\epsilon$  и постоянная излучения  $C$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) [ $C = C_s \epsilon$ ;  $C_s$  — постоянная излучения абсолютно черного тела, равная 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)]

Материал	$\epsilon$	$C$
Металлы, легированные стали, полированные . . . . .	0,04—0,07	0,23—0,4
Алюминиевый лист, необработанный . . . . .	0,07	0,4
Лист из малоуглеродистой стали, никелированный, матовый . . . . .	0,55	0,65
Лагунь, матовая . . . . .	0,22	1,3
Стальной лист, обработанный наждаком . . . . .	0,25	1,4
Свинец, никель, окисленные . . . . .	0,29	1,6
Стальной лист, покрытый окалиной . . . . .	0,65	3,7
Сталь малоуглеродистая, медь, окисленные . . . . .	0,7—0,84	4—4,8
Керамические материалы, эмалированная сталь	0,9—0,96	5,1—5,5

Для определения  $t_b$  по уравнению (7.28), а также  $\varphi$  по уравнению (7.6) необходимо знать также температуру стенки трубопровода  $t_r = t_w$  для полностью погруженных термометров. Эта температура для чехлов без внешней тепловой защиты (см. рис. 7.2) [7.1, 7.2] получается равной

$$t_r = \frac{\alpha_i t_m + \alpha_a t_a}{\alpha_i + \alpha_a}, \quad (7.29)$$

где  $\alpha_i$  и  $\alpha_a$  — коэффициенты теплопередачи внутри и снаружи трубопровода.

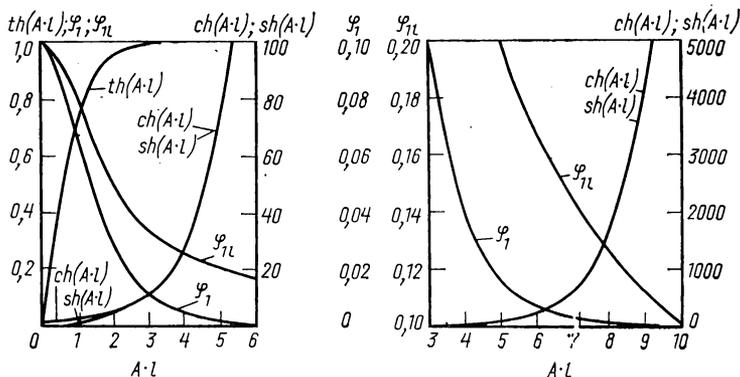


Рис. 7.8. Вспомогательные графики для определения погрешностей измерения вследствие теплопроводности  $\varphi$

Для труб диаметром  $D$  с тепловой защитой диаметром  $D_a$  и теплопроводностью  $\lambda_r = \lambda_w$  в уравнении (7.29) взамен  $\alpha_a$  следует подставить  $\alpha'_a$ :

$$\alpha'_a = 1 / \left( \frac{D}{\alpha_a D_a} + \frac{D}{2\lambda_w} \ln \frac{D_a}{D} \right). \quad (7.30)$$

После того как вычислено значение  $A$  по уравнению (7.8) и по длине защитного чехла  $l$  значение  $A \cdot l$ , получают по рис. 7.8 значение  $\varphi_1$  [уравнение (7.11)]. При помощи  $\alpha_k$  и  $\alpha_{St}$  определяют  $\varphi_2$  по уравнению (7.9).

На рис. 7.8 нанесены также функции для  $\varphi_{li}$  по уравнению (7.14) и значения  $\text{sh}(A \cdot l)$ ,  $\text{ch}(A \cdot l)$  и  $\text{th}(A \cdot l)$ , при помощи которых могут быть вычислены значения  $\varphi$  по уравнениям (7.15), (7.22) и (7.26).

По уравнениям для погрешности измерения температуры полностью погруженного защитного чехла можно при известной температуре измеряемой среды вычислить величину погрешности  $t - t_m$ . Если же, напротив, необходимо по измеренной температуре, например  $t_i$ , определить температуру измеряемой среды  $t_m$ , то следует применить метод последовательного приближения. Дело в том, что от искомой температуры  $t_m$  зависит температура стенки трубы  $t_r$ , а от нее в свою очередь коэффициенты теплопередачи  $\alpha_i$  и  $\alpha_a$ . Коэффициент теплопередачи защитного чехла также зависит от искомой температуры  $t_m$ . Однако метод последовательного приближения в данном случае дает быстро сходящиеся результаты, так что  $t_m$  может быть определена через небольшое число циклов вычисления.

## 7.1.2. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ СПОСОБА МОНТАЖА, В ЛЮБЫХ СРЕДАХ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕРМОМЕТРА

### 7.1.2.1. ПАРАМЕТР ТЕРМОМЕТРА $V_T$ КАК МЕРА ПОГРЕШНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕЙ

Расчеты погрешности измерения в результате теплопроводности проводили на основе законов теплопередачи при упрощающих предположениях прежде всего относительно конструкции термометра и его армировки. Простое и достаточно надежное определение погрешности, зависящей от способа монтажа, в любых средах для любых термометров при использовании этого метода едва ли возможно. Однако погрешности измерения, обусловленные теплопередачей в любых измеряемых объектах, т. е. прежде всего погрешности, зависящие от способа монтажа, и динамические погрешности, обусловливаемые временными характеристиками (запаздывание показаний), можно определить простым способом, если экспериментальным путем определить погрешности для данного термометра в двух эталонных средах. Для этой цели наиболее пригодны определения погрешности в воздухе и воде, так как коэффициенты теплопередачи в этих средах известны с достаточной точностью (см. табл. 7.3). По этим данным можно определить параметр термометра  $V_T$ , который является характерным для погрешности измерения данного термометра вследствие теплопередачи. При помощи этого параметра можно определить все погрешности измерения, которые могут возникнуть в любых средах в результате теплопередачи, т. е. даже такие погрешности, которые экспериментальным путем невозможно или сложно определить [7.15].

### 7.1.2.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРА $V_T$ И КАЖУЩЕГОСЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ $\alpha''_{xs}$

Термометр с защитным чехлом (гильзой, кожухом) или без него большей частью выполнен из нескольких материалов различной теплопроводности и теплоемкости с воздушными прослойками большей или меньшей величины. Незвестные величины коэффициентов теплопередачи внутри данного термометра можно объединить в один «внутренний коэффициент теплопередачи»  $k_i$ . По этой величине и наружному коэффициенту теплопередачи  $\alpha_x$  можно получить в соответствии с законами теплопередачи «кажущийся коэффициент теплопередачи»  $\alpha_{xs}$  согласно выражению

$$1/\alpha_{xs} = 1/\alpha_x + 1/k_i. \quad (7.31)$$

Коэффициент  $k_i$  имеет для данного термометра постоянное значение, которое зависит от его конструкции, включая арматуру. Если  $\alpha_x$  представляет собой коэф-

коэффициент теплопередачи в любой среде  $x$ ,  $\alpha_l$  — известный постоянный коэффициент теплопередачи в эталонной среде  $l$  (например, воздух при температуре  $20^\circ\text{C}$  при скорости течения 3 м/с), а  $\alpha_c$  — еще один произвольно выбираемый коэффициент теплопередачи, то в соответствии с уравнением (7.31) имеем

$$1/k_i = 1/\alpha_{xs} - 1/\alpha_x = 1/\alpha_{cs} - 1/\alpha_c = 1/\alpha_{ls} - 1/\alpha_l. \quad (7.32)$$

Из этого следует

$$1/\alpha_{xs} = 1/\alpha_x + 1/\alpha_{cs} - 1/\alpha_c \quad \text{и} \quad 1/\alpha_{cs} = 1/\alpha_c + 1/\alpha_{ls} - 1/\alpha_l. \quad (7.33)$$

Теперь взамен  $\alpha_x$ ,  $\alpha_l$  и  $\alpha_c$  введем отнесенные к  $\alpha_l$  относительные коэффициенты теплопередачи  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_l$ ,  $\alpha'_c = \alpha_c/\alpha_l$  и  $\alpha'_l = \alpha_l/\alpha_l = 1$  и, кроме того,

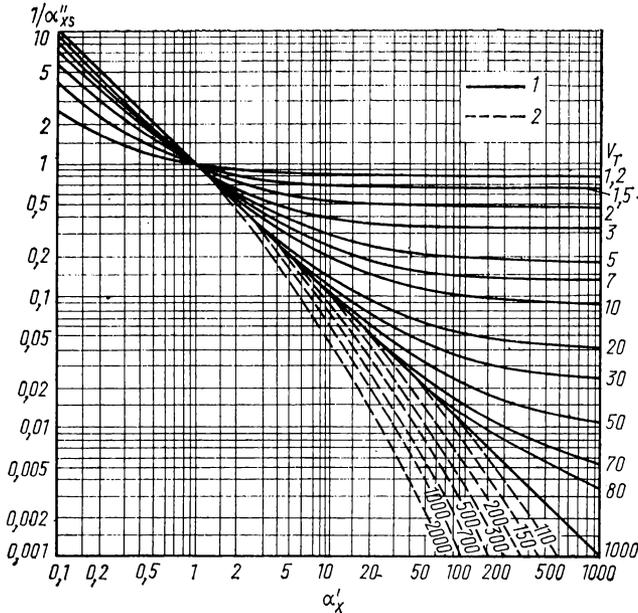


Рис. 7.9. Зависимость между кажущимся относительным коэффициентом теплоотдачи  $1/\alpha''_{xs}$  и относительным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_l$  при изменяющемся параметре  $V_T$  термометров:

1 — с усредняющим действием; 2 — поверхностного действия

кажущиеся коэффициенты теплопередачи  $\alpha_{xs}$  и  $\alpha_{cs}$  к  $\alpha_{ls}$ , обозначая их  $\alpha''_{xs} = \alpha_{xs}/\alpha_{ls}$  и  $\alpha''_{cs} = \alpha_{cs}/\alpha_{ls}$ . При помощи уравнения (7.33) путем преобразований получаем общую зависимость между относительными коэффициентами теплопередачи  $\alpha'_x$  и  $\alpha'_c$ , а также кажущиеся относительные коэффициенты теплопередачи  $\alpha''_{xs}$  и  $\alpha''_{cs}$ . Если обозначить  $\alpha''_{cs}$  через  $V_T$ , то получим

$$\frac{1}{\alpha''_{xs}} = \frac{1}{V_T(1 - 1/\alpha'_c)} \left( \frac{V_T - 1}{\alpha'_x} + 1 - \frac{V_T}{\alpha'_c} \right). \quad (7.34)$$

Как и  $\alpha_c$ , коэффициент  $\alpha'_c$  должен иметь постоянное значение и для удобства принимается равным 100. Тогда в соответствии с уравнением (7.32)  $\alpha''_{cs} = V_T$  зависит только от  $k_l$ , т. е. от конструкции термометра. Поэтому  $V_T$  является параметром

термометра, характеризующим его по условиям теплопередачи. При  $\alpha_c = 100$  уравнение (7.34) упрощается и принимает вид

$$\frac{1}{\alpha''_{xs}} = \frac{1}{0,99V_T} \left( \frac{V_T - 1}{\alpha'_x} + 1 - 0,01V_T \right). \quad (7.35)$$

Параметр  $V_T$  можно вычислить, если для любой эталонной среды (целесообразно для воды при  $20^\circ\text{C}$  и скорости течения  $0,3\text{ м/с}$ ) известны  $\alpha'_w$  и  $\alpha''_{ws}$ . Тогда из уравнения (7.35) для  $V_T$  получается

$$V_T = \frac{\alpha'_w - 1}{\alpha'_w (0,01 + 0,99/\alpha''_{ws}) - 1}. \quad (7.36)$$

На рис. 7.9 представлены зависимости между относительными коэффициентами теплопередачи  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_1$  и обратными значениями кажущихся коэффициентов теплопередачи  $1/\alpha''_{xs}$  и коэффициентом  $V_T$  в качестве параметра. Эти зависимости справедливы для всех материалов и размеров термометров.

К таким же результатам можно прийти путем анализа закономерностей изменения температуры в середине однородного цилиндрического тела после скачкообразного изменения температуры измеряемого объекта (термометр с усредняющим действием). Если датчик температуры находится на поверхности термометра (термометр с поверхностным действием), то получают представленные на рис. 7.9 штриховыми кривыми зависимости при скачкообразном изменении температуры. Для таких термометров  $V_T > 100$  (более подробно см. 7.3.3.2).

### 7.1.2.3. ПАРАМЕТР ТЕРМОМЕТРА $K_T$ КАК МЕРА ПОГРЕШНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ОТВОДОМ ТЕПЛА

Для определения величины погрешности, обусловленной отводом тепла, для любых объектов этого же рода погрешности должны быть известны для двух эталонных сред. Чтобы по ним получить относительные кажущиеся коэффициенты теплопередачи, в уравнениях (7.11) и (7.8) все величины, которые определяются только конструкцией термометра, объединяют в еще один параметр термометра  $K_T$ . С кажущимся относительным коэффициентом теплопередачи  $\alpha''_{xs}$  погрешность измерения в измеряемой среде  $x$  получится равной

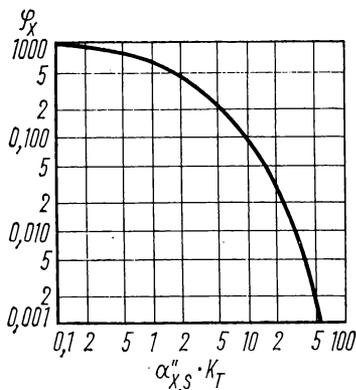


Рис. 7.10. Зависимость между погрешностью измерения вследствие теплопроводности  $\varphi_x$  и  $\alpha''_{xs}K$

$$\varphi_{1x} = \frac{1}{\text{ch} \sqrt{\alpha''_{xs} K_T}} \quad \text{или} \quad f(\varphi_{1x}) = \alpha''_{xs} K_T. \quad (7.37)$$

Эта зависимость представлена на рис. 7.10. В воздухе

$$f(\varphi_{1l}) = \alpha''_{ls} K_T = K_T, \quad (7.38)$$

так как  $\alpha''_{ls} = \alpha_{ls} = 1$ . Из отношения уравнений (7.38) и (7.39) получаем величину  $K/K$ .  $\alpha''_{xs}$  — кажущийся относительный ко-

эффициент теплопередачи  $1/\alpha''_{xs}$ . Таким образом, имеется зависимость между погрешностями измерения, зависящими от способа монтажа,  $\varphi_{1x}$  и относительными коэффициентами теплопередачи  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_1$  в соответствии с рис. 7.10. Ход расчета погрешности в любых средах дан в табл. 7.5, а пример расчета приведен на с. 259.

Т а б л и ц а 7.5

Ход расчета времени переходного процесса, погрешности нагрева и погрешности теплопроводности (способа монтажа).  
 2. Определение влияния теплопередачи на точность измерения температуры любых газов и жидкостей

Шаг расчета	Расчет времени переходного процесса ( $t_{\eta}$ )	Расчет погрешности нагрева ( $E$ ), К	Расчет погрешности теплопроводности (способа монтажа) ( $\varphi$ )
А. Определение параметра $V_T$			
1. Определение $\alpha'_{\omega}$	$\alpha'_{\omega} = \alpha_{\omega} / \alpha_l$	$\alpha'_{\omega} = \alpha_{\omega} / \alpha_l$	$\alpha'_{\omega} = \alpha_{\omega} / \alpha_l$
2. Экспериментальное определение $t_{\eta}$ , $E$ или $\varphi$ :			
а) в воздухе	$t_l$	$E_l$	$\varphi_l$
б) в воде	$t_{\omega}$	$E_{\omega}$	$\varphi_{\omega}$
3. Определение $1/\alpha''_{\omega s}$	$t_{\omega} / t_l = 1/\alpha''_{\omega s}$	$E_{\omega} / E_l = 1/\alpha''_{\omega s}$	а) определить из рис. 7.10 при $\varphi_l : \alpha''_{l s} K_T = K_T$
			б) определить из рис. 7.10 при $\varphi_{\omega} : \alpha''_{\omega s} K_T$
4. Из рис. 7.9 определить величину $V_T$ в точке пересечения координат $\alpha'$ (из А.1) и $1/\alpha''_{\omega s}$ (из А.3)	$V_T \eta$	$V_T E$	в) частное из а и б дает $K_T / \alpha''_{\omega s} K_T = 1/\alpha''_{\omega s}$
			$V_T \varphi$

Шаг расчета	Расчет времени переходного процесса ( $t_{\eta}$ )	Расчет погрешности нагрева ( $E$ ), К	Расчет погрешности теплопроводности (способа монтажа) ( $\Phi$ )
Б. Определение $t_{\eta}$ , $E$ или $\Phi$ в среде $x$			
1. Определение $\alpha'_x$	$\alpha'_x = \alpha_x / \alpha_l$	$\alpha'_x = \alpha_x / \alpha_l$	$\alpha'_x = \alpha_x / \alpha_l$
2. Результаты замера в воздухе (из А.2а)	$t_l$	$E_l$	$\Phi_l$
3. Из рис. 7.9 определить величину $V_T$ (А.4) по значению $\alpha'_x$ (Б.1)	$(1/\alpha''_{xs})$	$(1/\alpha''_{xs})E$	$(1/\alpha''_{xs})\Phi$
4. По результату замера в воздухе (Б.2) и из $1/\alpha''_{xs}$ (Б.3) получают результат для среды $x$	$t_x = t_l (1/\alpha''_{xs})$	$E_x = E_l (1/\alpha''_{xs})$	<p>а) <math>K_T</math> из А.3.а</p> <p>б) частное из Б.4.а и Б.3 дает</p> $K_T / (1/\alpha''_{xs}) = \alpha''_{xs} K_T$ <p>в) определять из рис. 7.10 при <math>\alpha''_{xs} K_T</math> (Б.4б) величину <math>\Phi_x</math></p>

П р и м е ч а н и я: 1. Выражения  $1/\alpha''$  и  $V_T$  для ясности снабжены индексами  $\eta$ ,  $E$  или  $\Phi$ . 2. Приняты следующие обозначения:  $t$  — время переходного процесса;  $s$ ;  $\eta$  — индекс переходного значения;  $V_T$  — параметр термометра для теплопередачи;  $K_T$  — параметр термометра для теплопроводности;  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### 7.1.2.4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ $V_T$ И $K_T$

В соответствии с расчетами погрешности измерения, обусловленные способом монтажа, должны быть тем меньше, чем больше параметр  $V_T$  и чем меньше погрешность  $\Phi_{ix}$  (рис. 7.11, кривые I, II и III). При небольшом значении параметра  $V_T$  и большой величине погрешности  $\Phi_x$  кривые с увеличением коэффициента теплопередачи  $\alpha_x$  проходят все более полого, так как в этом случае погрешность измерения определяется главным образом теплопроводящими свойствами термометра. Этот ход кривых подтвержден экспериментальными исследованиями термометров различных видов (см. рис. 7.11 [7.15]). Лишь при небольших диаметрах термометров, например у измерительных вставок термоэлектрических термометров, используемых без защитного чехла, а также у кабельных термопар и термопар трубчатой конструкции погрешность измерения при увеличении теплопередачи все уменьшается, так что ход кривых I и II при  $V_T = 100$  все больше сближается. Однако у большинства термометров, смонтированных в защитных чехлах, погрешность измерения, зависящая от способа монтажа, стремится к предельному значению, ниже которого она не может опуститься. В трубопроводах высокого давления, в которых необходимо учитывать коэффициенты теплопередачи  $\alpha_x > \alpha_w$ , эта погрешность измерения армированных термометров примерно равна погрешности измерения температуры воды.

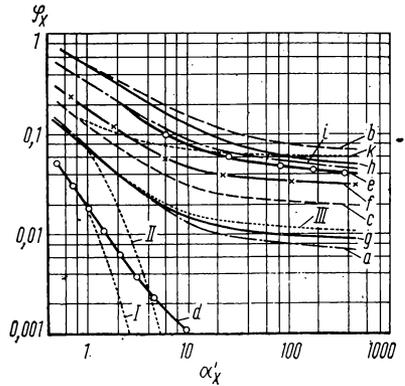


Рис. 7.11. Зависимость погрешностей, определяемых способом монтажа термометра  $\Phi_x$ , от относительного коэффициента теплоотдачи  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_t$ :

*a* — измерительная вставка термометра сопротивления, диаметр 8 мм; *b* — измерительная вставка термометра сопротивления в защитном чехле без шейки, диаметр 14 мм; *в* — измерительная вставка термометра сопротивления в защитном чехле с шейкой, диаметр 14 мм; *d* — измерительная вставка термопары, диаметр 8 мм; *e*, *f* — измерительная вставка термопары в защитном чехле с шейкой, диаметр 14 мм, номинальная длина 160 или 250 мм; *g* — жидкостный манометрический термометр, длина 120 мм; *h*, *i*, *k* — жидкостные манометрические термометры в защитных чехлах из алюминия, из алюминия с ребрами, из стали.  
 Вычисленные погрешности измерения для: I —  $\Phi_I = 0,02$  и  $V_T = 100$ ; II —  $\Phi_{II} = 0,075$  и  $V_T = 100$ ; III —  $\Phi_{III} = 0,075$  и  $V_T = 2,5$

*Примеры расчета для определения времени переходного процесса  $t_{\eta}$  и погрешности теплопроводности (способа монтажа)  $\Phi$  в соответствии с табл. 7.5*

Измерительная вставка термоэлектрического термометра во ввинчиваемой защитной гильзе (ДИН 43763, форма С, диаметр 11 мм), установленной с тепловым контактом в нетеплоизолированный трубопровод.

I. Определение времени переходного процесса  $t_{\eta}$ .

Измеряемая среда — воздух, температура  $\vartheta_m = 200^\circ \text{C}$ , давление 50 бар, скорость течения 10 м/с.

A.1.  $\alpha_t$  (эталонный воздух  $20^\circ \text{C}$ ;  $\vartheta = 1$  м/с) по табл. 7.3; 2.а: 33,6 Вт/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ );  $\alpha_w$  (эталонная вода  $20^\circ \text{C}$ ;  $v = 0,2$  м/с) по табл. 7.3; 2б: 2604 Вт/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),

$$\alpha'_w = \alpha_w/\alpha_t = 77,5.$$

	$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	
2. а) $t_I =$	114 с	360 с	
б) $t_w =$	7,5 с	30 с	(определено экспериментально)

3.  $t_w/t_l = 1/\alpha''_{ws}$     0,066                    0,083  
 4. Из рис. 7.9 или уравнения (7.36) при  $\alpha'_w$  (из А.1) и  $1/\alpha''_{ws}$  (из А.3) имеем  
 $V_T =$             16                    12,3

- Б.1.  $\alpha_x = 923$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) по табл. 7.3; 2а  $\alpha'_x = \alpha_x/\alpha_l = 923/33,6 = 27,5$   
 2.  $t_l$  см. А.2.а.  
 3. При  $\alpha'_x$  и  $V_T$  из А.4 из рис. 7.9 или уравнения (7.35) имеем

$$1/\alpha''_{xs} \quad 0,09 \quad 0,11$$

4. При  $1/\alpha''_{xs}$  из Б.3 и  $t_l$  из А.2.а имеем:  
 $t_x = t_l 1/\alpha''_{xs} =$     10,3                    39,5

II. Определение погрешности теплопроводности (способа монтажа)  $\varphi_x$ .  
 Измеряемая среда — воздух, давление 1 бар, скорость течения 5 м/с. Показываемая температура  $\vartheta_1 = 200^\circ\text{C}$ . Искомыми являются  $\vartheta_w = \vartheta_r$ ,  $\varphi_x$  и  $\varphi_m$ , а также  $\vartheta_1 - \vartheta_m$ .

$$\left. \begin{array}{l} \text{А.1. } \alpha_l \text{ (эталонный воздух } 20^\circ\text{C,} \\ v = 1 \text{ м/с) } = 33,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К).} \\ \alpha_w \text{ (эталонная вода } 20^\circ\text{C,} \\ v = 0,2 \text{ м/с) } = 2604 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \end{array} \right\} \text{ (из табл. 7.3; 2а)}$$

$$\alpha'_w = \alpha_w/\alpha_l = 77,5.$$

$$\left. \begin{array}{l} 2. \text{ а) } \varphi_l = 0,33 \\ \text{ б) } \varphi_w = 0,05 \end{array} \right\} \text{ (определено экспериментально)}$$

3. а) при  $\varphi_l$  из рис. 7.10 имеем  $K_T = 3,2$ ;  
 б) при  $\varphi_w$  из рис. 7.10 имеем  $\alpha''_{ws} \cdot K_T = 13,3$ ;  
 в) частное из 3а и 3б дает  $1/\alpha''_{ws} = 0,24$ .

4. Из рис. 7.9 или уравнения (7.36) при  $\alpha'_w = 77,5$  и  $1/\alpha''_{ws} = 0,24$  получаем параметр термометра  $V_T = 4,4$ .

Б. а. Первое приближение для определения  $\varphi_x$ :

$$1. \alpha_x = 72 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \text{ (табл. 7.3; 2а); } \alpha'_x = \alpha_x/\alpha_l = 72/33,6 = 2,14.$$

$$2. \varphi_l = 0,33.$$

3. При  $\alpha'_x$  и  $V_T = 4,4$  из рис. 7.9 или уравнения (7.35) имеем  $1/\alpha''_{xs} = 0,59$ .

$$4. \text{ а) } K_T = 3,2 \text{ из А.3а;}$$

$$\text{ б) частное из 4а и 3 дает } \alpha''_{xs} K_T = 5,42;$$

$$\text{ в) по } \alpha''_{xs} K_T \text{ из рис. 7.10 имеем } \varphi_1 = 0,185.$$

5. Определение погрешности излучения  $\varphi_2$ :  $\vartheta_a = 20^\circ\text{C}$  и  $\vartheta_m = \vartheta_1 = 200^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_a = 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  (см. рис. 7.6 при  $d > 500$  мм)  $\alpha_i = 15 \cdot 0,75 = 11,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  (табл. 7.2; 1а). Из уравнения (7.29) имеем  $\vartheta_w = 153^\circ\text{C}$ . Из уравнения (7.28) получим  $\vartheta_b = 172^\circ\text{C}$ . Из рис. 7.7 или табл. 7.3а получаем  $\beta_s = 3,50$ . При  $C = 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$  получаем по уравнению (7.27)  $\alpha_{St} = 3,50 \cdot 4 = 14 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и таким образом  $\varphi_2 = \alpha_{St}/(\alpha_x + \alpha_{St}) = 14,0/(72 + 14) = 0,163$ . Тогда  $\varphi_x = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2 = 0,185 + 0,163 - 0,030 = 0,318$ . Из  $\varphi_x = (\vartheta_1 - \vartheta_m)/(\vartheta_w - \vartheta_m)$  получаем  $\vartheta_m = 222^\circ\text{C}$  и  $\vartheta_1 - \vartheta_m = -22 \text{ К}$ .

Б. б. Итерация

При тех же численных значениях, как в Б.а; 1—4в снова получаем  $\varphi_1 = 0,185$ .

5. Погрешность излучения  $\varphi_2$ . При  $\vartheta_m = 222^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_a = 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и  $\alpha_i = 15 \cdot 0,72 = 10,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  из уравнения (7.29) имеем  $\vartheta_w = 167,4^\circ\text{C}$ . Используя уравнение (7.28), получим  $\vartheta_b = 189^\circ\text{C}$ ,  $\beta_s = 3,95$ , а при  $C = 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$  получим  $\alpha_{St} = 15,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и таким образом  $\varphi_2 = 15,8/(72 + 15,8) = 0,180$ . Тогда

$\varphi_x = 0,185 + 0,180 - 0,033 = 0,332$ . Как и в Б.а.5, при  $\vartheta_1 = 200^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_w = 167,4^\circ\text{C}$  и  $\varphi_x = 0,332$  температура измеряемого объекта составит  $\vartheta_m = 216^\circ\text{C}$ , а погрешность измерений  $\vartheta_1 - \vartheta_m = -16\text{K}$ .

Приняты следующие обозначения для индексов:

$l$  — эталонная среда воздух;  $w$  — эталонная среда вода или же фланец (место встройки) термометра;  $m$  — измеряемая среда (объект);  $r$  — трубопровод;  $s$  — кажущееся значение;  $\alpha'$  — относительное значение, отнесенное к значению для воздуха;  $\alpha''$  — относительное кажущееся значение, отнесенное к кажущемуся значению для воздуха;  $k$  — кондуктивная теплопроводность;  $St$  — излучение;  $x$  — для искомого значения времени переходного процесса  $t_{\eta}$ , погрешности нагрева  $E$ , погрешности теплопроводности  $\varphi$  или коэффициента теплопередачи  $\alpha$  в измеряемом объекте;  $1$  — для температуры у дна термометра;  $2$  — для погрешности излучения;  $i$  — внутри;  $a$  — снаружи.

### 7.1.2.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ СПОСОБА МОНТАЖА, В ВОЗДУХЕ И ВОДЕ, А ТАКЖЕ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Экспериментальное определение погрешности измерения, зависящей от способа монтажа, в эталонных средах (воде и воздухе) целесообразно проводить в обогреваемой снаружи до  $90^\circ\text{C}$  трубе со встроенным термометром. Через трубу пропускают воздух или воду при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Поскольку величины коэффициентов теплопередачи для воздуха и воды в широких пределах почти не зависят от температуры, полученные таким образом значения  $\varphi$  используют путем обратного пересчета для определения погрешности измерения в газах, парах и жидкостях [7.15].

В теплоизолированных трубопроводах обычно в связи с относительно малыми разностями температур стенки трубы и газа можно пренебречь влиянием излучения. При больших разностях температур в газах и парах низкого давления необходимо учитывать влияние излучения при определении  $\varphi_x$ , для чего вместо  $\alpha'_x$  подставляют величину  $(\alpha_k + \alpha_{St})/\alpha_l$ . Необходимо также оценивать величину погрешности излучения  $\varphi_2 = \alpha_{St}/(\alpha_k + \alpha_{St})$  согласно уравнению (7.9) с учетом температуры стенки трубы и измеренной температуры. Коэффициент теплопередачи излучением  $\alpha_{St}$  находят для температуры  $\vartheta_b$  по уравнению (7.27) из рис. 7.7 с учетом значения постоянной излучения  $C$  материала защитного чехла (см. табл. 7.4).

При помощи параметров термометра  $V_T$  и  $K_T$  можно определить также погрешность способа монтажа и таким образом температуру измеряемой среды  $\vartheta_m$  на основании показаний температуры встроенного термометра  $\vartheta_1$  в условиях эксплуатации с достаточной точностью и простым способом. При этом необходимо определить температуру у фланца термометра  $\vartheta_w$ , например при помощи контактного термометра. По этим значениям для  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_w$  при найденных параметрах определяют погрешность измерения  $\varphi_x$ .

Погрешность способа монтажа термометра с эффективной длиной датчика  $a$  или  $l$  в любых средах может быть определена по аналогии с погрешностью термопары с рабочим спаем у дна защитного чехла. Для этого необходимо на основе уравнений (7.13), (7.14) и (7.20) составить зависимости, аналогичные рис. 7.10. Поскольку при экспериментальном определении  $\varphi_1$  и  $\varphi_w$  эти влияния в основном учитываются, так же как и влияния выступающих деталей арматуры термометра, определение погрешности по рис. 7.10 дает достаточно хорошие результаты.

При всех определениях погрешностей теплопроводности, особенно при расчетах согласно 7.1.1, следует принимать во внимание разброс получаемых при этом значений до 25% и более, так как:

- 1) на основу всех выводов для расчета погрешности теплопроводности положены упрощенные зависимости;
- 2) влияние теплопередачи, а также влияние, обусловленное конструкцией термометра, не всегда могут быть оценены с достаточной точностью.

### 7.1.3. ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБА МОНТАЖА ТЕРМОМЕТРОВ

Из закономерностей влияния теплопередачи на погрешность измерения, обусловленную теплопроводностью (способом монтажа), вытекают требования, которые необходимо учитывать при разработке конструкции и способа монтажа термометров.

1. Температура стенки трубы  $t_r$ , а также места встройки термометра (температура фланца)  $t_w$  должны быть по возможности равны температуре измеряемой среды  $t_m$ . Для достижения этой цели необходимо:

- а) теплоизолировать трубопровод и фланец термометра;
- б) максимально снизить тепловой поток от фланца защитного чехла термометра к стенке трубопровода при помощи изолирующих прокладок;
- в) по возможности поднять температуру фланца до температуры измеряемой среды путем обогрева фланца защитного чехла в месте его встройки в трубопровод.

Эти мероприятия необходимо учитывать прежде всего в тех случаях, когда измеряемой средой является воздух или газ с давлением в одну или несколько атмосфер.

2. Длину защитного чехла термометра (глубину его погружения) не следует выбирать слишком большой с учетом механической нагрузки. Это касается прежде всего защитных чехлов, встроенных в установках высокого давления, в которых необходимо обеспечивать очень хорошую теплопередачу.

3. Поскольку погрешность измерения при увеличении глубины погружения стремится к некоторому предельному значению, если теплопередача осуществляется как путем теплопроводности, так и путем излучения в средах, пропускающих излучение, то в таких измеряемых средах глубина погружения или длина защитного чехла может выбираться тем меньше, чем меньше отношение теплопередачи излучением к теплопередаче конвекцией на поверхности дна термометра по сравнению с таким же отношением на остальной его поверхности ( $C_B/\alpha_{KB} \ll C/\alpha_K$ ). По этой причине термометр должен по возможности обтекаться измеряемой средой в продольном направлении.

4. Влияние диаметра защитного чехла  $d$ , а также толщины стенки  $\delta$  площади поперечного сечения защитного чехла со встроенным термометром и теплопроводность материалов зависит от отношения между теплопередачей излучением и теплопроводностью на площади дна к такому же отношению на остальной поверхности термометра:

а) если это отношение меньше 1, как было принято в п. 3, то погрешность измерения становится тем меньше, чем меньше теплопроводность материала. Поэтому следует предпочитать легированные стали никелю, меди, алюминию или латуни. Однако, поскольку теплопередача к датчику температуры должна быть по возможности большой, защитные чехлы выполняют из двух материалов различной теплопроводности. Металлом с высокой теплопроводностью окружают датчик температуры, а остальная часть термометра армируется металлом с меньшей теплопроводностью. Кроме того, погрешность становится тем меньше, чем меньше диаметр защитного чехла  $d$ . Эти предпосылки в отношении указанного соотношения большей частью выполняются. Однако целесообразно, как указано в п. 3, обеспечивать обтекание термометра в продольном направлении с тем, чтобы это отношение было как можно меньше. Тогда и погрешность, обусловленная излучением, становится минимальной;

б) при одинаковом отношении  $C/\alpha_K$  между площадью дна и площадью остальной поверхности защитного чехла погрешность измерения не зависит от его диаметра и толщины стенки, а также от теплопроводности материала защитного чехла;

в) если указанное отношение больше 1, то погрешность измерения при уменьшении теплопроводности материала и толщины стенки защитного чехла становится даже больше, однако при увеличении диаметра она уменьшается. Минимальная достижимая погрешность измерения остается также больше, чем та, которая вызывается только одним излучением. Такие условия измерения встречаются

редко и могут быть исключены при продольном обтекании термометра измеряемой средой.

5. Поскольку коэффициент  $\alpha_k$  при уменьшающемся диаметре  $d$  увеличивается, этот диаметр должен быть по возможности небольшим во всех случаях, даже при измерениях в средах, не пропускающих излучение (таких как жидкости).

6. По этой же причине термометр должен устанавливаться в точке с наибольшей скоростью течения измеряемой среды. Благодаря этому не только улучшается теплопередача, но при пропускающих излучение средах этим оказывается такое влияние на отношение  $C/\alpha_k$  между площадью поверхности дна и остальной площадью поверхности защитного чехла термометра согласно п. 3 и 4.а, при котором погрешность вследствие теплопроводности и излучения становится минимальной.

7. Теплопередача конвекцией  $\alpha_k$  также увеличивается за счет искусственного повышения скорости течения измеряемой среды.

8. Погрешность измерения может быть уменьшена за счет увеличивающих поверхность термометра ребер, повышающих коэффициент теплопередачи ( $\alpha_k$ ). Однако при этом тепловой поток к датчику температуры такого термометра не должен становиться меньше вследствие увеличения его массы.

9. Погрешность при пропускающих излучение средах уменьшается при уменьшении постоянной излучения  $C$  термометра. Поэтому необходимо применять материалы с небольшими постоянными излучения (см. табл. 7.4). Излучательная способность может быть уменьшена за счет нанесения на поверхность термометра хорошо отражающего излучения металлического слоя, например из золота, серебра или родия (применяется для стеклянных термометров). Путем применения однократной или многократной защиты от излучения снижается также погрешность излучения [уравнение (7.19)]. Однако термометры с защитой от излучения следует устанавливать так, чтобы было исключено их прямое облучение сторонними источниками.

10. Поскольку при уменьшении диаметра защитного чехла термометра теплопередача конвекцией увеличивается, у тонкой проволоки влияние излучения с ее относительно небольшой поверхности становится пренебрежимо малым. Поэтому термопарами с тонкими термоэлектродами можно достаточно точно измерять температуру без защиты от излучения, даже если вблизи находятся теплоизлучающие среды с другой температурой.

11. Чем меньше диаметр термометра, тем меньше становится погрешность измерения вследствие увеличения теплопередачи конвекцией и излучением. Однако погрешность измерения при этом стремится к некоторому предельному значению, тем большему, чем больше диаметр термометра (см. рис. 7.11).

12. Тепловой поток через выступающие детали арматуры, такие как шейка и головка электрического термометра, должен быть снижен настолько, насколько это возможно. Погрешность измерения становится тем меньше, чем меньше теплопередающая поверхность этих деталей, т. е. чем меньше диаметр шейки (и толщина ее стенки), а также размер головки термометра. Шейка и головка термометра должны быть (насколько это возможно) хорошо теплоизолированы. Если температура стенки трубопровода  $t_r$  выше, чем температура места встройки термометра  $t_w$ , как это обычно бывает при измерениях температуры топочных газов, при которых защитный чехол пропускают через огнеупорную кладку, погрешность способа монтажа становится меньше погрешности, которая получается, если при прочих равных условиях  $t_r \ll t_w$  (как это обычно имеет место при установке термометров в металлических трубопроводах).

13. Поскольку вдоль защитного чехла в направлении к месту встройки термометра имеется температурный градиент ( $t_w \leq t$ ), где  $t$  — измеренная температура, датчик температуры должен находиться по возможности ближе ко дну защитного чехла, а его длина должна быть минимальной. Чем больше длина датчика температуры, тем больше должна быть глубина погружения термометра в измеряемую среду.

14. Необходимая длина защитного чехла термометра в значительной мере зависит от интенсивности теплообмена, зависящей в свою очередь от характеристик измеряемой среды. В жидкостях и паре высокого давления с очень хорошей

теплопередачей глубина погружения или длина защитного чехла термометра должна примерно в 1,5 раза превышать активную длину датчика температуры; в газах нормального давления — в два раза, т. е. составлять минимум 6—8 диаметров защитного чехла.

15. Теплопередача от защитного чехла к датчику температуры должна быть как можно лучше. В связи с этим термоэлектродные проволоки термопар припаивают ко дну защитного чехла (трубчатые термопары) или ко дну измерительной вставки. Особенно важно, чтобы измерительные вставки пригонялись к защитным чехлам или гильзам с небольшим зазором и были в хорошем тепловом контакте с дном защитного чехла. Измерительные вставки с этой целью прижимают к чистому не окисленному дну защитного чехла при помощи пружин. Этот тепловой контакт можно улучшить, если дно измерительной вставки снабдить коническим острием, которое вдавливается в соответствующее коническое углубление в дне защитного чехла.

У термометров с большой длиной датчика пространство между датчиком и защитным чехлом заполняется наполнителями, такими как масло или олово, или же датчик плотно заворачивается в металлическую сетку и в таком виде вводится в защитный чехол. Наполнители не должны испаряться или пригорать. Они должны покрывать только датчик температуры, так как иначе погрешность измерения в результате увеличения теплоотдачи от датчика к головке термометра увеличится.

Необходимо также следить за тем, чтобы над датчиком температуры не происходило циркуляции воздуха, так как вследствие этого также увеличится тепловой поток в направлении к головке термометра. В некоторых случаях пространство между термоэлектродными проволоками термопары и защитным чехлом должно быть заполнено асбестом. Кроме того, необходимо уплотнять защитный чехол у головки термометра. Так, при температуре 250°С и открытого у головки термометра защитного чехла с термопарой получилась погрешность измерения температуры порядка 20—30 К; при закрытом чехле эта погрешность снизилась до 15 К, а при заполнении защитного чехла асбестом она составила лишь 5 К [7.16].

## 7.2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

### 7.2.1. РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ПОГРЕШНОСТИ

При измерении температуры поверхности [7.17—7.21] размещение термометра не должно оказывать влияния на тепловой поток, который передается с поверхности измеряемого объекта в окружающую среду в результате конвекции и излучения. Поэтому от термометра должен выходить в окружающую среду такой же тепловой поток, как и от поверхности измеряемого объекта. Кроме того, теплопередача от поверхности объекта измерения к датчику температуры должна быть очень хорошей, с тем чтобы в точке измерения не происходило перегрева. Даже очень небольшие воздушные зазоры между кажущимися гладкими поверхностями датчика температуры и объекта оказывают в связи с низкой теплопроводностью воздуха отрицательное влияние на теплопередачу. В то же время вполне возможно пренебречь теплопередачей конвекцией и излучением в воздушных зазорах. Следует учитывать тепловое сопротивление воздушного зазора  $R_L$ , примерно равное  $3500d/F$  К/Вт при величине зазора  $100-0,1$  мкм (здесь  $d$  и  $F$  — соответственно величина воздушного зазора и площадь поверхности контактирования). (Тепловое сопротивление  $R = 1/G$ , где  $G$  — коэффициент теплопроводности. Размерность величины  $R$ :  $1 \text{ ч} \cdot \text{К}/\text{кал} = 0,86 \text{ К}/\text{Вт}$ .)

При расположении согласно рис. 7.12, когда термопара на длине  $l$  заложена в паз, тепловой поток вдоль оси  $x$  равен  $\Phi = -F dt/dx$ . От объекта измерения к термопаре направлен тепловой поток

$$\Phi_0 = (\vartheta_m - \vartheta_0)/R_m, \quad (7.39)$$

где  $\vartheta_m$  — температура объекта (температура его поверхности), а  $\vartheta_0$  — измеренная температура. Величина  $R_M$  представляет собой тепловое сопротивление между объектом измерения и рабочим спаем термопары. Кроме того, тепло течет вдоль паза для укладки термопары от объекта измерения к термоэлектродным проволокам термопары. От конца паза ( $x = l$ ) тепловой поток идет дальше по расположенным снаружи термоэлектродным проволокам и передается в окружающую среду с температурой  $\vartheta_a$ . Если обозначить радиальные тепловые сопротивления между измеряемым объектом и термоэлектродными проволоками термопары в пазу через  $R_1$ , а между термоэлектродами термопары и окружающей средой через  $R_2$ , то из условий теплового равновесия получим для отрезков термоэлектродных проводов термопары 1 и 2 (см. рис. 7.12) следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{1}{p_1^2} \cdot \frac{d^2 \vartheta_1}{dx^2} + (\vartheta_m - \vartheta_1) = 0 \quad \text{и}$$

$$\frac{1}{p_2^2} \cdot \frac{d^2 \vartheta_2}{dx^2} - (\vartheta_2 - \vartheta_a) = 0, \quad (7.40)$$

где  $p^2 = 1/(\lambda FR)$ ;  $F$  — общая площадь поперечного сечения термопары. В качестве решения в точке расположения рабочего спае термопары ( $x = 0$ ) получаем разность температур  $\vartheta_m - \vartheta_0$ , отнесенную к разности температуры измеряемого объекта  $\vartheta_m$  и температуры окружающей среды  $\vartheta_a$ , при большом значении  $R_M$  как относительную погрешность измерения температуры:

$$\varphi_0 = \frac{\vartheta_m - \vartheta_0}{\vartheta_m - \vartheta_a} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{R_2/R_1} \operatorname{sh}(p_1 l) + \operatorname{ch}(p_1 l)}. \quad (7.41)$$

При этом принимается, что тепло от измеряемого объекта переходит в основном по длине паза  $l$  к термоэлектродам термопары, так что  $R_M > R_1$ . Кроме того, предполагается, что температура объекта по длине паза везде одинакова, несмотря на отвод тепла [7.18]. Для такого предположения необходимо, чтобы длина паза была в любом случае достаточной и вычислена соответственно вполне надежно. Далее предполагается, что паз с термопарой находится на одной изотерме, т. е. что по всей длине паза тепловое сопротивление  $R_1$  также имеет одинаковое значение. Это предположение выполняется при измерениях температуры металлической поверхности тем лучше, чем меньше теплопроводность изоляции термопары по сравнению с теплопроводностью материала объекта измерения. Напротив, при измерении температуры поверхности изоляционных материалов вследствие того, что вдоль паза и в радиальном по отношению к нему направлении устанавливается большой перепад температур, тепловой поток от места расположения рабочего спае термопары к концу паза увеличивается и, следовательно, увеличивается также и погрешность измерения.

Тепловое сопротивление  $R_M$  между рабочим спаем термопары и измеряемым материалом необходимо учитывать тогда, когда путем припайивания или зачеканивания обеспечивается более или менее хороший тепловой контакт между рабочим спаем и измеряемым материалом. Кроме того, температура измеряемого материала или его поверхности может изменяться по длине паза. С учетом этих условий можно рассчитать распределение температуры по длине паза и таким образом определить относительную погрешность измерения по уравнению (7.41). При этом получают, как и при точных расчетах погрешности измерения температуры в газах и жидкостях с учетом всех возникающих потоков тепла [уравнение

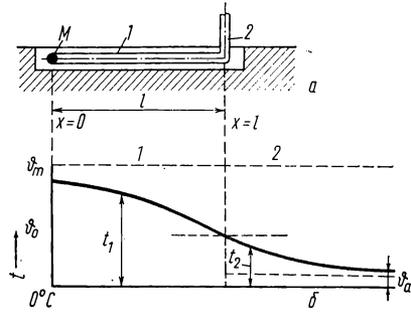


Рис. 7.12. Измерение температуры поверхности зачеканенной термопарой:

*a* — схема размещения термопары; *b* — распределение температуры вдоль термопары; *M* — рабочий спай; *l* — длина заделки; 1 — участок термопары, параллельный поверхности объекта; 2 — участок термопары, перпендикулярный поверхности объекта

(7.26)], громоздкие выражения, которые здесь не приводятся [7.22]. Полученные таким образом зависимости справедливы также для расчета погрешности измерения при измерении температуры внутри твердого тела, если термометры вставлены в отверстия с более или менее хорошей тепловой изоляцией.

При этих расчетах следует также ожидать более или менее сильного разброса по сравнению с действительными температурами поверхности, однако из выведенных зависимостей можно получить указания относительно мероприятий, которые нужно выполнить для успешного проведения таких измерений.

## 7.2.2. ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Из исследований хорошо проводящих тепло материалов известно, что погрешность измерения  $\varphi_0$  для термоэлектродной проволоки термопар диаметром 1 мм составляет 3%, а для проволоки диаметром 0,1 мм — около 1%, если припаянные к поверхности измеряемого объекта термоэлектродные проволоки термопары выведены перпендикулярно к этой поверхности (рис. 7.13, а). Если проволоки термопары только прижимаются к поверхности объекта, то погрешность может быть значительно больше в связи с неизбежными воздушными прослойками и неровностями поверхности.

Если рабочий спай термопары приклеивается к поверхности металла, а термоэлектроды термопары наклеиваются вдоль одной изотермы (см. рис. 7.13, б), то погрешность может достигать значений согласно рис. 7.14 (кривые а и б). При

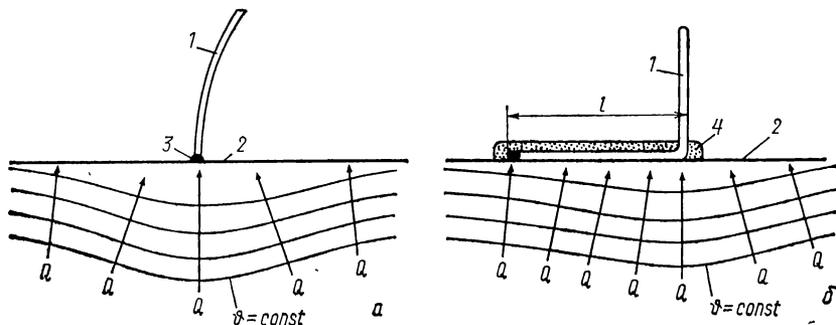


Рис. 7.13. Ход изотерм для приклеенных и припаянных термопар:

а — термоэлектродные проволоки термопары выведены перпендикулярно поверхности; б — термоэлектродные проволоки термопары приклеены на длине  $l$  вдоль поверхности объекта; 1 — термопара; 2 — поверхность объекта; 3 — клей или припой; 4 — клей

увеличению площади склеивания погрешность измерения быстро достигает предельного значения. Если термоэлектроды термопары вложить в паз и заклеить их там (см. рис. 7.12), то необходимая длина закладывания становится меньше, чем при наклеивании. Особенно эффективно погрешность измерения уменьшается, когда рабочий спай термопары припаявается к поверхности металла или в соответствии с рис. 7.15 зачеканивается цилиндрическим штифтом в неглубокое отверстие, высверленное в измеряемом теле (см. рис. 7.14, кривая с). Даже при коротком пазе в этом случае получаются погрешности измерения, составляющие менее 1%. Погрешности измерения у железо-константановых и никельхром-никелевых термопар в связи с их худшей теплопроводностью обычно меньше, чем у медь-константановых термопар. При измерении температуры поверхности плохо проводящих тепло тел погрешности измерения при одинаковой длине приклеивания или пазы оказываются относительно большими (см. рис. 7.14, кри-

вая *d*). Для того чтобы получить такую же погрешность измерения, как и при измерении на металлических поверхностях, длина паза должна быть примерно в два раза больше [7.18—7.20].

При кратковременных измерениях температуры поверхности металлических труб термопары прикрепляют липкой лентой или же термоэлектроды термопары при измерениях на трубах небольшого диаметра несколько раз обворачивают

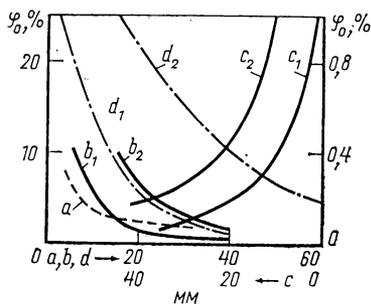


Рис. 7.14. Зависимость погрешности измерения температуры поверхности  $\varphi_0$  от длины  $l$  наклеенных или зачеканенных термоэлектродных проволок термопары:

	<i>a</i>	<i>b</i>
Термопара	Cu—CuNi	Cu—CuNi
Диаметр термоэлектродной проволоки, мм	0,3	0,3 ( <i>b</i> <sub>1</sub> ); 1 ( <i>b</i> <sub>2</sub> )
Способ заделки:		
рабочего спая	П	П
термоэлектродной проволоки	П	З
$t_m, ^\circ\text{C}$	90	70
$t_a, ^\circ\text{C}$	25	25
Объект для заделки термопары	Медь	Медь
	<i>c</i>	<i>d</i>
Термопара	Fe—CuNi ( <i>C</i> <sub>1</sub> ) Cu—CuNi ( <i>C</i> <sub>2</sub> )	Cu—CuNi
Диаметр термоэлектродной проволоки, мм	0,2 ( <i>C</i> <sub>1</sub> ); 0,3 ( <i>C</i> <sub>2</sub> )	0,3 ( <i>d</i> <sub>1</sub> ); 1 ( <i>d</i> <sub>2</sub> )
Способ заделки:		
рабочего спая	Зч	П
термоэлектродной проволоки	Пр	—
$t_m, ^\circ\text{C}$	70	70
$t_a, ^\circ\text{C}$	25	25,3
Объект для заделки термопары	Медь	Твердый картон

Примечание. П — приклеен к поверхности; З — заложен в паз; Зч — зачеканен; Пр — приклеен на длине  $l$ .

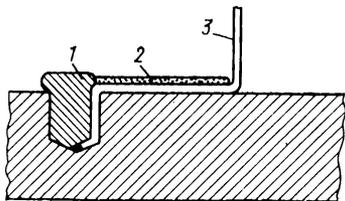


Рис. 7.15. Устройство зачеканенной термопары с наклеенными термоэлектродными проволоками:  
1 — штифт; 2 — клей; 3 — термопара

вокруг трубы. Погрешность измерения при таких измерениях может быть уменьшена, если к рабочему спаю термопары припаивается тонкая металлическая пластинка. Последняя приклеивается к поверхности объекта измерения или крепится вместе с термоэлектродами термопары увязочной проволокой.

При измерениях температуры плохо проводящих тепло поверхностей также целесообразно увеличивать площадь контакта рабочего спаю термопары с объек-

том с тем, чтобы сделать небольшим отвод тепла, вызывающий снижение температуры. Поскольку таким образом измеряется средняя температура некоторой площади поверхности объекта, пластинка не должна быть слишком большой. Кроме того, излучательная способность поверхности пластинки должна быть такой же, как и поверхности измеряемого объекта, для того, чтобы в результате различного обмена энергии с окружающей средой путем излучения не возникло дополнительной погрешности измерения. Часто оказывается достаточным применить какое-либо покрытие или окисление пластинки. Погрешность измерения при таких кратковременных замерах можно также существенно снизить, если поместить пластинку в неглубокое высверленное в теле объекта отверстие, заполненное сравнительно хорошо проводящим тепло маслом.

Если необходимо одним и тем же поверхностным термометром измерять температуру поверхности различных тел путем прикладывания или прижатия рабочего спая, то получают различные погрешности измерения, которые у не слишком тонких тел зависят в основном от их теплопроводности, если не учитывать возможность появления больших погрешностей при очень шероховатых поверхностях. При толщине измеряемого тела свыше 2 мм можно оценивать погрешность измерения по формуле

$$f = \vartheta_0 - \vartheta_m = -c (\vartheta_0 - \vartheta_a), \quad (7.42)$$

где  $\vartheta_0$  — измеренная температура;  $\vartheta_m$  — температура поверхности объекта;  $\vartheta_a$  — температура окружающей среды. Для одного и того же термометра коэффициент  $c$  изменяется прежде всего в зависимости от теплопроводности материала измеряемого объекта. Он может быть определен эмпирическим путем на основе сравнительных измерений на образце из того же материала. При этом действительную температуру образца определяют при помощи упоминавшегося выше метода [7.20].

Аналогичным образом, как и при помощи термопар, могут быть выполнены измерения температуры поверхности при помощи термометров сопротивления, особенно при помощи полупроводниковых термометров в связи с их небольшими размерами. При этом необходимо выполнять те же мероприятия, что и при измерениях при помощи термопар.

Для измерения температуры поверхности несколько большей площади пригодны гибкие измерительные датчики со спирально намотанными проводами высокого сопротивления из платины или никеля, которые наклеиваются на поверхность объекта измерения аналогично тензоэлектрическим датчикам. Для измерения температуры поверхности применяют также полосу из стекловолокна и проволоку высокого сопротивления или же напыленные на изолирующие поверхности, а также на анодированные алюминиевые поверхности чувствительные к изменению температуры сопротивления или термопары толщиной в несколько микрон преимущественно из никеля, хрома, золота и их сплавов. При помощи таких пленочных термометров получают весьма небольшое время установления показаний, составляющее всего лишь миллисекунды [7.23—7.24] (см. также 8.4).

### 7.2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПУТЕМ НАГРЕВА АРМАТУРЫ ТЕРМОМЕТРА

Чтобы в значительной мере исключить погрешность измерения вследствие плохой или недостаточной теплопередачи, можно применить метод нагрева арматуры термометра. Для этого термометр помещают в оболочку, которую нагревают до температуры поверхностной термопары. Оболочка должна быть выполнена из хорошо теплопроводящего материала, характеризующегося низкой теплоемкостью, с тем, чтобы она могла быстро следовать за изменениями температуры. Этот способ применяется в видеоизмененной форме при бесконтактном измерении температуры, например, вращающихся валков при помощи конвективных термометров. Часто для бесконтактного измерения температуры поверхности применяют также пирометры излучения [7.25] (см. также рис. 8.37).

## 7.3. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОМЕТРОВ

### 7.3.1. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ НА ОСНОВАНИИ ЗАКОНОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Погрешности измерения температуры, вызываемые теплопередачей, проявляются не только в том, что измеренная температура может отличаться от действительной температуры объекта измерения вследствие нарушения теплообмена в месте измерения. При изменении температуры поверхности различных объектов возникает, кроме того, динамическая погрешность, которая заключается в том,

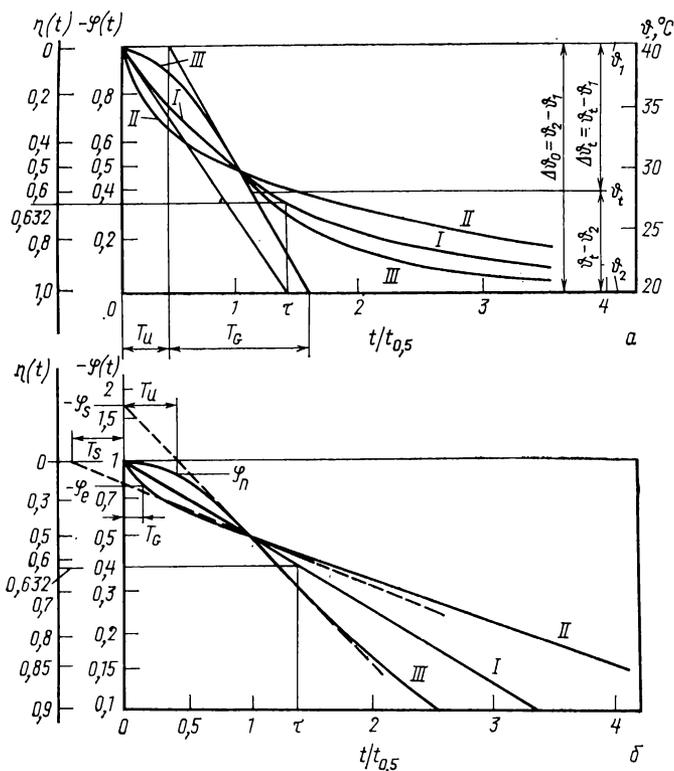


Рис. 7.16. Изображение в линейных (а) и полулогарифмических (б) координатах переходных функций термометров  $t$ , отнесенных ко времени выхода на половинное установившееся значение  $t_{0,5}$  по экспоненциальному закону (I), по тому же закону с опережением (II) и с запаздыванием (III). При этом время переходного процесса  $t/t_{0,5}$  при протекании процесса по закону I составляет 1,3; по закону II 1,53; по закону III 1,17;

$a - \tau$  — постоянная времени;  $T_U$  — время запаздывания;  $T_G$  — время выравнивания;  $T_S$  — время опережения;  $\vartheta_2 - \vartheta_1$  — высота скачка ( $20 - 40^\circ \text{C} = -20 \text{ K}$ );  $\vartheta_t$  — температура в момент времени  $t$  ( $28^\circ \text{C}$ );  $\eta_t \approx [(28 - 40)/(-20)] = 0,6$ ;  $\varphi_t = (28 - 20)/(-20) = -0,4$ ;  $T_U/t_{0,5} = 0,46$ ;  $T_G/t_{0,5} = 1,56 - 0,46 = 1,10$ ;  $b - T_U/t_{0,5} = 0,42$ ;  $T_S/t_{0,5} = 0,46$ ;  $T_G/t_{0,5} = 1,10$ ; погрешность запаздывания  $\varphi_n = -0,90$ , погрешность опережения  $\varphi_S = -1,62$ ; погрешность выравнивания  $\varphi_e = -0,80$

что показываемая термометром температура вследствие изменения теплового потока от измеряемой среды к датчику лишь с запаздыванием следует за изменением температуры измеряемой среды. Только в момент времени, когда температура измеряемого объекта достигает некоторого установившегося значения, вызываемая переходным процессом погрешность с большей или меньшей скоростью уменьшается до нуля.

Временная характеристика термометра зависит как от конструкции и свойств материала термометра и его защитной арматуры, так и от условий теплопередачи. Она описывается переходным процессом после скачкообразного изменения температуры измеряемой среды с  $\vartheta_2$  до  $\vartheta_1$  (рис. 7.16 ДИН 16160, лист 1). Время, прошедшее от начала скачка температуры, называется временем переходного процесса  $t$ . Изменение температуры, показываемое в момент времени  $t$  и отнесенное к величине скачка  $\Delta\vartheta$ , называется переходной функцией  $\eta(t)$ :

$$\eta(t) = (\vartheta_t - \vartheta_1) / (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \Delta\vartheta_t / \Delta\vartheta_0. \quad (7.43)$$

Динамическая погрешность  $\varphi$  в момент времени  $t$ , отнесенная к величине скачка, равна

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= (\vartheta_t - \vartheta_2) / (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \eta(t) - 1; \\ -\varphi(t) &= (\vartheta_2 - \vartheta_t) / (\vartheta_2 - \vartheta_1) = 1 - \eta(t). \end{aligned} \quad (7.44)$$

Дискретные значения переходной функции  $\eta(t)$  в переходное время  $t$  обозначаются как переходные значения  $t, \eta$ .

Если термометр можно рассматривать в качестве однородного тела, теплопередача определяется размерами термометра, его теплопроводностью, плотностью и удельной теплоемкостью, а также коэффициентом теплопередачи. Однако обычно термометры с защитным чехлом или без него состоят из нескольких слоев различных материалов с более или менее значительными воздушными прослойками. Для таких термометров можно найти эквивалентную теплопроводность, которая характерна для данного термометра. Тогда по законам теплопередачи переходная функция любого термометра не отличается от переходной функции однородного тела с такой же теплопроводностью [7.26].

### 7.3.1.1. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ

В простейшем случае, а именно когда отношение  $hX = (\alpha/\lambda) X \ll 0,16$  ( $h = \alpha/\lambda$  называется относительным переходным коэффициентом;  $X$  — радиус), переходная функция является экспоненциальной. Поэтому для данного термометра с радиусом  $X$  цилиндра теплопроводность  $\lambda$  велика по сравнению с коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ . Тогда

$$1 - \eta(t) = e^{-t/\tau} = (\vartheta_2 - \vartheta_t) / (\vartheta_2 - \vartheta_1) = -\varphi(t), \quad (7.45)$$

где  $\tau$  — постоянная времени. При экспоненциальной переходной функции эта величина является временем достижения переходного значения  $\eta = 1 - 1/e = 0,632$  или динамической погрешности измерения  $\varphi = -0,368$ .

Для однородного цилиндра постоянную времени  $\tau$  можно вычислить по отношению его объема  $V$ ,  $m^3$ , к его поверхности  $O$ ,  $m^2$ , а также по величинам удельной теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$  и коэффициента теплопередачи  $\alpha$  [7.27 и 7.28]:

$$\tau = Vc\rho/O\alpha = b/\alpha. \quad (7.46)$$

Для данного термометра величина  $b$  имеет постоянное значение.

Экспоненциальная переходная функция, кроме постоянной времени  $\tau$ , может характеризоваться также другими дискретными переходными величинами ( $t, \eta$ ), например временем выхода переменной на половинное по отношению к установившемуся значение  $t_{0,5}$ , временем выхода на 9/10 установившегося значения и т. д. (0,5; 0,9 и т. д. представляют собой переходные значения  $\eta$ , относящиеся к значениям времени  $t$ ). Отношения переходных значений времени  $t_\eta$  к постоянным

Т а б л и ц а 7.6

Отношения  $t_\eta/\tau$  и  $t_\eta/t_{0,5}$  для различных переходных значений  $\eta$  и динамических погрешностей измерения  $\varphi$

$\eta$	$\varphi$	$t_\eta/\tau$	$t_\eta/t_{0,5}$	$\eta$	$\varphi$	$t_\eta/\tau$	$t_\eta/t_{0,5}$
0,02	—0,98	0,020	0,029	0,632	—0,368	1	1,44
0,05	—0,95	0,051	0,074	0,9	—0,1	2,303	3,32
0,1	—0,9	0,104	0,150	0,95	—0,05	3,0	4,33
0,2	—0,8	0,223	0,322	0,98	—0,02	3,91	5,64
0,5	—0,5	0,693	1				

значениям времени  $\tau$  получают для различных переходных величин  $\eta$  при помощи уравнения (7.45):

$$\frac{t_\eta}{\tau} = \ln \frac{1}{1 - \eta}. \quad (7.47)$$

В табл. 7.6 приведены соответствующие численные значения этих отношений при экспоненциальной переходной функции. Кроме отношения  $t_\eta/\tau$ , приведено отношение значений переходного времени  $t_\eta$  к времени выхода переменной на половинное по отношению к установившемуся значению  $t_{0,5}$  (см. также рис. 7.16, б, кривая 1 и 7.20).

### 7.3.1.2. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРОВ И ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Если величина  $\lambda$  невелика по сравнению с  $\alpha$ , как у многих термометров (особенно когда они встроены в защитные чехлы), влияние теплопроводности проявляется обычно существенным ухудшением теплопередачи от поверхности защитного чехла к датчику температуры. При этом показания термометра уже не изменяются в функции времени по экспоненциальному закону (см. рис. 7.16, б, кривая III).

Для однородного бесконечно длинного цилиндрического тела с радиусом  $X$  эти изменения переходной функции  $\eta(t)$  и динамической погрешности  $\varphi(t)$  могут быть учтены по Грёберу [7.29] для любой точки цилиндра  $x$  путем интегрирования дифференциального уравнения

$$\frac{\delta\vartheta}{\delta t} = a \left( \frac{\delta^2\vartheta}{\delta x^2} + \frac{1}{x} \frac{\delta\vartheta}{\delta x} \right). \quad (7.48)$$

С учетом граничных условий из частного интеграла имеем, что динамическая погрешность  $\varphi(t)$  может быть получена при помощи безразмерных параметров

$$-\varphi(t) = \Phi_1(h \cdot X, at/X^2, x/X) = \Phi_2(h \cdot X, h^2 at, x/X), \quad (7.49)$$

где  $at/X^2 \cdot h^2 X^2 = h^2 at$ ;  $h = \alpha/\lambda$ ;  $a = \lambda/c\rho$  — теплопроводность [7.30]. Для середины цилиндра ( $x/X = 0$ ) и для его поверхности ( $x/X = 1$ ) получим

$$-\varphi(t) = \Phi_2(hX, h^2 at). \quad (7.50)$$

Эти функции представлены на рис. 7.17, причем  $hX$  является параметром. Они справедливы только при условии, что характеристики материалов и коэффициенты теплопередачи в пределах температурного скачка не изменяются и, кроме того, тепловым потоком в осевом направлении наружу можно пренебречь.

Эти зависимости можно использовать также для переходных функций в пластинах и шарах при умножении на коэффициент 2 или 0,67 соответственно. Кроме того, удалось показать, что переходные функции в неоднородных слоистых телах,

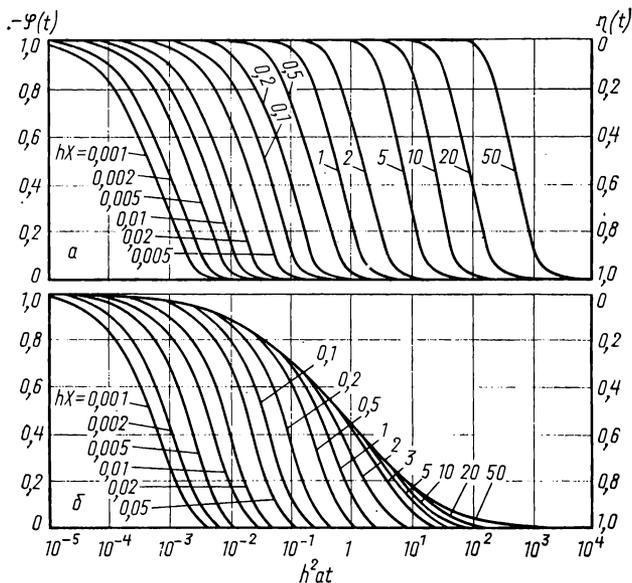


Рис. 7.17. Переходная функция  $\eta(t)$  и погрешность переходного процесса  $-\varphi(t)$  в зависимости от параметров  $h^2at$  и  $hX$  ( $h = \alpha/\lambda$ ;  $\alpha = \lambda/c\rho$ ):  
 а — в середине цилиндра; б — на поверхности цилиндра

а также в полых цилиндрах имеют аналогичный характер. Поэтому представленные на рис. 7.17 зависимости пригодны для определения переходных функций термометров [7.26].

### 7.3.1.3. ТЕРМОМЕТРЫ С УСРЕДНЯЮЩИМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕЙСТВИЕМ

Путем анализа проинтегрированного дифференциального уравнения Грёбера для различных промежуточных точек  $x/X$ , расположенных на радиусе  $X$ , удалось показать, что для временной характеристики большинства технических термометров характерным является изменение температуры в середине цилиндра [7.26]. Уже при небольшой глубине проникновения, т. е. для сравнительно большого значения  $x/X$ , времена выхода показаний на половинное и 9/10 установившегося значения приближаются к кривой, справедливой для середины цилиндра (рис. 7.18). Так как наибольший градиент температур возникает в плохо проводящих тепло материалах термометра, то, например, переходная функция незащищенного термометра сопротивления из твердого стекла воспроизводится линией  $x/X = 3/4$  (термометр с усредняющим действием,  $x/X = 0$ ).

Только для тех термометров, датчик которых расположен почти или совсем без тепловой изоляции на поверхности, получается временная характеристика в соответствии с рис. 7.17, б или 7.18 (термометр поверхностного действия,  $x/X = 1$ ).

Из рис. 7.18 видно, что до значений  $hX = 0,16$  величины времен выхода на половинное и 9/10 установившегося значения ( $t_{0,5}$  и  $t_{0,9}$ ), так же как и постоянные

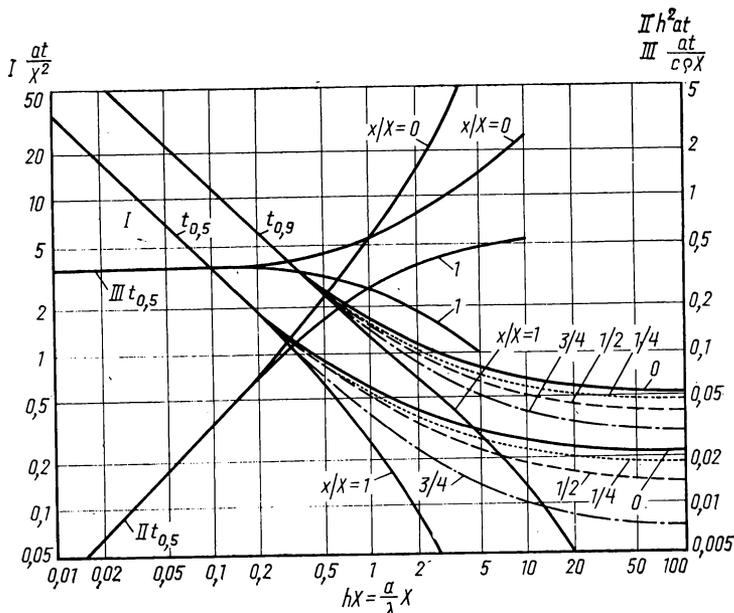


Рис. 7.18. Время выхода на половинное и 9/10 установившегося значения  $t$  в функции  $hX$  для:  $x/X = 0$  середины цилиндра;  $x/X = 1$  поверхности цилиндра;  $x/X = 1/4; 1/2$  и  $3/4$  между серединой и поверхностью цилиндра

времени  $\tau$  [см. уравнение (7.46)], изменяются обратно пропорционально  $\alpha$  (кривая I,  $\alpha t/X^2$ ) и линейно с изменением  $X$  (кривая II,  $h^2 \alpha t$ ), но независимо от  $\lambda$  (кривая III,  $\alpha t/c\rho X$ ).

Термометры, у которых  $hX > 0,16$ , ведут себя или как термометры с усредняющим действием, или как термометры поверхностного действия. При увеличении  $\alpha$  времена переходного процесса для  $x/X = 0$  стремятся к предельному значению, в то время как при  $x/X = 1$  они изменяются пропорционально  $\alpha^{-n}$ , где  $n > 1$  (см. кривые I на рис. 7.18). При увеличении  $X$  для  $x/X = 0$  времена переходного процесса увеличиваются пропорционально  $X^n$ , где  $n > 1$ ; напротив, для  $x/X = 1$  они стремятся к предельному значению (см. кривые II). При увеличении  $\lambda$  переходное время для  $x/X = 0$  увеличивается, в то время как для  $x/X = 1$  оно уменьшается (кривые III). Независимо от значений  $hX$  и  $x/X$  времена переходного процесса изменяются всегда линейно с изменением  $c\rho$ .

В соответствии с рис. 7.17 с уменьшением параметра  $hX$  в связи с более плоским характером S-образных кривых отношение 9/10 времени выхода на установившееся значение к половинному для

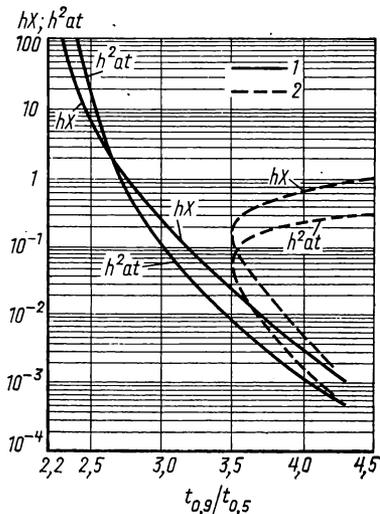


Рис. 7.19. Зависимость параметров  $hX$  и  $h^2 \alpha t$  от отношения времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5}$  для середины (1) и поверхности (2) цилиндра

термометров с усредняющим действием становится больше. Это ясно видно из рис. 7.19. Параметр  $h^2at$  изменяется так же. Термометры поверхностного действия ведут себя в диапазоне 3,5—4,5 так же для отношения  $t_{0,9}/t_{0,5}$ , если  $h^2at < 0,07$ , а  $hX < 0,16$ . Однако при больших величинах этих параметров отношения  $t_{0,9}/t_{0,5}$  для термометров поверхностного действия увеличивается [7.31].

#### 7.3.1.4. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ В ПОЛУЛОГАРИФИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

В соответствии с изложенными выше закономерностями переходных функций необходимо знать конструкцию и параметры материалов термометра, а также коэффициент теплопередачи  $\alpha$ . Однако этого почти никогда не бывает. Если же время переходного процесса  $t$  отнести к определенным экспериментально временам выхода показаний на половинное значение  $t_{0,5}$ , то все факторы, определяющие теплоотдачу и теплопередачу, в связи с образованием частного  $t/t_{0,5}$  взаимно уничтожаются (при остающихся постоянными величинах  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $sr$  и  $X$ ). Тогда изменение температуры можно выразить в полулогарифмических координатах  $\lg(-\Phi) = \Phi(t/t_{0,5})$  с отношением  $t_{0,9}/t_{0,5}$  в качестве параметра. В этом случае переходная функция  $\eta(t)$  и динамическая погрешность измерения  $\Phi(t)$  однозначно определяются только получаемыми опытным путем значениями времени выхода на половинное и 9/10 установившегося значения при условии, что термометр может рассматриваться как тело бесконечно большой длины (рис. 7.20) [7.32].

Если отношение времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5} < 4,3$ , то для переходной функции между переходными значениями  $\eta = 0,5$  и  $\eta = 0,95$  при изображении в полулогарифмических координатах получают приблизительно прямые линии, т. е. экспоненциальное изменение температуры в этом диапазоне (см. рис. 7.20, б). Такие характеристики имеют термометры с усредняющим и поверхностным действием, если  $hX \leq 0,16$ , т. е. когда  $\alpha$  и  $X$  очень малы, а  $\lambda$  очень велико (сравните с рис. 7.19). Если, напротив,  $hX > 0,16$ , то переходная функция до значения  $\eta = 0,95$  слегка вогнута по отношению к абсциссе. Значения времени выхода на 98/100 установившегося значения и на конечное значение гораздо больше, чем при экспоненциальной переходной функции. У технических термометров отношение времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5}$  составляет 2,3—5. Если датчик температуры нанесен в виде тонкого слоя или напылен на поверхность изоляционного материала, то могут быть достигнуты отношения времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5}$ , равные 10 и выше.

Если в соответствии с рис. 7.20, б термометры с меньшими отношениями  $t_{0,9}/t_{0,5}$ , чем 3,32, быстро устанавливаются на значение 98% установившегося значения по сравнению с экспоненциальной переходной функцией, то изменение показаний у таких термометров в соответствии с рис. 7.20, а начинается после скачка температуры с тем большим замедлением, чем меньше отношение  $t_{0,9}/t_{0,5}$ . Напротив, термометры тем скорее начинают реагировать после скачка температуры измеряемой среды, чем больше отношение  $t_{0,9}/t_{0,5}$  (см. также рис. 7.16, б).

В соответствии с этим отношение времени выхода на 9/10 установившегося значения ко времени выхода на половинное значение определяет принципиальный ход отсеченных ко времени выхода на половинное установившееся значение переходных функций для термометров, на временные характеристики которых не оказывают влияния вторичные тепловые потоки.

#### 7.3.2. ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО КОНСТРУКЦИИ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ТЕРМОМЕТРОВ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

На основе расчетов в соответствии с указанными законами теплопередачи термометр с усредняющим действием тем скорее реагирует на изменение температуры измеряемой среды, чем больше отношение  $O/V$  или чем меньше его диаметр и чем меньше произведение  $sr$ . При увеличении коэффициента теплопередачи

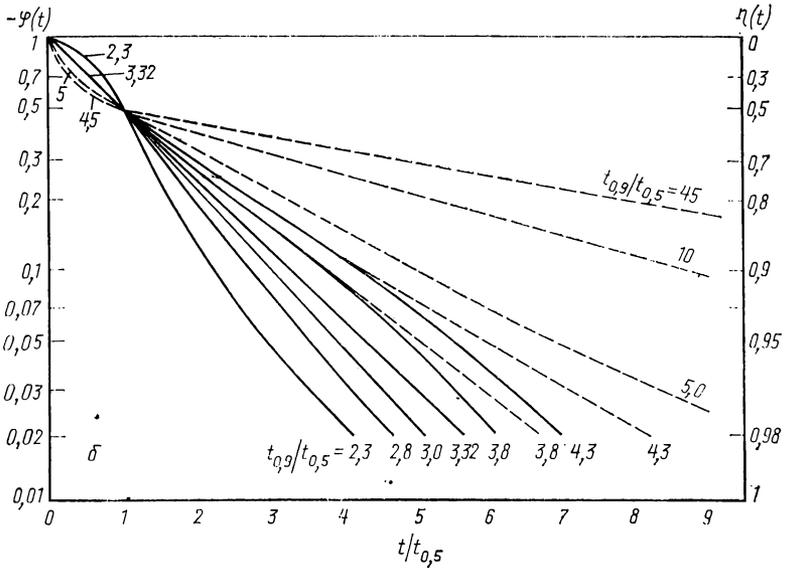
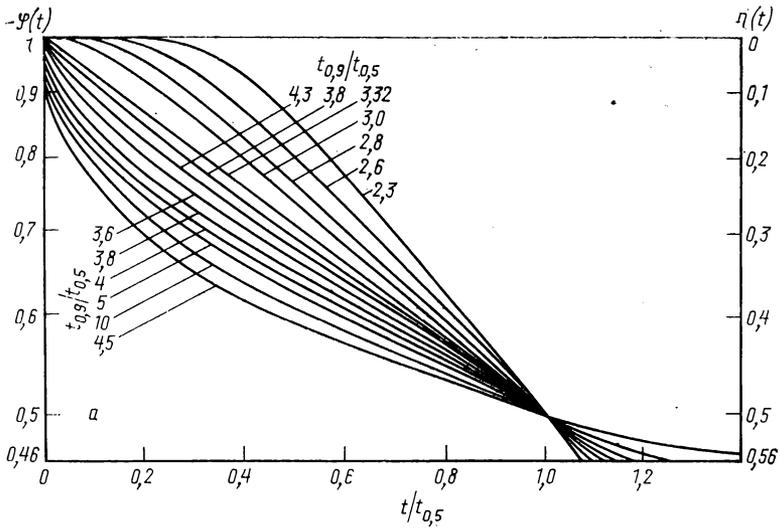


Рис. 7.20. Погрешность переходного процесса  $-\varphi(t)$  между значениями 1 и 0,46 (а) и 1 и 0,02 (б) в зависимости от  $t/t_{0,5}$  при параметре  $t_{0,9}/t_{0,5}$ :

3,32 — экспоненциальная функция; между 3,32 и 2,3 — в середине цилиндра с временами запаздывания (сплошные линии); между 3,32 и 4,3 — в середине цилиндра и на его поверхности для  $hX < 0,16$  с временами опережения (сплошные линии); между 3,8 и 45 — на поверхности цилиндра для  $hX > 0,16$  с временами опережения (штриховые линии)

время установления показаний уменьшается. В средах с хорошей теплопередачей, таких как вода, термометр характеризуется высокой теплопроводностью. Напротив, в средах с плохой теплопередачей, таких как воздух, теплопроводность термометра оказывает лишь незначительное влияние. Поэтому при одинаковых размерах у термометров, выполненных в основном из изолирующих материалов, в связи с более сильным влиянием меньшего  $ср$  получают меньшие времена установления показаний в воздухе, чем в воде по сравнению с термометрами, выполненными из металлических материалов.

Термометры поверхностного действия изменяют непосредственно после скачка температуры измеряемой среды свои показания быстрее, чем при чисто экспоненциальном переходном процессе. Изменение показаний происходит тем быстрее, чем ниже теплопроводность основного тела термометра. Если с учетом механической прочности и химической стойкости нельзя использовать свободно проложенные термоэлектродные проволоки термопар или резистор термометра сопротивления, то целесообразно их располагать на каркасе из изоляционного материала с тем, чтобы получить малоинерционные термометры (тонкопленочные термопары и термометры сопротивления). Однако время окончательного установления показаний в этом случае будет относительно большим.

### Типы переходных функций

У термометров с усредняющим действием показания по сравнению с экспоненциальным законом изменяются при увеличении теплоотдачи со все большим замедлением. Поэтому при измерениях температуры в воде и паре высокого давления необходимо учитывать более или менее повышенные времена запаздывания (см. рис. 7.16). Однако при измерениях в воздухе могут также появиться такие запаздывания, если эквивалентная теплопроводность термометра невелика (рис. 7.21, тип функции I и табл. 7.7). Отношение  $t_{0,9}/t_{0,5}$  в воде при этом меньше, чем в воздухе [7.31].

При небольших временах опережения в воздухе и запаздывания в воде становится заметным влияние теплопередачи через дно защитного чехла (тип функции II).

При небольших временах опережения в воздухе и запаздывания в воде становится заметным влияние теплопередачи через дно защитного чехла (тип функции II).

У технических термометров в дополнение к радиальным тепловым потокам к датчику температуры могут возникнуть еще датские тепловые потоки, прежде всего в направлении к выступающей части арматуры термометра. Это влияние становится большей частью заметным тогда, когда датчик температуры находится в хорошем тепловом контакте с защитным чехлом, так как в результате этого тепло к датчику температуры подводится или отводится от него через защитную арматуру. При этом величина отношения  $t_{0,9}/t_{0,5}$  увеличивается, хотя времена запаздывания, особенно в воде, остаются небольшими (тип функции III).

При больших тепловых потоках между датчиком температуры и выступающими частями арматуры термометра переходные характеристики  $t_{0,9}/t_{0,5}$  для воздуха и воды могут поменяться на обратные. Такая перемена вызывается также тем, что переходные характеристики

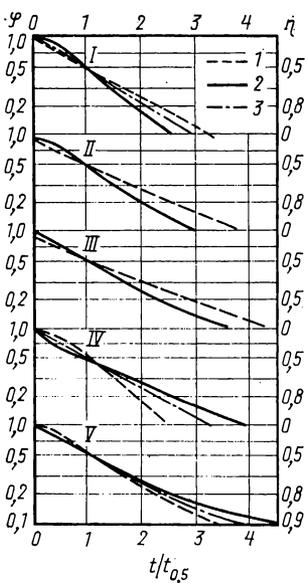


Рис. 7.21 Типичные переходные функции термометров при измерениях в воздухе и воде: 1 — воздух; 2 — вода; 3 — воздух и вода

в большей или меньшей степени приближаются к характеру изменения температуры на поверхности термометра. Тогда даже в воде могут наблюдаться опережения. Термометры исключительно поверхностного действия всегда имеют времена опережения или экспоненциальную характеристику (тип функции IV).

При очень большом осевом тепловом потоке между датчиком температуры и головкой термометра и хорошим тепловым контакте датчика температуры, встроенного в оболочку, с дном защитного чехла получается переходная функция, соответствующая типу функции III с небольшим временем запаздывания в воздухе, которое, однако, в воде чаще всего еще меньше. При очень больших вторичных тепловых потоках могут даже наблюдаться опережения при измерении в воздухе. При увеличении переходного значения  $\eta$  отношение переходных времен для воздуха и воды также изменяется на обратное.

У термометров с переходными функциями типов I и II можно пренебречь осевыми тепловыми потоками. Переходную функцию можно взять только по отношению  $t_{0,9}/t_{0,5}$  по рис. 7.20. У термометров, соответствующих типу функции III—V, чаще всего рекомендуется указывать времена выхода показаний на 2/10, 1/10 и 5/100 установившегося значения по полученным опытным путем кривым или по передаточной функции, вычисленной для любой среды (см. 7.3.3). При помощи этих пар значений передаточная функция к началу скачка температуры, а также время запаздывания  $T_U$  или время опережения  $T_S$  определяются с достаточной для большинства случаев точностью (см. рис. 7.16, б). Для термометров, у которых отношение  $t_{0,9}/t_{0,5} > 3,6$ , следует указывать также значения времени выхода на 95/100 или 98/100 установившегося значения, если необходимо для наблюдаемого процесса знать конечное установившееся значение. Характер переходной функции в воздухе в соответствии с рис. 7.21 обычно различный. Лишь при малых значениях  $hX$ , т. е. при хорошей теплопроводности термометра, переходная функция в воде и воздухе имеет независимо от величины  $\alpha$  всегда экспоненциальный характер.

### 7.3.3. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СРЕД

В то время как переходные функции в воде и воздухе обычно легко определить опытным путем, в других средах, например в парах или при высоких температурах, определение этих функций часто связано с большими трудностями или вообще невозможно. В этих случаях временные характеристики в любой среде можно определить путем сравнения с переходной функцией в других средах, например в воздухе или воде, если для этих сред, а также для измеряемой среды известны коэффициенты теплоотдачи. При вычисленной переходной функции измеряемой среды получают представление о том, удовлетворяет ли преддусмотренный термометр требованиям относительно его временных характеристик.

#### 7.3.3.1. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ПО ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОДНОЙ ЭТАЛОННОЙ СРЕДЫ

В соответствии с рис. 7.19 отношение  $t_{0,9}/t_{0,5}$  зависит от  $hX$  и  $h^2at$ . Если коэффициент теплоотдачи эталонной среды, например воздуха, равен  $\alpha_1$ , а измеряемой среды  $\alpha_2$ , то при известном отношении времен переходного процесса в воздухе можно получить по рис. 7.19 параметры  $(hX)_1$  и  $(h^2at_{0,5})_1$ . При помощи  $hX = \alpha X/\lambda$  получают для данного термометра в средах 1 и 2

$$(hX)_2 = (hX)_1 (\alpha_2/\alpha_1) (\lambda_1/\lambda_2) (X_2/X_1). \quad (7.51)$$

Таким образом, из рис. 7.19 получают  $(t_{0,9}/t_{0,5})_2$  и  $(h^2at_{0,5})_2$  для среды 2. По известному значению  $(t_{0,5})_1$  для среды 1 и учитывая, что  $h^2at = (\alpha^2\lambda t)/c\rho$ , находят время выхода на половинное установившееся значение в среде 2:

$$(t_{0,5})_2 = (t_{0,5})_1 \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{(c\rho)_2}{(c\rho)_1} \frac{(h^2at_{0,5})_2}{(h^2at_{0,5})_1}. \quad (7.52)$$

Влияние теплопроводности и  $c\rho$  следует учитывать только в тех случаях, когда при высоких температурах изменяются их средние значения. Во многих случаях это влияние можно оценить [7.32].

Пример.  $(t_{0,9}/t_{0,5}) = 3,0$ ;  $(t_{0,5})_1 = 30$  с;  $\alpha_1 = 15$ ;  $\alpha_2 = 150$ . В соответствии с рис. 7.19  $(hX)_1 = 0,27$ , а  $(h^2at_{0,5})_1 = 0,115$ . При  $\alpha_2/\alpha_1 = 10$  по уравнению (7.51) получится  $(hX)_2 = 0,27 \cdot 10 = 2,7$ . Из рис. 7.19  $(t_{0,9}/t_{0,5})_2 = 2,63$ , а также  $(h^2at_{0,5})_2 = 2,4$ . Тогда по уравнению (7.52) получают  $(t_{0,5})_2 = 30 (15/150)^2 (2,4/0,115) = 6,3$  с [7.31 и 7.32].

Этот метод можно применять только в том случае, если коэффициенты теплопроводности в эталонной и измеряемой средах различаются не более чем в отношении 1 : 10 и если отношение времен переходного процесса остается  $\leq 5$  [7.31].

### 7.3.3.2. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ФУНКЦИЯМ В ДВУХ ЭТАЛОННЫХ СРЕДАХ

Временные характеристики термометра в средах с любыми коэффициентами теплоотдачи можно определить с большей точностью при помощи параметра термометра  $V_T$  (см. 7.1.2.2) [7.15]. Значение  $V_T$  определяют по отношению коэффициентов теплоотдачи в эталонных средах 2 и 1 (воде и воздухе)  $\alpha''_w = \alpha_w/\alpha_1$  и по относительному кажущемуся коэффициенту теплоотдачи в эталонной среде 2  $\alpha''_{ws}$  [уравнение (7.36)]. Соответственно  $\alpha'_{xs}$  представляет собой относительный кажущийся коэффициент теплоотдачи в измеряемой среде  $x$ . Так как отношения времени переходного процесса  $\tau$  или  $t_\eta$  термометров с хорошей теплопроводностью по сравнению с коэффициентами теплоотдачи обратно пропорциональны [уравнение (7.46)], для зависимости между временами теплоотдачи для любых пар значений  $(t, \eta)$  с кажущимися относительными коэффициентами теплоотдачи в воде  $w$  и в измеряемой среде  $x$  справедливы выражения

$$t_{\eta w}/t_{\eta l} = \alpha'_{ls}/\alpha'_{ws} = 1/\alpha''_{ws} \quad \text{и} \quad t_{\eta x}/t_{\eta l} = \alpha'_{ls}/\alpha'_{xs} = 1/\alpha''_{xs}, \quad (7.53)$$

где  $\alpha'_{ls}$ ,  $\alpha'_{ws}$  и  $\alpha'_{xs}$  — кажущиеся коэффициенты теплоотдачи в воздухе, воде и в измеряемой среде. Соответственно  $1/\alpha''_{xs}$  дает отношение времен переходного процесса в измеряемой среде  $x$  и в воздухе  $l$ .

Поэтому если известна переходная функция в двух эталонных средах, таких как вода и воздух с коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_w$  и  $\alpha_1$ , то по уравнению (7.53) можно вычислить переходную функцию в любой среде  $x$ , если для нее известно  $\alpha_x$ . Общий ход расчета приведен в табл. 7.5. Коэффициенты теплоотдачи можно взять из табл. 7.3. Для приближенной оценки можно использовать рис. 7.9. Более точные данные для расчета  $V_T$  и  $\alpha'_{xs}$  можно получить по уравнениям (7.35) и (7.36).

Как видно из рис. 7.9, время переходного процесса при увеличении  $\alpha_x$  стремится к предельному значению, если параметр  $V_T < 100$ . Поэтому для армированных технических термометров большие коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  могут быть известны лишь приближенно. В средах с небольшими коэффициентами теплоотдачи  $\alpha$  надо знать их более точно, так как в этих диапазонах переходной функции в связи с более крутым ходом кривых  $V_T$  они подвергаются более сильному влиянию параметра  $\alpha$ . Если  $V_T = 100$ , то время переходного процесса  $t_\eta$  изменяется от  $1/\alpha$  в соответствии с уравнением (7.46).

Для переходной функции термометров с усредняющим действием ( $V_T < 100$ ) получают те же зависимости, которые были получены по уравнениям (7.35) и (7.36), а также по законам теплопередачи для середины цилиндра при скачке температуры измеряемой среды по Грёберу (рис. 7.17, а). Поэтому для термометров поверхностного действия можно также по рис. 7.17, б вывести аналогичные зависимости для  $V_T > 100$ , которые на рис. 7.9 нанесены штриховыми линиями [7.29, 7.26 и 7.15].

#### Приближенный метод

Простое приближенное уравнение для определения времен переходных процессов можно получить для всех сред из уравнения (7.31). Так же как для термометров с экспоненциальной переходной функцией, время переходного про-

цесса или другие пары значений ( $t, \eta$ ) в соответствии с уравнением (7.46) находятся в обратной зависимости с коэффициентами теплоотдачи  $\alpha$ ; времена переходных процессов любых термометров обратно пропорциональны кажущимся коэффициентам теплоотдачи  $\alpha_{xs}$  по уравнению (7.31). Поскольку для воды  $\alpha_w > k_i$  (коэффициент внутренней теплопередачи), то, пренебрегая величиной  $1/\alpha_w$  по сравнению с величиной  $1/k_i$  для любого времени переходного процесса  $t_{\eta}$ , получаем

$$\frac{t_{\eta x}}{t_{\eta l}} = \frac{(1/\alpha_x) + (1/k_i)}{(1/\alpha_l) + (1/k_i)}; \quad \frac{t_{\eta w}}{t_{\eta l}} = \frac{1/k_i}{(1/\alpha_l) + (1/k_i)};$$

$$\frac{t_{\eta l}}{t_{\eta l}} = \frac{(1/\alpha_l) + (1/k_i)}{(1/\alpha_l) + (1/k_i)} = 1.$$

Таким образом, независимо от значений параметров материала термометра времена переходного процесса (например, время выхода на половинное от установившегося значение  $t_{0,5}$ ) в любой среде определяются из выражений

$$\frac{t_{\eta x} - t_{\eta w}}{t_{\eta l} - t_{\eta w}} = \frac{(1/\alpha_x) + (1/k_i) - (1/k_i)}{(1/\alpha_l) + (1/k_i) - (1/k_i)} = \frac{\alpha_l}{\alpha_x} \quad (7.54)$$

$$\text{или } t_{\eta x} = (t_{\eta l} - t_{\eta w}) (\alpha_l/\alpha_x) + t_{\eta w}. \quad (7.55)$$

Это уравнение применимо только в том случае, если коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$  в измеряемой среде значительно меньше, чем коэффициент для воды  $\alpha_w$ . Коэффициент  $\alpha_x$  может быть максимум в 25 раз больше  $\alpha_l$ .

Пример (численные значения взяты из примера I раздела 7.1.2.4). При  $\alpha_x/\alpha_l = 27,5$  и определенных опытным путем временах выхода на половинное и  $9/10$  от установившегося значения:

	$t_{0,5}$	$t_{0,9}$
$t_{\eta l}$ для воздуха, с . . . . .	114	360
$t_{\eta w}$ для воды, с . . . . .	7,5	30
$t_{\eta x}$ для измеряемой среды, с:		
по уравнению (7.35) . . . . .	10,3	39,5
по уравнению (7.56) . . . . .	11,4	42

\* При  $\alpha_x = 923 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Экспериментальные исследования зависимости переходной функции от характера измеряемой среды показали удовлетворительное совпадение с расчетными значениями [7.26]. Примечательно, что даже в соляных ваннах с температурой  $500-600^\circ\text{C}$  было установлено также удовлетворительное совпадение. По переходным характеристикам термопары в защитном чехле диаметром 4 мм из стали марки Х8СгМоNi имеют отнесенный к воздуху коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x/\alpha_l = 114$ , для которого в литературе приведено значение около 100 [7.33].

Можно также приближенно определять коэффициент теплоотдачи в любой среде  $x$  по временам переходного процесса и коэффициентам теплоотдачи в воде и воздухе при помощи параметра термометра  $V_T$ .

## 7.3.4. СНЯТИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ

### 7.3.4.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Поскольку скорость течения измеряемой среды у термометра оказывает влияние на величину теплоотдачи и, таким образом, на переходную функцию термометра, необходимо при экспериментальном определении временных характеристик выбирать скорость течения измеряемой среды так, чтобы к поддержанию ее

постоянства предъявлялись не слишком жесткие требования. Кроме того, скачок температуры не должен быть слишком большим, с тем чтобы во время испытания теплопередача не изменялась вследствие зависимых от температуры параметров материала термометра. Далее скачок температуры должен быть выполнен так, чтобы температурное поле у термометра практически не нарушалось. Время переходного процесса необходимо измерять при помощи такого устройства, погрешность установки которого на значение времени выхода на 98/100 от установившегося значения не превышает 1/7 времени  $t_{0,5}$  термометра [7.31; 7.34—7.37].

#### 7.3.4.2. ПОВЕРКА В ВОЗДУХЕ И В ВОДЕ ПРИ НОРМИРОВАННЫХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА

Проверку термометров с защитной арматурой или без нее целесообразно проводить в воздухе и в воде всегда при одинаковых условиях измерения.

При экспоненциальной переходной функции время переходного процесса изменяется в соответствии с уравнением (7.46) обратно пропорционально коэффициенту теплоотдачи  $\alpha_x$ . Для произвольного термометра отношение времен переходного процесса в среде  $x$  к среде  $l$  (воздух)  $t_x/t_l$  зависит от величины  $1/\alpha_{xs}$  и, таким образом, в соответствии с рис. 7.9, от величины  $\alpha_x/\alpha_l = \alpha'_x$  и от параметра термометра  $V_T$ . При  $V_T = 100$  получается экспоненциальная кривая температуры. При уменьшении  $V_T$  и увеличении  $\alpha'_x$  изменение  $1/\alpha_{xs}$  и, таким образом, изменение времени переходного процесса  $t$  становится все меньше. Соответственно в удвоительном согласии с результатами многочисленных исследований [7.34] времена переходного процесса при экспоненциальной переходной функции уменьшаются при удвоении скорости потока соответственно изменению  $1/\alpha$  примерно до 73%. Чем меньше  $V_T$ , тем более плоскими становятся при увеличении  $\alpha$  кривые времен переходного процесса.

Времена переходного процесса термометров уменьшаются при увеличении скорости потока измеряемой среды, т. е. при увеличении коэффициента теплоотдачи. Поэтому скорость потока при проверке термометров на их временные характеристики должна выбираться такой, чтобы к ее поддержанию на заданном значении предъявлялись не слишком жесткие требования. До настоящего времени при проверке обычно принимали скорость потока воздуха  $v_l = 1$  м/с и скорость потока воды  $v_w = 0,2$  м/с, однако последние исследования показали [7.34 и 7.35], что целесообразно по возможности применять скорости потоков  $v_l = 3$  м/с и  $v_w = 0,4$  м/с. Эти скорости должны быть нормированы [7.35а].

#### 7.3.4.3. ПЕРЕСЧЕТ ВРЕМЕН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА НОРМИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Для того чтобы иметь возможность сравнивать временные характеристики термометров, которые поверяли не при нормированных скоростях течения, следует пересчитывать определенные опытным путем времена переходного процесса на те времена, которые получились бы в воздухе при скорости потока 3 м/с или в воде при скорости потока 0,4 м/с. Если, например, времена переходного процесса определяли в воздухе при скорости потока 1 м/с или в воде при скорости потока 0,2 м/с, то эти времена можно умножить на коэффициенты  $c$ , приведенные ниже, с тем чтобы получить времена переходного процесса при нормированных скоростях потока. Однако для этой цели необходимо знать параметр  $V_T$  данного термометра с защитным чехлом или без него. Разброс в связи с зависимостью коэффициентов теплоотдачи от давления, температуры и диаметра термометра здесь пренебрежимо мал (сравните с табл. 7.3).

Коэффициенты пересчета  $c_l$  для воздуха или  $c_w$  для воды получают по уравнению (7.35) и по соответствующим коэффициентам теплоотдачи  $\alpha$  из табл. 7.3. Так как в соответствии с уравнением (7.35)  $t_x/t_l = 1/\alpha_{xs}$ , коэффициент пересчета  $c$  в зависимости от параметра термометра  $V_T$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в соот-

ветствии с табл. 7.3 с использованием уравнения (7.35) по частному  $t_a/t_l = t_b/t_l$  получается равным

$$c = \frac{t_a}{t_b} = \frac{(V_T - 1)/\alpha'_a + 1 - 0,01V_T}{(V_T - 1)/\alpha'_b + 1 - 0,01V_T}. \quad (7.56)$$

Индекс  $a$  относится к временам переходного процесса при нормированных скоростях потока, индекс  $b$  — к скоростям, использованным при проведении измерений. Значения  $\alpha'$  могут быть отнесены как к нормированной скорости потока воздуха  $v_l = 3$  м/с, так и к использованной при проведении измерений скорости потока, например  $v_l = 1$  м/с.

Для термометра диаметром 10 мм значения  $\alpha'$  составляют:

в воздухе при  $v_l = 3$  м/с  $\alpha'_l, a = \alpha_{l,a}/\alpha_{l,a} = 56/56 = 1$ ; при  $v_l = 1$  м/с  $\alpha'_l, b = \alpha_{l,b}/\alpha_{l,a} = 33,6/56 = 0,60$ ;

в воде при  $v_w = 0,4$  м/с  $\alpha'_{w,a} = \alpha_{w,a}/\alpha_{l,a} = 3645/56 = 65,1$ ; при  $v_w = 0,2$  м/с  $\alpha'_{w,b} = \alpha_{w,b}/\alpha_{l,a} = 2604/56 = 46,5$ .

По уравнению (7.56) получают при помощи этих относительных значений коэффициенты пересчета для воздуха  $c_l$  и для воды  $c_w$ . Эти коэффициенты в значительной мере не зависят от диаметра термометра в пределах 1—10 мм.

Ниже приведены коэффициенты  $c_l = t_{l,a}/t_{l,b}$  и  $c_w = t_{w,a}/t_{w,b}$  для воздуха ( $l$ ) и для воды ( $w$ ) для пересчета полученных времен переходного процесса  $t_{l,b}$  и  $t_{w,b}$  при скоростях потока  $v_{l,b} = 1$  м/с и  $v_{w,b} = 0,2$  м/с на времена переходного процесса при  $v_{l,a} = 3$  м/с и  $v_{w,a} = 0,4$  м/с в зависимости от параметра термометра  $V_T$ :

$V_T$	100	80	50	30	20	10	5	3
$c_l = t_{l,a}/t_{l,b}$	0,60	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,65	0,69
$c_w = t_{w,a}/t_{w,b}$	0,71	0,73	0,81	0,87	0,90	0,95	0,98	0,99

В то время как для проверки времен переходного процесса в воздухе можно получить скорость потока 3 м/с с достаточным постоянством в довольно простых измерительных устройствах, для получения постоянной скорости потока 0,4 м/с в воде, прежде всего для проверки термометров большого диаметра и связанными с этим большими временами установления показаний иногда требуются относительно большие затраты (см. 7.3.4). Такие термометры имеют большей частью небольшую величину параметра  $V_T$ . По рис. 7.9 видно, что влияние изменений значений  $\alpha$  на времена переходного процесса  $t_x/t_l = 1/\alpha'_{x,s}$  становится тем меньше, чем больше  $\alpha$  и чем меньше  $V_T$ . Чем более полого проходят кривые  $V_T$ , тем менее заметными становятся изменения теплоотдачи или скорости потока при проверке термометров. Поэтому можно даже при небольших скоростях потока воды (0,2 м/с) получить надежные результаты измерений, несмотря на появляющиеся при этом большие колебания скорости потока, если значения параметра термометра достаточно малы. В этом случае измеренные значения необходимо пересчитывать на скорость потока 0,4 м/с, учитывая коэффициенты  $c$ .

Времена переходного процесса становятся при увеличении коэффициентов теплоотдачи меньше, однако они уменьшаются тем медленнее, чем меньше параметр термометра. Поэтому необходимо определить, при каком параметре  $V_T$  термометра, который обтекается измеряемой средой с большой скоростью потока, например водой при скорости потока  $v_{w,a} = 0,4$  м/с, можно получить такое же время переходного процесса, как и при  $v_{w,b} = 0,2$  м/с. При параметрах  $V_T = 100$  времена переходного процесса обратно пропорциональны коэффициентам теплоотдачи. Поэтому при указанных выше значениях получим

$$t_{w,a}/t_{l,a} = 1/\alpha'_{w,a} = 1/65,1 = 0,0154 \text{ и } t_{w,b}/t_{l,a} = 1/\alpha'_{w,b} = 1/46,5 = 0,0215.$$

Подлежащий определению параметр  $V_T$  для термометра, обтекаемого с большей скоростью потока  $v_{w,a}$ , получают в результате того, что в уравнение (7.35)

для  $1/\alpha''_{w,a}$  вместо  $1/\alpha'_{w,a}$  подставляют значение  $1/\alpha'_{w,b}$ ; однако для  $\alpha'_{w,a}$  подставляют те значения, которые справедливы для  $v_w, a$ . По уравнению (7.35) находят значение параметра  $V_{T'}$ , при котором термометр имеет те же переходные характеристики, как и при меньшей скорости потока  $v_w, b$ . Этот параметр равен

$$V_{T'} = \frac{1/0,99 - 1/0,99\alpha'_{w,a}}{1/\alpha'_{w,b} - 1/0,99\alpha'_{w,a} + 0,01/0,99} \quad (7.56a)$$

При  $\alpha'_{w,b} = 46,5$  и  $\alpha'_{w,a} = 65,1$  получают  $V_{T'} = 61,8$ . Поэтому термометры, времена переходного процесса которых определены при скорости потока  $0,2$  м/с в воде и параметры которых  $V_T < 60$ , можно поверять также в воде при скорости потока  $v_w, b = 2$  м/с. Однако полученные при этом времена переходного процесса необходимо пересчитывать на нормированные времена  $t_{w,a}$ . Аналогично этот метод можно применять для расчетов в воздухе, а также для других скоростей потоков.

Положенное в основу расчета отношение  $\alpha'_{w,a} = \alpha_{w,a}/\alpha_{l,a} = 65,1$  может вследствие разброса значений коэффициента теплоотдачи также иметь разброс. Поэтому приведенные выше зависимости для  $\alpha$  всегда имеют не указываемую погрешность измерения, которой, однако, в большинстве случаев можно пренебречь.

Если можно предположить, что погрешность измерения при указанных скоростях потока все же может быть слишком большой, то термометры можно поверять также при  $v_l = 5$  м/с или при  $v_w = 1$  м/с и пересчитывать полученные таким образом времена переходного процесса на нормированные скорости потока.

Параметр термометра  $V_T$  определяется также в зависимости от характера переходной функции по значениям дискретных пар  $(t, \eta)$  (см. табл. 7.5, пример расчета 1.1.4). При этом необходимо для одной или нескольких пар значений подсчитывать значения  $V_T$  по уравнению (7.36).

#### 7.3.4.4. ВРЕМЕНА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА И ПАРАМЕТРЫ $V_T$ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

В табл. 7.7 приведены для различных технических термометров полученные опытным путем времена переходного процесса и вычисленные по ним параметры термометров для времен выхода на половинное от установившегося значение. Из таблицы следует, что жидкостные и паровые манометрические термометры, трубчатые термопары, а также термопары в защитных чехлах небольшого диаметра даже в тех случаях, когда они встроены в защитные чехлы с хорошим тепловым контактом, иногда имеют в связи с хорошей внутренней теплопередачей значения  $V_T$  выше 30, а в некоторых случаях даже выше 100. Для стандартных электрических термометров и измерительных вставок, помещенных в защитные чехлы, значения  $V_T$  большей частью составляют менее 30. У таких термометров со скоростью потока  $v_w = 0,2$  м/с погрешность измерения при поверке остается достаточно малой.

#### 7.3.4.5. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СНЯТИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ ТЕРМОМЕТРОВ

Начальная температура воздуха перед скачком температуры должна составлять  $15-30^\circ\text{C}$ , температура воды  $15-25^\circ\text{C}$ . Во время измерения эти температуры не должны изменяться более чем на 5% величины скачка температуры. Максимальный скачок температуры воздуха не должен превышать  $10-20\text{ K}$ , воды  $10\text{ K}$ . В процессе измерения необходимо обеспечивать достаточную глубину погружения термометров: она должна составлять длину датчика  $l + 15d$  в воздухе и минимум  $6d$  в воде, где  $d$  — диаметр термометра. Технические термометры с заданной монтажной длиной или предписанной глубиной погружения необходимо поверять при соответствующих глубинах.

В качестве метода определения переходной функции термометра в воздухе пригоден метод нагревательной решетки, при котором можно проводить измерения, не нарушая поля скорости при создании скачка температуры [7.34 и 7.35а]. Согласно рис. 7.22, при помощи вентилятора с направляющими створками и через успокоительную решетку в измерительный отсек вдувают воздух с постоянной скоростью потока; в этом отсеке помещен термометр, расположенный поперек направления течения. Перед термометром расположена нагревательная решетка из тонких хромоникелевых проволок (см. рис. 7.22, б). Путем правильного выбора конструкции и размеров решетки параметры нагрева приводят в соответствие с требуемыми. Скачок температуры достигается путем включения и выключения нагревательной решетки. При толщине проволоки, например, 20 мкм продолжительность переходного процесса при  $v = 2$  м/с составляет всего лишь 30 мкс. Скорость потока может быть измерена при помощи трубки Прандтля.

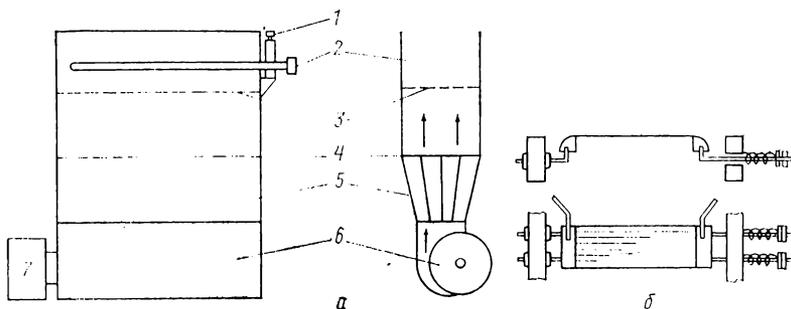


Рис. 7.22. Установка для определения переходной функции неподвижных термометров в воздухе по методу нагревательной решетки (по Хунке):

*a* — конструкция установки; *б* — конструкция нагревательной решетки; 1 — держатель; 2 — поверяемый термометр; 3 — успокоительная решетка; 4 — нагревательная решетка; 5 — диффузор; 6 — вентилятор; 7 — двигатель

Метод нагревательной решетки можно использовать также для снятия переходных функций малоинерционных термометров, например термпар в защитных чехлах диаметром 1,5 мм в воде; постоянная времени этих термометров составляет 20—100 мс. Для того чтобы снизить затрачиваемую мощность для получения скачка температуры, необходимо ограничить величину скачка температуры до 1,5 К. При этом располагают последовательно три нагревательные решетки. Эти решетки при помощи соответствующей схемы управления включаются последовательно во времени таким образом, чтобы отдельные скачки температуры накладывались один на другой. Тогда в воде можно измерить очень малые времена переходного процесса. Так, для термпар в защитных чехлах диаметром 1,5 мм были получены постоянные времена 10 с в воздухе и 175 мс в воде. Для термпар в защитных чехлах диаметром 0,25 мм постоянные времена составили соответственно 550 мс и 18 мс.

Для измерения времен переходного процесса в воде с постоянными времени  $\geq 100$  мс пригоден метод заслонки (рис. 7.23, а) [7.34 и 7.35а], для которого, однако, требуется большое количество аппаратуры. При помощи насоса воду подают через диффузор с успокоительной решеткой в размещенный на каретке измерительный трубчатый отсек с заслонкой, а оттуда в холодильник с дополнительным нагревательным устройством. Температуру нагретаемой воды поддерживают постоянной при помощи регулятора. Кроме того, по другому контуру в измерительный отсек подается из аккумулятора нагретая в теплообменнике вода, обтекающая укрепленный в отсеке термометр. Эта вода выходит через верхний срез измерительного отсека и смешивается с основным потоком воды. Избыток воды через сливную трубу подается в аккумулятор. Установленная в измерительном отсеке лепестковая заслонка может открываться при помощи системы

Времена переходных процессов для термометров при температуре между 40 и 20° С; параметры термометров  $V_T$

[уравнение (7.36)];  $t_{0,5}$  — время выхода на половинное от установившегося значение;

$t_{0,9}$  — время выхода на 9/10 установившегося значения;  $T_n$  — время запаздывания;  $T_s$  — время опережения [7.20 и 7.31]

Тип	Вид термометра	В воздухе ( $v = 1,0$ м/с)				В воде ( $v = 0,2$ м/с)				
		$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	$\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}}$	$\frac{T_n}{t_{0,5}} \frac{T_s}{t_{0,5}}$ (-) (+)	$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	$\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}}$	$\frac{T_n}{t_{0,5}} \frac{T_s}{t_{0,5}}$ (-) (+)	$V_T$ (по $t_{0,5}$ )
I	1. Жидкостный ртутный стеклянный термометр, деления 1/100 град, длина резервуара 12 мм, диаметр 6 мм	48	150	3,12	-0,05	2,4	6,2	2,58	-0,23	47
	2. Жидкостный манометрический термометр, диаметр металлического чехла 17 мм	180	600	3,33	±0	4,4	12,5	2,84	-0,30	47
	3. Манометрический термометр в чехле диаметром 22 мм	380	1280	3,37	-0,04	85	260	3,06	±0	5
	4. Термометр сопротивления, измерительное сопротивление со стеклянным каркасом диаметром 4 мм	26,5	92	3,47	±0	0,65	2,12	3,26	-0,04	46
	5. Измерительная вставка для термометры по ДИН 43735, диаметр 6 мм	45	160	3,56	±0	0,34	1,15	3,38	-0,17	200
	6. Измерительная вставка для термометров сопротивления по ДИН 43262 диаметр 6 мм	72	220	3,06	-0,06	6,2	16	2,58	-0,30	12
	в защитном чехле по ДИН 43763:									
	формы В (ввинчивающаяся гильза), диаметр 9 мм	140	390	2,78	-0,13	30	80	2,66	-0,20	5
	формы С (ввинчивающаяся гильза), диаметр 11 мм	133	415	3,12	-0,10	32	88	2,75	-0,23	4
	формы D (свариваемая гильза), диаметр цилиндрической части 24 мм	315	1070	3,40	-0,10	38	110	2,90	-0,17	8

II	Трубочные термомпары: а) металлическая трубка диаметром 10 мм б) ввариваемая гильза, цилиндрическая часть диаметром 24 мм	42	165	3,93	+0,10	0,75	2,15	2,87	-0,10	67
		190	730	3,84	+0,05	1,7	6,20	3,65	-0,20	168
III	1. Стеклянные технические термометры. Погружная гильза диаметром 11 мм, длиной 40 мм 2. Паровые манометрические термометры. Погружная гильза диаметром 17 мм 3. Комнатные термометры сопротивления диаметром 25 мм	245	1070	4,40	-0,08	70	238	3,40	-0,04	4
		200	820	4,10	±0	4,8	18	3,78	±0	51
		140	1050	7,50	-0,05	12	50	4,16	-0,03	12
IV	1. Стеклянные технические термометры. Стеклянная вставка по ДИН 16178, диаметр 6 мм в защитном чехле диаметром 10 мм, длиной 250 мм 2. Термомпары в металлических защитных чехлах по ДИН 43720 NiCr—Ni: защитный чехол из хромистой стали, диаметр 15 мм NiCr—Ni: защитный чехол из хромистой стали диаметром 22 мм 3. Термомпары в керамических защитных чехлах по ДИН 43724 PtRh—Pt: внешний чехол диаметром 15 мм 4. Измерительная вставка для термометров сопротивления с керамическим картером в защитном чехле V4A диаметром 2 мм 5. Стеклянное измерительное сопротивление в металлическом чехле диаметром 6 мм 6. Комнатный термометр сопротивления с ребристым чехлом, диаметр 6 мм, диаметр ребер 17,5 мм	121	350	2,89	-0,20	23	77	3,35	±0	5
		190	490	2,58	-0,15	57	170	2,98	-0,08	3
		390	1030	2,64	-0,20	112	440	3,92	+0,20	4
		180	455	2,52	-0,18	42	125	2,98	-0,08	4
		11,0	35,5	3,23	-0,04	1,13	4,10	3,63	-0,08	10
		51	155	3,04	-0,05	10,5	33	3,15	-0,08	5
70	210	3,00	-0,10	16	50	3,12	-0,04	4		

Тип	Вид термометра	В воздухе ( $v = 1,0$ м/с)				В воде ( $v = 0,2$ м/с)				
		$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	$\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}}$	$\frac{T_n}{T_s} \frac{T_s}{t_{0,5}} \frac{t_{0,5}}{(-)}$	$t_{0,5}$	$t_{0,9}$	$\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}}$	$\frac{T_n}{T_s} \frac{T_s}{t_{0,5}} \frac{t_{0,5}}{(-)}$	$V_T$ (по $t_{0,5}$ )
V	1. Измерительная вставка для термометра по ДИН 43735 в защитном чехле по ДИН 43763:									
	форма B (ввинчивающаяся гильза), диаметр 9 мм	92	300	3,26	-0,05	7,0	30	4,28	-0,09	14
	форма C (ввинчивающаяся гильза), диаметр 11 мм	114	360	3,16	-0,08	7,5	30	4,00	-0,08	16
	форма D (свариваемая гильза), диаметр цилиндрической части 24 мм	225	800	3,55	+0,08	7,0	30	4,28	-0,04	35
	2. Термометра в защитном чехле диаметром 3 мм и свариваемой защитной гильзе, диаметр цилиндрической части 18 мм	21	69	3,28	$\pm 0$	0,27	0,95	3,52	-0,14	99
	3. Сдвоенный термометр сопротивления в защитном чехле диаметром 14 мм, измерительное сопротивление диаметром 6 мм	190	750	3,95	+0,11	2,00	9,50	4,75	-0,06	130
		104	405	3,9	-0,12	8,3	47	5,6	-0,10	13

рычагов и тяг, приводящих в движение каретку. Это позволяет кратковременно подвергать термометр воздействию более холодного основного потока воды. При этом необходимо приводить скорость передвижения каретки в соответствие со скоростью потока с тем, чтобы предотвратить образование завихрения воды у термометра.

Для проверки термометров со значениями  $t_{0,5}$  в воде  $\geq 2,5$  с или с постоянными времени  $\geq 3,5$  с обычно можно использовать более простые измерительные устройства. В испытательной установке (рис. 7.24) вода при помощи термостатов с циркуляцией в противоположных направлениях доводится до постоянных температур  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ . Термометр установлен на подвижной раме и может быть в течение примерно 0,2 с перемещен из одного сосуда в другой. Продолжительность переходного процесса после скачка температуры составляет около 0,35 с, так что можно хорошо измерять времена выхода на половинное от установившегося значение до 2,5 с в воде со скоростью потока 0,4 м/с. Небольшие помехи могут

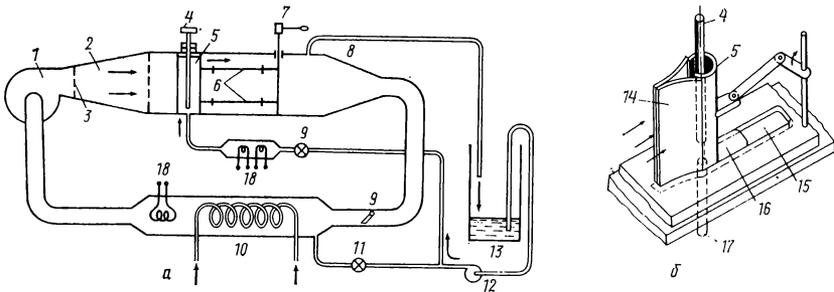


Рис. 7.23. Испытательная установка для определения переходной функции неподвижных термометров в воде методом заслонки (по Хунке):

*a* — конструкция испытательной установки; *b* — конструкция и принцип действия заслонки: 1 — центробежный насос; 2 — диффузор, 3 — успокоительная решетка; 4 — термометр; 5 — трубчатый корпус заслонки; 6 — тяга; 7 — привод заслонки; 8 — перепуск; 9 — дроссель; 10 — охлаждающий змеевик; 11 — вентиль; 12 — вспомогательный насос; 13 — бак; 14 — резиновые лепестки заслонки; 15 — направляющие, 16 — каретка; 17 — теплая вода; 18 — нагреватель

возникнуть вследствие того, что температура воды кратковременно немного изменится, когда заполненная водой рама передвигается из одного сосуда в другой. Кроме того, необходимо следить, чтобы термометр был полностью погружен в воду и образование завихрений не влияло на теплообмен. Такие завихрения могут образоваться в результате соприкосновения воды с воздухом на задней по ходу перемещения рамы стороне термометра у поверхности воды.

При использовании испытательных установок, работающих по методу нагревательной решетки или методу заслонки, при повторных измерениях с одним и тем же термометром могут возникнуть погрешности измерения порядка 3%. При повторных измерениях на такой установке необходимо учитывать, что в зависимости от конструкции термометра — с защитным чехлом или без него — могут появиться погрешности измерения до 5%. На некоторых применяемых до настоящего времени установках погрешности измерения могут достигать 10% [7.31 и 7.34]. Разброс значений между отдельными термометрами могут, однако, составлять 20% и более, так как теплоотдача от измеряемой среды к термометру и теплопередача через термометр могут быть у разных экземпляров различными. Этот разброс объясняется допусками на размеры термометров, а также неизбежными термическими сопротивлениями в защитных чехлах и измерительных вставках, обуславливаемыми преимущественно различными наслоениями вследствие окисления и отложений. Обычно разброс тем меньше, чем стабильнее качество исполнения термометров, как это наблюдается у термопар с чехлами и у неармированных термопар (сравни табл. 7.4, 2е).

Если необходимо определить временные характеристики в цеховых условиях, то можно быстро погрузить термометр в измеряемую среду. При таких измере-

ниях в соляных ваннах необходимо изменять температуру от более высокой к более низкой, с тем чтобы предотвратить кристаллизацию соли на более холодном термометре [7.33]. Напротив, при измерениях в сжиженных газах следует перемещать термометр из среды с более низкой температурой в среду с более высокой температурой, с тем чтобы переходная функция не искажалась вследствие явлений кипения на поверхности термометра [7.37].

Очень малые времена переходных процессов в воздухе с постоянными времени, составляющими лишь несколько миллисекунд, можно определить следующим образом: через тонкую проволочную петлю, к которой прикреплена тонкая

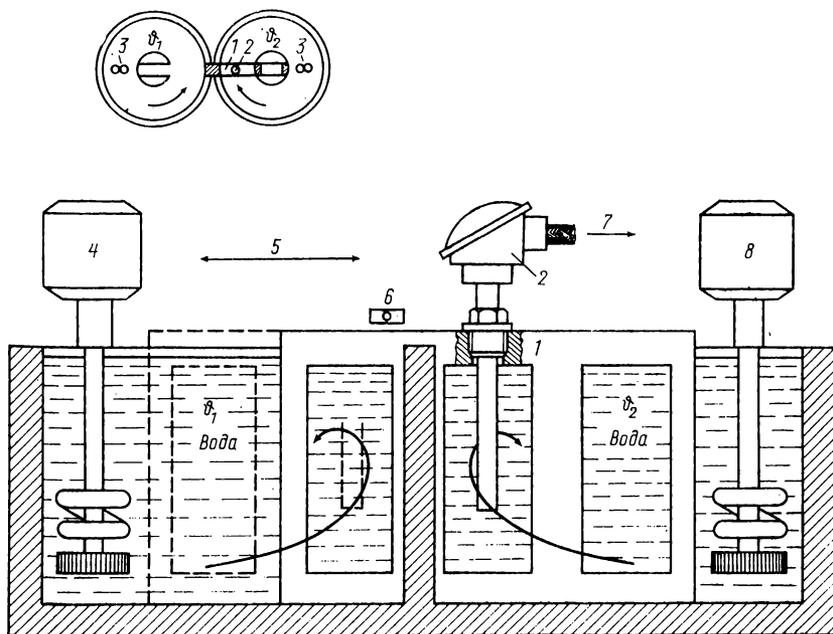


Рис. 7.24. Испытательная установка для определения переходной функции термометров в воде с двумя сосудами (по Ванвор—Гереесу):

1 — подвижная рама; 2 — термометр; 3 — циркуляционный термостат с приводом; 4 — циркуляционный термостат для  $\varnothing_1$ ; 5 — направление движения рамы; 6 — датчик положения рамы для самописца; 7 — к самописцу; 8 — циркуляционный термостат для  $\varnothing_2$ .

термопара, заряжают конденсатор и осциллографируют изменение напряжения [7.38]. Использовалось также устройство, при помощи которого можно было погружать в жидкость чрезвычайно тонкие термопары за 15 мкс. С его помощью можно было с различными термопарами с ленточными термоэлектродами толщиной 0,005 мм и шириной 0,3—0,4 мм определять постоянные времени до 1 мс методом осциллографирования [7.39]. Вместо того чтобы снимать переходную функцию, можно также определить временные характеристики термометра путем определения изменения частоты. Для этой цели можно, используя метод нагревательной решетки, путем соответствующего регулирования тока задать потоку воздуха любые функции температура—время, например синусоидальные колебания [7.34 и 7.35]. Для проверки малоинерционных термометров сопротивление их включали в мостовую схему, питаемую постоянным и одновременно переменным током изменяющейся частоты. На основе зависящего от частоты демпфирования можно было определить постоянные времени порядка всего лишь 8 мс [7.40].

### 7.3.5. ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИЯ ПРИ ЗАВИСЯЩИХ ОТ ВРЕМЕНИ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

При зависящих от времени изменениях температуры измеряемой среды, особенно при быстро изменяющихся или переменных температурах, как например при процессах нагрева и охлаждения или при автоматическом регулировании температуры, показания термометра вследствие замедляющего действия теплопередачи от измеряемой среды к датчику следуют с запаздыванием. При экспоненциальном характере изменения температуры измеряемой среды термометр принимает установившееся значение температуры с нулевой динамической погрешностью, однако с запаздыванием  $\varepsilon_t$  (рис. 7.25, б). Если же температура измеряемой среды изменяется линейно во времени или если происходят периодиче-

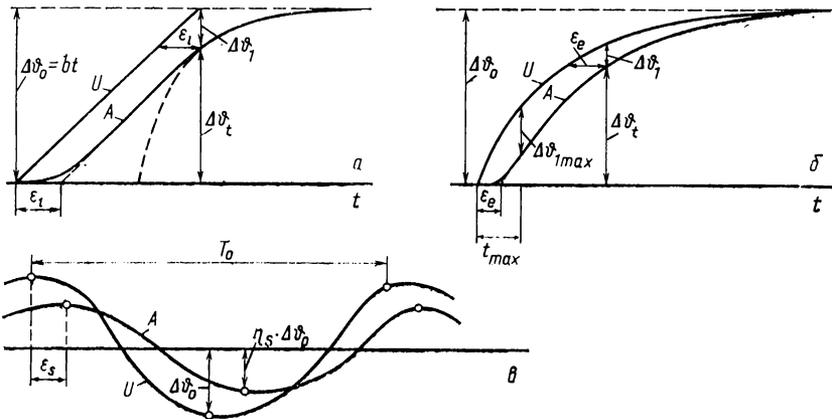


Рис. 7.25. Динамические (временные) характеристики термометров при зависящих от времени изменениях температуры измеряемой среды:

*a* — линейное повышение температуры; *б* — экспоненциальное повышение температуры; *в* — периодические изменения температуры; *U* — изменение температуры измеряемой среды; *A* — показания термометра

ские изменения температуры, то динамическая погрешность подчиняется более сложным законам (см. рис. 7.25, *a* и *в*). Так же как и сами переходные функции, динамические погрешности могут быть вычислены путем интегрирования общего дифференциального уравнения теплопроводности [7.41 и 7.42].

Подобно переходной функции динамическая погрешность измерения зависит от конструкции и от свойств материалов термометра, а также от коэффициента теплоотдачи. Поэтому динамическую погрешность измерения в таких случаях можно вычислить по переходной функции или при помощи дискретных пар значений  $(t, \eta)$ , таких как время выхода на половинное от установившегося значения или постоянная времени. Наоборот, по результатам измерений динамической погрешности, зависящих от времени изменений температуры, можно вычислить переходную функцию.

При зависящих от времени изменениях температуры измеряемой среды можно для термометров с усредняющим действием принимать в расчетах с достаточной точностью экспоненциальный характер переходных характеристик термометра. Динамическую погрешность измерения температуры можно при этих условиях определить по продолжительности выхода на половинное от установившегося значения  $t_{0,5}$  или по постоянной времени  $\tau$ .

### 7.3.5.1. ЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ

Если принять в качестве основы экспоненциальный характер переходной функции, то при линейных изменениях температуры измеряемой среды  $\Delta\vartheta_0 = bt$  получают изменение температуры термометра  $\Delta\vartheta_t = f(t)$  независимо от характеристик материалов и размеров термометра с использованием уравнения (7.45) для постоянной времени  $\tau$  по дифференциальному уравнению:

$$\tau \frac{d\Delta\vartheta_t}{dt} + \Delta\vartheta_t = bt, \quad (7.57)$$

$$\Delta\vartheta_t = b [t - \tau (1 - e^{-t/\tau})]. \quad (7.58)$$

При  $t \gg \tau$  получим

$$\Delta\vartheta_t = b(t - \tau). \quad (7.59)$$

Динамическая погрешность измерения температуры  $\Delta\vartheta_1$  (см. рис. 7.25, а) получится как разность между изменением температуры измеряемой среды  $\Delta\vartheta_0 = bt$  и величиной  $\Delta\vartheta_t$  по уравнению (7.59)

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_0 - \Delta\vartheta_t = bt - b(t - \tau) = b\tau \quad (7.60)$$

и, как видно, не зависит от времени  $t$ . Относительная динамическая погрешность равна

$$\varphi_1 = \Delta\vartheta_1 / \Delta\vartheta_0 = b\tau / bt = \tau / t. \quad (7.61)$$

Запаздывание  $\varepsilon_t$  показаний температуры получается в соответствии с рис. 7.25 из зависимости  $\varepsilon_t / \Delta\vartheta_1 = t / \Delta\vartheta_0$  и с учетом уравнения (7.61) равно

$$\varepsilon_t = \tau = \varphi_1 t. \quad (7.62)$$

Таким образом, при линейном подъеме температуры запаздывание равно постоянной времени  $\tau$ .

Погрешность для начала подъема температуры измеряемой среды можно вычислить по уравнению (7.58). После внезапного прекращения нагрева разность температур  $\Delta\vartheta_1$  снижается в экспоненциальной зависимости от времени (см. рис. 7.25, а).

### 7.3.5.2. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ

Если температура измеряемой среды изменяется во времени экспоненциально с постоянной времени  $\tau_m$ , т. е. в соответствии с зависимостью

$$\Delta\vartheta_{t_m} = \Delta\vartheta_0 (1 - e^{-t/\tau_m}), \quad (7.63)$$

где  $\Delta\vartheta_0$  представляет собой изменение температуры измеряемой среды в момент времени  $t = \infty$ , то из дифференциального уравнения

$$\tau \frac{d\Delta\vartheta_t}{dt} + \Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 (1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (7.64)$$

измеренное термометром изменение температуры в момент времени  $t$  будет равно

$$\Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 \left( 1 - \frac{\tau_m e^{-t/\tau_m} - \tau e^{-t/\tau}}{\tau_m - \tau} \right). \quad (7.65)$$

При  $\tau_m \gg \tau$  и  $t \gg \tau$  получим

$$\Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 \left( 1 - \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau} e^{-t/\tau_m} \right), \quad (7.66)$$

т. е. при экспоненциальном характере изменения температуры измеряемой среды измеренное термометром изменение температуры следует с постоянным запаздыванием  $\varepsilon_t = \tau$  в соответствии с рис. 7.25, б.

Соответствующая относительная динамическая погрешность  $\varphi_e = \frac{\Delta\vartheta_t}{\Delta\vartheta_0} = \frac{\Delta\vartheta_{t_m} - \Delta\vartheta_t}{\Delta\vartheta_0}$  получается как разность изменения температуры измеряемой среды  $\Delta\vartheta_{t_m}$  по уравнению (7.63) и измеренного термометром изменения температуры по уравнению (7.63):

$$\varphi_e = \frac{\Delta\vartheta_0 (1 - e^{-t/\tau_m}) - \Delta\vartheta_t}{\Delta\vartheta_0} = \frac{\tau}{\tau_m - \tau} (e^{-\tau/t_m} - e^{-t/\tau}). \quad (7.67)$$

При  $\tau_m \gg \tau$  и  $t \gg \tau$  получим

$$\varphi_e = \frac{\tau}{\tau_m - \tau} e^{-t/\tau_m}. \quad (7.68)$$

Эта погрешность достигает максимума  $(\varphi_e)_{\max}$  в момент времени

$$t_{\max} = \frac{\tau_m \tau}{\tau_m - \tau} \frac{\ln \tau_m}{\tau}. \quad (7.69)$$

При  $\tau_m \gg \tau$  из уравнения (7.68) получим

$$(\varphi_e)_{\max} = \frac{\tau}{\tau_m - \tau}. \quad (7.70)$$

Если в процессе повышения температуры при заданной постоянной времени  $\tau_m$  измеряемой среды динамическая погрешность не должна превышать некоторое значение  $(\varphi_e)_{\max}$ , то необходимая для этого постоянная времени термометра может быть получена из уравнения (7.70).

### 7.3.5.3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ

При периодических изменениях температуры измеряемой среды по синусоидальной функции (см. рис. 7.25, в), т. е. в соответствии с дифференциальным уравнением

$$\tau \frac{d\Delta\vartheta_t}{dt} + \Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 \sin \frac{2\pi t}{T_0}, \quad (7.71)$$

измеренное термометром изменение температуры будет равно

$$\Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 \cos \varepsilon_s \sin \left( \frac{2\pi t}{T_0} - \varepsilon_s \right). \quad (7.72)$$

Здесь  $\varepsilon_s$  — смещение фазы (запаздывание), выраженное в долях периода  $T_0$ , равно

$$\varepsilon_s = \arctg \frac{2\pi\tau}{T_0}. \quad (7.73)$$

Кроме смещения фазы при периодических изменениях температуры (см. рис. 7.25, в), необходимо также учитывать демпфирование показаний  $\eta_s$ . Оно равно отношению амплитуды колебаний температуры термометра  $(\Delta\vartheta_t)_{\max}$  к амплитуде колебаний температуры измеряемой среды. В соответствии с уравнениями (7.72) и (7.73) получим

$$\eta_s = \frac{(\Delta\vartheta_t)_{\max}}{\Delta\vartheta_0} = \cos \varepsilon_s = \cos \arctg \frac{2\pi\tau}{T_0}. \quad (7.74)$$

Во всех приведенных уравнениях для динамических характеристик термометра при зависящем от времени изменении температуры измеряемой среды при экспоненциальной переходной функции можно для расчета погрешности использовать величину  $t_{0,5}$ . При этом взамен  $\tau$  в расчетные уравнения надо подставлять величину  $t_{0,5}/0,693$ .

Для периодических изменений температуры измеряемой среды взаимосвязи между затуханием и смещением фазы в зависимости от параметров  $aT_0/X^2$  и  $h^2aT_0$  выведены из общих законов теплопередачи по Грёберу [7.41]. Поскольку переходные функции при значениях  $hX > 0,16$  не являются строго экспонен-

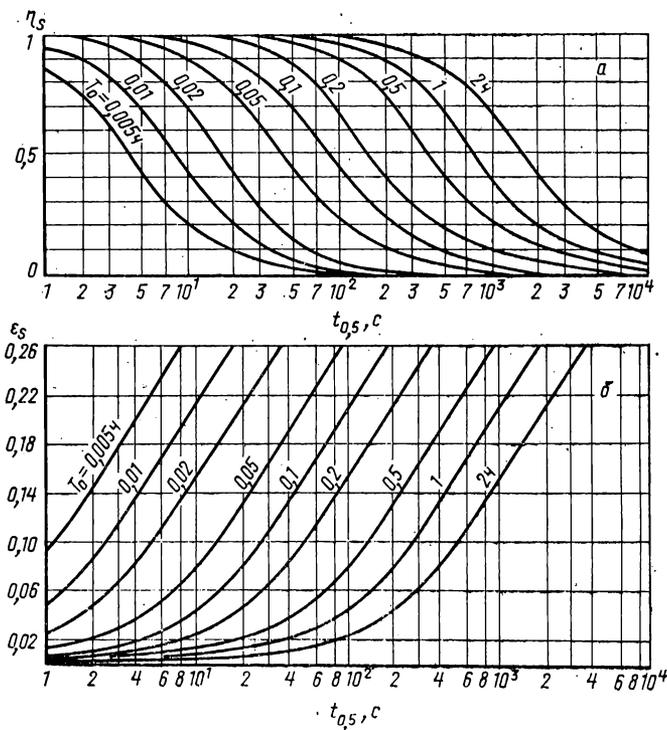


Рис. 7.26. Демпфирование  $\eta_s$  (а) и смещение по фазе  $\epsilon_s$  долей продолжительности периода (б) при периодических изменениях температуры измеряемой среды в зависимости от времени выхода на половинное от установившегося значения  $t_{0,5}$ , с, и длительности периода  $T_0$ , ч

циальными (см. рис. 7.18), следует ожидать соответствующих отклонений и во взаимосвязи между демпфированием и смещением фазы. Эти отклонения при известной длительности периода  $T_0$  для термометров с усредняющим действием по смещению фазы  $\epsilon_s$  и демпфированию  $\eta_s$  составляют максимум 10%, что для такого рода измерений обычно допустимо. На рис. 7.26, а и б зависимости  $\eta_s$  от  $t_{0,5}$  при различных значениях  $T_0$  (в часах) указаны в виде средних значений, которые получаются из рассчитанных взаимосвязей между  $aT_0/X^2$  и  $h^2aT_0$  [7.26].

Из зависимости между  $aT_0/X^2$  и  $h^2aT_0$  для определения демпфирования и смещения фазы при периодических изменениях температуры можно вычислить динамическую погрешность, а также запаздывание показаний, если температура объекта изменяется линейно во времени. Отклонения результатов по сравнению со значениями по уравнениям (7.58) и (7.59) составляют при больших значениях

$hX$  также около 10%, так что эти уравнения часто оказываются вполне приемлемыми по точности для определения характеристик термометра [7.42].

Если у термометров поверхностного действия  $hX < 0,16$ , т. е. при хорошей внутренней теплопередаче термометра и при небольших коэффициентах теплоотдачи, то можно определять зависящие от времени изменения температуры так же, как и для термометров с усредняющим действием по величине  $t_{0,5}$  или по постоянной времени  $\tau$ . Если, напротив,  $hX > 0,16$ , то для термометров поверхностного действия необходимо знать эквивалентную теплопроводность данного термометра  $\lambda_m$  и  $sr$  ( $\lambda_m$  можно оценить по параметру термометра  $V_T$  [7.15]). В большинстве случаев можно также определить величину  $sr$ . По вычисленным значениям  $hX$  и  $h^2at$  для линейных или  $aT_0/X^2$  и  $h^2aT_0$  для периодических изменений температуры в таких случаях необходимо вычислять погрешность измерения температуры, запаздывание, демпфирование и смещение фазы по семействам кривых, приводимых для этих случаев Грёбером (см. рис. 7.17) [7.29 и 7.30].

Для не строго гармонических, например зигзагообразных колебаний, демпфирование и смещение фазы при одинаковых характеристиках термометров не сильно отличаются от значений для гармонических колебаний [7.41]. Поэтому для оценки временных характеристик при всех периодических формах колебаний обычно достаточно использовать приведенные на рис. 7.26 семейства кривых.

Уравнения для линейных и периодических изменений температуры измеряемой среды позволяют найти для заданной продолжительности нагрева или длительности периода изменения температуры измеряемой среды такой термометр, динамической погрешностью которого можно пренебречь. Если же необходимо использовать термометры с большой продолжительностью переходного процесса, например в связи с большими механическими нагрузками, то по значению  $t_{0,5}$  термометра и по длительности периода колебаний температуры измеряемой среды можно найти ориентировочные максимальные и минимальные ее значения.

Пример. Задана амплитуда колебаний температуры измеряемой среды  $\pm 5$  К при регулировании и длительность периода  $T_0$ , равная 0,02 ч (72 с). В соответствии с рис. 7.26, а и б, термометр должен иметь  $t_{0,5}$  менее 2 с, чтобы отсутствовала динамическая погрешность ( $\eta_s = 1$  и  $\epsilon_s < 0,05$ ). Однако, если  $t_{0,5}$  термометра составляет 7 с, тогда  $\eta_s = 8$  и  $\epsilon_s = 0,13$ . В этом случае колебания показаний термометра будут составлять максимум  $0,8 \cdot 5$  К = 4 К, т. е. колебания температуры измеряемой среды не будут превышать  $\pm 5$  К.

Записанные с помощью осциллографа и пленочных металлических термометров сопротивления результаты изменения температуры стенок цилиндров поршневых двигателей при частоте колебаний до 4000 Гц показали, что температура стенок цилиндров измерялась практически без динамической погрешности [7.23 и 7.43].

## **7.3.6. АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО НАЙДЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ ПОСРЕДСТВОМ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ**

### **7.3.6.1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ**

Для анализа записанной переходной функции термометр, находящийся в измеряемой среде, рассматривают как аккумулятор тепла, состоящий из одного или нескольких элементов сопротивления или аккумулирующих элементов по аналогии с электрическими звеньями  $RC$ . Переходные функции первого порядка имеют устройства, состоящие только из одного звена  $RC$  с постоянной времени  $\tau$ . Для переходных функций, которые описываются не чистой экспонентой, можно приблизительно составить теплоэлектрические схемы замещения с несколькими последовательно или параллельно включенными звеньями  $RC$ . При этом получают переходные функции высшего порядка с несколькими эквивалентными

постоянными времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и т. д., которые являются функциями  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $c$  и  $\rho$ , а также конструкции термометра. Тогда переходная функция по аналогии с уравнением (7.45) может быть представлена в форме

$$1 - \eta(t) = -\varphi(t) = \frac{\vartheta_2 - \vartheta t}{\vartheta_2 - \vartheta_1} = C_1 e^{-t/\tau_1} + C_2 e^{-t/\tau_2} + \dots \quad (7.75)$$

Такие переходные функции высшего порядка дают (см. рис. 7.16) после скачка температуры измеряемой среды или сильно замедленные, или же сильно ускоренные изменения измеряемой температуры в начале переходного процесса [7.44—7.46].

### 7.3.6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аналитически выражение для временной характеристики можно получить также методом изменения частоты. Для этой цели в измеряемый объект вводят синусоидальные возмущающие сигналы различной частоты. По амплитудам входной и выходной величин, а также по разности их фаз получают годограф амплитуднофазовой частотной характеристики и по нему находят передаточную функцию  $F(p)$  при условии линейности характеристик объекта. По  $F(p)$  можно вычислить переходную функцию  $\eta(t)$  путем обратного преобразования Лапласа по выражению  $F(p) = pL[1 - \eta(t)] = pL[-\varphi(t)]$ . Здесь  $p$  — комплексная частота. При условии, что переходную функцию можно аппроксимировать по двум постоянным времени и одному общему замедлению  $n$ -го порядка, она может быть представлена в следующем виде:

$$F(p) = \frac{K_p}{(\tau_1 p + 1)(\tau_1 b p + 1)^{n-1}}, \quad (7.76)$$

где  $K_p$  — коэффициент передачи,  $\tau_1 b = \tau_2$  [7.47, а также 7.35 и 7.35а].

Можно и наоборот по известной переходной функции и по полученному по ней отношению  $i_{0\vartheta}/i_{0\vartheta}$  определить средоточную функцию, пригодную для анализа процессов регулирования [7.45].

### 7.3.6.3. АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ПОМОЩИ КАСАТЕЛЬНОЙ В ТОЧКЕ ПЕРЕГИБА ПО ВРЕМЕНАМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И ВЫРАВНИВАНИЯ

В соответствии с рис. 7.16, а можно при помощи касательной в точке перегиба определить время запаздывания  $T_u$  и время выравнивания  $T_G$  в качестве характеристик переходной функции [7.48]. Если переходная функция начинается по сравнению с моментом скачка температуры измеряемой среды с опозданием на время транспортного (чистого) запаздывания  $T_t$ , его необходимо учитывать. Обычно его можно оценить по записанной переходной функции. По этим характеристикам для передаточной функции второго порядка можно аппроксимировать ее ход двумя экспонентами с постоянными времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  [7.49].

### 7.3.6.4. ГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ ПУТЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ В ПОЛУЛОГАРИФМИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

Лучшее приближение получают путем графического изображения в полупрологарифмических координатах динамической погрешности  $-\varphi(t)$  в соответствии с рис. 7.16, б. Благодаря этому можно определить простым способом важнейшие параметры переходной функции, коэффициенты  $C$  и эквивалентные по-

стоянные времена  $\tau_1$  и  $\tau_2$  [уравнения (7.75), (7.46) и (7.45), а также (7.35a)]. При изображении переходной функции в полулогарифмических координатах она может быть приближенно заменена прямой для экспоненциальной функции с эквивалентной постоянной времени  $\tau_1$  [7.50]. Начальная область экспоненциальной кривой для термометров с «временами запаздывания  $T_n$ » характеризуется параметром  $T_n$ , а также «погрешностью опережения  $-\varphi_s$ » и «погрешностью запаздывания  $-\varphi_n$ ». Термометры с «временами опережения  $T_s$ » характеризуются в этой начальной области, кроме параметра  $T_s$ , также «входной погрешностью  $-\varphi_e$ » и «начальным временем  $T_e$ ». Значения  $\tau_1$ , а также  $T_n$  и  $-\varphi_s$  или значения  $T_s$ ,  $T_e$  и  $-\varphi_e$  могут быть вычислены по отношению времен переходного процесса, например  $t_{0,9}/t_{0,5}$  [7.32], или определены по точкам пересечения прямых с абсциссой или ординатой (см. рис. 7.16, б).

Для того чтобы определить характер переходной функции, прежде всего в ее начальной области для термометров, отношение времен переходных процессов  $t_{0,9}/t_{0,5}$  которых находится в пределах от 2,3 до 5, часто можно удовлетвориться определением двух постоянных времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  [7.46]. Тогда с коэффициентами  $C_1 = -\varphi_s$  и  $C_2 = [(-\varphi_s) - 1]$  по уравнению (7.75) получают динамическую погрешность  $-\varphi(t)$ , равную

$$-\varphi(t) = 1 - \eta(t) = \frac{\vartheta_2 - \vartheta t}{\vartheta_2 - \vartheta_1} = (-\varphi_s) e^{-t/\tau_1} - [(-\varphi_s) - 1] e^{-t/\tau_2} = a - b. \quad (7.77a)$$

Из этого для пары значений, определяемой по изменению переходного процесса ( $T_n$ ;  $-\varphi_n$ ), получают

$$[(-\varphi_s) - 1] e^{-T_n/\tau_2} = (-\varphi_s) e^{-T_n/\tau_1} - (-\varphi_n). \quad (7.78a)$$

По вычисленной или определенной графическим путем постоянной времени  $\tau_1$  можно по уравнению (7.78a), используя величины  $T_n$ ,  $\varphi_n$  и  $\varphi_s$ , вычислить постоянную времени  $\tau_2$ . Разность  $a - b$  в уравнении (7.77a) дает характер изменения динамической погрешности  $-\varphi(t) = 1 - \eta(t)$  и, следовательно, переходной функции  $\eta(t)$ .

Для переходных функций с опережением справедливы те же зависимости. Взамен  $-\varphi_s$  и  $-\varphi_n$  необходимо подставлять значение для  $-\varphi_e$ , а взамен  $T_n$  — продолжительность переходного процесса  $T_e$ . Тогда целесообразно использовать уравнения в форме

$$-\varphi(t) = (-\varphi_e) e^{-t/\tau_1} + [1 - (-\varphi_e) e^{-t/\tau_2}] = a + b \quad (7.77б)$$

и

$$[1 - (-\varphi_e)] e^{-T_e/\tau_2} = (-\varphi_e) - (-\varphi_e) e^{-T_e/\tau_1}. \quad (7.78б)$$

Графически определить  $\tau_1$  и  $\tau_2$  можно по рис. 7.27, а и б. Для отношения времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5} < 2,5$  динамическая погрешность  $-\varphi(t)$  в начальной области экспоненциальной кривой больше 1. Если рассмотреть время, в течение которого  $-\varphi(t)$  достигнет значения 0,99 или  $\eta(t)$  — значения 0,01, как эквивалентное транспортное запаздывание  $T_t$  (на рис. 7.27, а оно равно 0,20), то вычисленные отклонения от заданных динамических погрешностей остаются во всей начальной области меньше 0,015. Для отношений времени переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5}$  выше 2,5 не требуется учитывать время транспортного запаздывания. В экспоненциальной области до времени переходного процесса  $t_{0,9}$  отклонения остаются пренебрежимо малыми. Для времени переходного процесса  $t_{0,95}$  они находятся между 3; 0 и 3%, а для времени  $t_{0,98}$  — между 10; 0 и 8% заданных значений переходной функции, если величина отношения времен переходного процесса  $t_{0,9}/t_{0,5}$  лежит в области 2,3; 3,32 и 4,3.

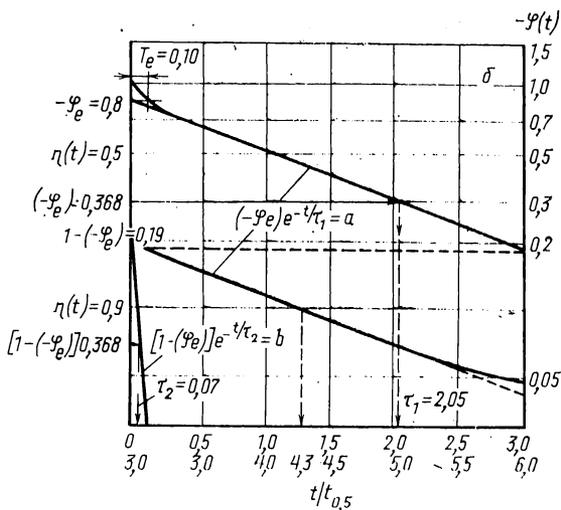
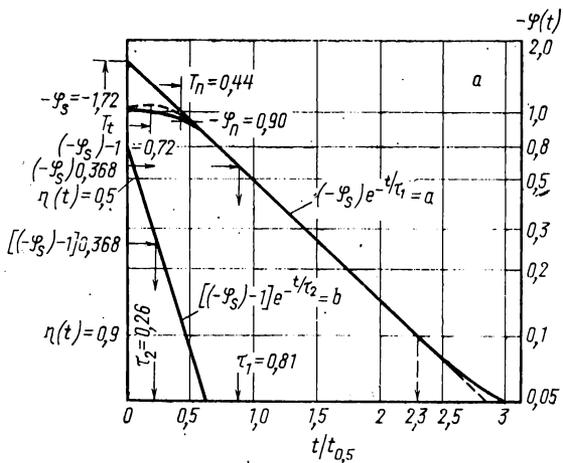


Рис. 7.27. Графическое определение коэффициентов и эквивалентных постоянных времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  термометров в данной измеряемой среде по переходным функциям: *a* — для термометров усредняющего действия [переходная функция для  $t_{0,9}/t_{0,5} = 2,3$  по рис. 7.20, б при времени запаздывания  $T_n$ . Расчет динамической погрешности по уравнениям (7.77а) и (7.78а) по разности  $(a - b)$ ;  $-\varphi_s$  — погрешность опережения]; *б* — для термометров поверхностного действия [переходная функция для  $t_{0,9}/t_{0,5} = 4,3$  по рис. 7.20, б с начальным временем  $T_e$ . Расчет динамической погрешности по уравнениям (7.77б) и (7.78б) по сумме  $(a + b)$  —  $\varphi_e$  — начальная погрешность]

Для термометров, у которых переходные функции с временем запаздывания  $T_n$  или начальным временем  $T_e$  в этих точках переходят в прямую, соответствующую экспоненциальному закону (прежде всего термометры типов I, II и IV по рис. 7.21 и табл. 7.7), при графическом методе получается хорошее совпадение результатов в начальной и конечной областях переходной функции.

### 7.3.6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРУГИХ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОКРАЩЕНИЯ

Вместо того чтобы определять запаздывание или опережение ( $T_n$  или  $T_s$ ) или же транспортное запаздывание в начальной области  $T_t$  и две постоянные времени, можно применить метод последовательного повторения постепенного снижения переходной функции (метод последовательного сокращения) для определения других постоянных времени. Таким образом, можно также аппроксимировать переходную функцию в начальной области, например для  $t_{0,99}$  [7.51 и 7.35a].

Если переходная функция в начальной области проходит сначала с запаздыванием  $T_n$  и затем после точки перегиба становится более пологой, так что отношение переходных времен  $t_{0,9}/t_{0,5} > 3,5$  (см. табл. 7.7 тип III для воды и тип V для воды или для воздуха), то этот метод можно также применять, если значение имеет прежде всего начальная область переходной функции примерно до точки перегиба, нанесенной в полулогарифмических координатах. Он может также использоваться, если необходимо аналитическим путем охватить прежде всего область от точки перегиба до конечной точки ( $\eta = 1$ ).

### 7.3.6.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ ПРИ ПОМОЩИ ТАБЛИЦЫ ТИПОВЫХ ФУНКЦИЙ

Если в двойном логарифмическом масштабе нанести не переходную погрешность  $-\phi(t)$ , а переходную функцию  $\eta(t)$ , то можно по таблице типовых функций определить искомую функцию. В этой таблице даны для различных передаточных функций соответствующие им переходные функции. Для переходных функций с запаздыванием из таблицы определяют порядок и характеристики передаточной функции обычно с достаточной для решения практических задач точностью [7.52].

### 7.3.6.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ ПО АЛГОРИТМУ

Параметры передаточной функции  $F(p)$  для всего диапазона переходной функции с запаздываниями  $T_u$  и  $T_n$  получают по уравнению (7.76). Пусть для полученной опытным путем переходной функции, например для отношения  $t_{0,95}/t_{0,5}$ , получено значение 2,55. По составленной для этого отношения диаграмме получают порядок  $n = 3$  при значении  $b = 1/2,5$ . По таблице можно для этой величины  $b$  найти отношение нескольких полученных опытным путем времен переходного процесса  $t_\eta$  к постоянным времени  $\tau_1$ , т. е.  $t_\eta/\tau_1$ , и таким образом найти  $\tau_1$ . Если окажется, что найденные таким образом значения  $\tau_1$  при различных значениях  $t_\eta$  имеют слишком большое рассеяние, необходимо повторить весь расчет для следующего более высокого порядка, а при некоторых обстоятельствах даже для еще более высокого порядка. Пусть для порядка  $n = 5$  получены хорошо совпадающие значения  $\tau_1$ . По ним получают с определенным для этого случая значением  $b = 1/5,2$ , например постоянную времени  $\tau_1 = 4,25$  с. Тогда  $\tau_2$  будет равна  $\tau_1 b = 4,25 \cdot 1/5,2 = 0,8$  с. Таким образом, характеристики передаточной функции по уравнению (7.76) определены. В качестве исходного значения для расчета, а также для контроля могут быть выбраны и другие условия перехода, например  $t_{0,1}/t_{0,5}$ . Этот метод дает также только аппроксимацию передаточной функции, так как принимается определенное распределение тепловых емкостей и термических сопротивлений [7.47 и 7.35a].

## 7.4. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ НАГРЕВА ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Зависимость погрешности измерения вследствие нагрева (см. 3.2.2.4) от конструкции термометра сопротивления обычно трудно рассчитать. Зачастую трудно определить эту погрешность в любых средах опытным путем. Однако при проектировании измерительных устройств желательно иметь представление о величине погрешности измерения вследствие нагрева для выбранного термометра. Поскольку на эту погрешность оказывает влияние теплопередача, можно оценить величину погрешности, которую можно ожидать в любых средах при любых давлениях и скоростях потоков. Для этой цели необходимо знать, как и при определении временных характеристик в любых средах, погрешность измерения вследствие нагрева термометра в воздухе  $E_I$  и в воде  $E_w$ , а также коэффициенты теплоотдачи в воздухе  $\alpha_I$ , в воде  $\alpha_w$  и в измеряемой среде  $\alpha_x$ . Погрешность измерения вследствие нагрева термометра  $E_x$  вычисляются так же, как и время переходного процесса  $t_x$  по приведенной на рис. 7.9 зависимости  $e_x/E_I = 1/\alpha_{xs}''$  при помощи параметра  $VT_E$ , как указано в табл. 7.5 [7.15].

Если теплоотдача в среде  $x$  значительно меньше, чем в воде, погрешность измерения вследствие нагрева термометра можно определить также в соответствии с зависимостью

$$E_x = \frac{\alpha_I}{\alpha_x} (E_I - E_w) + E_w. \quad (7.79)$$

Это приближенное уравнение получается таким же образом, как уравнение (7.55) для определения времени переходного процесса в любых средах [7.53].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 7.1. Gröber, H., Erk, S.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Aufl. von Grigull U. Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1963.
- 7.2. Schack, A.: Der industrielle Wärmeübergang. 7. Aufl., Düsseldorf, 1969.
- 7.3. Anhaltzahlen für die Wärmewirtschaft in Eisenhüttenwerken. Hrsg. vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahl-Eisen, 6. Aufl., Düsseldorf, 1968.
- 7.4. VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1955, 1957, 1963; 2. Auflage 1974.
- 7.5. Knoblauch, O., Hencky, K.: Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen. München-Berlin, 1926, Nachdruck 1941.
- 7.6. Hencky, K.: Zur Technik der Temperaturmessungen. Z. VDI 68 (1924), S. 297-301.
- 7.7. Reiher, H., Cleve, K.: Temperaturmeßfehler bei strömenden Gasen. Z. VDI 69 (1925). Ergänzungsheft Techn. Mechanik S. 49-57 sowie Temperaturmeßfehler in Gasen und überhitzten Dämpfen durch Wärmeableitung von der Meßstelle. Arch. Wärmewirtschaft 7 (1926), S. 273-278.
- 7.8. Tewes, W.: Temperaturmeßfehler in strömenden Gasen durch Wärmeableitung und Wärmeabstrahlung von der Meßstelle. Arch. Wärmewirtschaft 19 (1938), S. 189-191.
- 7.9. Closterhalpen, A.: Meßfehler bei Thermometer-Einbauten. Forsch. Ing. Wes. 9 (1938), S. 279-286.
- 7.10. Millar, N. P.: Heat-flow effects in a resistance type thermometer. Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs 64 (1945), S. 678-685.
- 7.11. Fischer, J.: Temperaturfühler und Strahlungsempfänger. Z. techn. Phys. 22 (1941), S. 316-323.
- 7.12. Tewes, W.: Temperaturfehler in strömenden Gasen und Dämpfen. Z. techn. Phys. 22 (1941), S. 160-167.
- 7.13. Rudolph, H.: Einfluß der Wärmeübertragungsbedingungen auf die Meßgenauigkeit eines Temperaturfühlers. Arch. techn. Messen V 2165-5 Febr. 1969; V 2165-6 März 1969.
- 7.14. Haas, A.: Stationary temperature distribution in thermometer protecting tubes. Acta Techn. Hung. 51 (1965), S. 291-308.
- 7.15. Lieneweg, F.: Die Bestimmung von Temperaturmeßfehlern mittels Thermometer Kennzahlen. Festschrift, 100 Jahre Heraeus. Hrsg. von W. C. Heraeus, Hanau. Frankfurt 1951, S. 243-268, ferner Allg. Wärmetechn. 2 (1951), S. 238-249.
- 7.16. Euler, H., Guthmann, K.: Fehler bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen. Hinweise für den praktischen Gebrauch von Thermoelementen und Schutzrohren. Arch. Eisenhüttenwesen, 9 (1935/36), S. 73-90.

- 7.17. *Moeller, F.*: Oberflächenmessung der Temperatur; Berechnung der Wärmeströmung in das Thermometer. Arch. techn. Messen V 2162—2 Juli 1949.
- 7.18. *Moeller, F., Meyer, H.*: Oberflächen-Temperaturmessung; Fehler bei der Messung mit Thermoelementen. Arch. techn. Messen V 2162—4 Dez. 1962 und V 2162—5 Jan. 1963.
- 7.19. *Teunis, G.*: Messung von Oberflächentemperaturen mit Berührungsthermometern. VDI—Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung. Düsseldorf 1966, S. 103—108.
- 7.20. Richtlinie VDE/VDI 3511: Technische Temperaturmessungen. 3. Aufl. Düsseldorf, 1967.
- 7.21. *Watson, G. G.*: Techniques for measuring surface temperature (mit zahlreichen Literaturangaben). Instrum. Practice, Part 1 (1966), S. 217—225, Part 2 (1966), 4, S. 335—341, Part 3 (1966), 5, S. 447—451; Part 4 (1966), 6, S. 517—524, Part 5 (1966), 8, S. 679—684, Part 6 (1966) 9, S. 751—758.
- 7.22. *Baker, H. D., Ryder, E. A., Baker, N. H.*: Temperature measurement in engineering. Vol. 1, New York und London, 1953.
- 7.23. *Meier, A.*: Messung schnell veränderlicher Zylinderwandtemperaturen. Forsch. Ing. Wes. 10 (1939), A, S. 41—54.
- 7.24. *Löffler, H., Henrich, H.*: Die Messung von Oberflächentemperaturen mit aufgedampften Widerstandsthermometern. Chem. Ing. Techn., 30 (1958), S. 708—714.
- 7.25. *Lück, W.*: Berührungslose Oberflächentemperaturmessung in der Verfahrensindustrie. VDI—Verichte Nr 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf, 1966, S. 109—114.
- 7.26. *Lieneweg, F.*: Die Anzeigeverzögerung von Thermometern, I und III. Teil. Wiss. Veröff. Siemens—Werken, 16 (1937), H. 3, S. 112—126 und 19 (1940), H. 2, S. 207—221.
- 7.27. *Hergesell, H.*: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Thermometern, insbesondere solchen, die schnell wechselnden Temperaturen ausgesetzt sind. Meteorol. Z. 14 (1897), S. 433—448.
- 7.28. *Hausen, H.*: Die Messung von Lufttemperaturen in geschlossenen Räumen mit nicht strahlungsgeschützten Thermometern. Z. techn. Phys. 5 (1924), S. 169—186.
- 7.29. *Gröber, H.*: Die Erwärmung und Abkühlung einfacher geometrischer Körper. Z. VDI 69 (1925), S. 705—711. Siehe auch (7.1).
- 7.30. *Bachmann, H.*: Tafeln über Abkühlungsvorgänge einfacher Körper. Springer—Verlag, Berlin, 1938.
- 7.31. *Lieneweg, F.*: Übergangsfunktion (Anzeigeverzögerung) von Thermometern. Aufnahme-technik. Meßergebnisse, Auswertungen. Arch. techn. Messen (1964), Lief. 340, S. R45—R53.
- 7.32. *Lieneweg, F.*: Die Übergangsfunktion beim Abkühlen und Erhitzen fester Körper in beliebigen Mitteln einschließlich Anzeigeverzögerung von Thermometern. Regelungstechn. 10 (1962), S. 159—165 und 260—263.
- 7.33. *Prinz, W.*: Zeitverhalten von Berührungsthermometern. VDI—Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung. Düsseldorf, 1966, S. 47—51.
- 7.34. *Huhnke, D.*: Über Methoden zur Messung der dynamischen Eigenschaften von elektrischen Berührungsthermometern. Dissertation TU Braunschweig, 1972.
- 7.35. *Huhnke, D.*: Die Bestimmung des Übertragungsverhaltens elektrischer Berührungsthermometer. VDE — Fachberichte 27 (1972), S. 20—24. Ferner: Neue Apparaturen zur Aufnahme der Übergangsfunktion elektrischer Berührungsthermometer in strömenden Medien. VDI — Berichte Nr. 198 Technische Temperaturmessung, Düsseldorf, 1973, S. 103—109.
- 7.35a. Richtlinie VDI/VDE 3519: Das Zeitverhalten von Berührungsthermometern. Düsseldorf (in Vorbereitung).
- 7.36. *Hofmann, D.*: Untersuchung der dynamischen Meßfehler von Industriethermometern für unterschiedliche Betriebsbedingungen. Habilitationsschrift TU Dresden, 1970.
- 7.37. *Kaufman, A. B.*: Temperature-probe response time. Instrum. and Control—Syst. 33 (1960), S. 804—807.
- 7.38. *Sirs, I. A.*: Measurement of rapid temperature changes by thermocouples. J. Sci. Instrum. 38 (1961), S. 489—490.
- 7.39. *Balko, B., Berger, R. L.*: Measurement and computation thermojunction response times in the submillisecond range. Rev. Sci. Instr. 39 (1968), S. 498—503.
- 7.40. *Rosenthal, L. A.*: Thermal response of bridgewires used in electroplastic devices. Rev. Sci. Instr. 32 (1961), S. 1033—1036.
- 7.41. *Gröber, H.*: Temperaturverlauf und Wärmeströmungen in periodisch erwärmten Körpern. Forsch. Arb. Ing. Wes. (1928), II. 300, S. 3—13.
- 7.42. *Lieneweg, F.*: Die Anzeigeverzögerung von Thermometern II. und III. Teil. Wiss. Veröff. Siemens Werken 17 (1938). H. 4 S. 381—394 und 19 (1940), II. 2, S. 207—221. Ferner «Temperaturmessung» in Handbuch der technischen Betriebskontrolle Bd. 3, Physikalische Meßmethoden 3. Auflage, Leipzig, 1959, S. 162—376.
- 7.43. *Pfriem, H.*: Messung schnell veränderlicher Wandtemperaturen im Motorenbau. Arch. techn. Messen V 2167—1, Juli 1940.
- 7.44. *Weller, W.*: Die Verfahren zur Bestimmung der regelungstechnischen Kennwerte aus der gemessenen Übergangsfunktion Z. Messen—Steuern—Regeln 5 (1962), S. 355—363.
- 7.45. *Hofmann, D.*: Meßdynamik elektrischer Industriethermometer, Messen—Steuern—Regeln 8 (1965), S. 407—410 und 9 (1966), S. 17—21; ferner: Zur Meßdynamik von elektrischen Berührungsthermometern. Acta IMEKO 1967, S. 323—335; sowie Zur elektrischen Korrektur des dynamischen Verhaltens von trägen Meßwandlern. Messen—Steuern—Regeln 10 (1967), S. 20—27.

- 7.46. *Muller-Girard, O.*: The dynamics of filled temperaturemeasuring systems. Trans. ASME (1965), Mai, S. 591—595.
- 7.47. *Schwarze, G.*: Algorithmische Bestimmung der Ordnung und Zeitkonstante bei P-, I- und D-Gliedern mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten und Verzögerung bis 6. Ordnung. Messen—Steuern—Regeln 7 (1964), S. 10—18. Ferner: Übersicht über die Zeitprozentkennwertmethode zur Ermittlung der Übergangsfunktion aus Gewichtsfunktion und Übergangsfunktion und Anstiegantwort. Messen—Steuern—Regeln, 8 (1965), S. 356—359.
- 7.48. DIN 19226 5.68: Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Begriffe und Benennungen.
- 7.49. *Schwarze, G.*: Beurteilung von Regelstrecken mit Ausgleich an Hand ihrer Übergangsfunktion. Z. Messen—Steuern—Regeln 3 (1960), S. 241—244.
- 7.50. *Kupfmüller, E.*: Über die Dynamik der selbsttätigen Verstärkungsregler. Elektr. Nachrichtentechn. (ENT) 5 (1928), S. 459—467.
- 7.51. *Bopp, K.*: Die Ermittlung der dynamischen Kennwerte eines Regelkreises aus Übergangsfunktion und Frequenzgang. Regelungstechn. 5 (1957), S. 298—302.
- 7.52. *Werner, G. W.*: Kennwertermittlung mit einem Kennfunktionsatlas. Messen—Steuern—Regeln 12 ap (1969), S. 173—176.
- 7.53. *Lieneweg, F.*: Der Erwärmungsfehler von Widerstandsthermometern. Arch. techn. Messen J 023—4, Okt. 1949.

## 8. УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ТЕРМОМЕТРОВ

### 8.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ И ПАРОВ

Правильному определению температуры газов необходимо уделять особое внимание в связи с тем, что:

- 1) коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от газов к твердым телам очень мал, вследствие чего погрешность измерения может быть очень большой;
- 2) у газов, пропускающих излучение, погрешности измерения в результате обмена энергии излучением необходимо устранять, используя выведенные в разделе 7.1 закономерности.

#### 8.1.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Определение температуры воздуха при помощи обычных термометров большей частью сопряжено со значительными по величине погрешностями, если прибор размещается на стенах, температура которых может отличаться от измеряемой температуры воздуха в помещении. В результате теплоизлучения и конвекции легко возникают значительные погрешности измерения. Располагая чувствительный элемент термометра на достаточно большом расстоянии от стенки или применяя соответствующую теплоизоляцию, можно сделать эту погрешность минимальной. Влияние температуры стенки оказалось возможным уменьшить настолько, что погрешность измерения снизилась с 66 до 15% разности температур стенки и воздуха только за счет рациональной конструкции термометра [8.1] (см. раздел 3.2.2.6). Погрешность измерения температуры воздуха может быть снижена благодаря улучшению теплопередачи, что относительно просто достигается путем повышения скорости обтекания термометра воздухом (например, у аспирационного термометра Ассмана). Если этот способ нельзя применить, то можно снизить постоянную излучения термометра, например путем применения алюминиевого экрана с низким значением излучательной способности или путем золочения или серебрения поверхностей термометра снизить эту величину. Для уменьшения влияния излучения применяют тонкие термометры (термопары или термометры сопротивления) [8.2а] или по показаниям двух термометров с различными излучательными характеристиками поверхностей (золоченые или обычные поверхности) рассчитывают температуру, которую показывал бы термометр при отсутствии излучения:

$$t_{\text{Luft}} = t_{\text{Gold}} - C (t_{\text{Glas}} - t_{\text{Gold}}), \quad (8.1)$$

где  $t_{\text{Gold}}$  — показания температуры золоченого, а  $t_{\text{Glas}}$  — обычного термометра;  $C$  — градуировочная постоянная, определяемая видом термометра [8.2б].

#### 8.1.2. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ И МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОМФОРТНОСТИ

При кондиционировании помещений необходимо учитывать теплопередачу через стену здания, зависящую от температуры наружного воздуха, его влажности, скорости ветра и солнечного облучения. Для этой цели в качестве контролируемой переменной можно использовать температуру наружной стены регулируемого помещения, на которую, кроме температуры воздуха, действуют также скорость ветра и процесс испарения влаги со стены [8.3]. Если применяют

два датчика атмосферных условий с зачерненной поверхностью, один из которых снабжен экраном для защиты от излучений, то можно также учесть и влияние солнечного облучения.

Влияние скорости и влажности воздуха можно учесть, если термометр наружного воздуха нагревать повышенным измерительным током или при помощи вспомогательного нагревательного устройства.

Комфортная температура в помещениях зависит от влажности воздуха, скорости его потока и от теплового излучения. Эту величину пытались определять при помощи одного измерительного прибора; при этом стремились наиболее точно воспроизвести условия охлаждения человеческого тела в одежде.

Для определения степени охлаждения в помещениях были разработаны различные методы измерения [8.4, 8.5]. Так, степень охлаждения, измеряемая при помощи кататермометра по Хилю, воспроизводит действие движения воздуха, а также его температуры. Для этой цели измеряют время  $t$  охлаждения термометра с 38 до 35° С. В течение этого времени от термометра непрерывно отводятся неизменное количество тепла  $Q$ , отнесенное к 1 см<sup>2</sup> его поверхности. Величина  $Q/t$  обозначается через  $A$  и называется ката-величиной. Она является мерой охлаждения, которая зависит от коэффициента теплоотдачи в окружающую среду  $\alpha$  и от среднего превышения температуры термометра  $\vartheta_m$  над температурой воздуха  $\vartheta_L$ :

$$A = Q/t = \alpha \vartheta_m = \alpha (36,5 - \vartheta_L). \quad (8.2)$$

Если температура воздуха не равна температуре окружающих поверхностей, то величина  $A$  зависит также и от теплообмена излучением. Эффективную температуру излучения  $\vartheta_{st}$  окружающих поверхностей можно определить, если измерить разность параметров охлаждения  $A_g - A_s$  простого ( $A_g$ ) и посеребренного ( $A_s$ ) кататермометров, всегда существующую вследствие того, что посеребренный термометр характеризуется меньшим излучением поверхности, тогда как потери тепла в результате конвекции у обоих термометров одинаковы. Эта температура равна

$$\vartheta_{st} = 1000 \sqrt[4]{\frac{8,06 - (A_g - A_s)}{0,0877}} - 273. \quad (8.3)$$

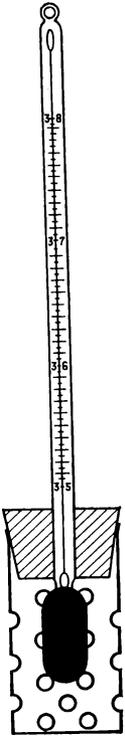


Рис. 8.1. Ката-термометр с вентиляционной защитной гильзой

На рис. 8.1 показан кататермометр. Так как резервуар термометра окружен перфорированным экраном с минимальной массой, то происходит примерно одинаковая теплоотдача при различных скоростях воздуха, как и у человеческого тела. Коэффициент теплоотдачи термометра не обязательно должен быть идентичным с коэффициентом теплоотдачи поверхности человеческого тела. Вполне достаточно лишь привести эти коэффициенты в определенное соответствие при помощи перфорированного экрана. На основе теории подобия Нуссельта можно вывести, что коэффициент теплоотдачи, получающийся в результате тепловой конвекции, может быть приведен в соответствие со значением коэффициента теплоотдачи человеческого тела путем правильного выбора температуры перерева термометра.

«Эффективное тепло излучения» может быть также определено при помощи сферического термометра. Этот термометр состоит из зачерненного полого шарика, в середине которого находится ртутный термометр. Разность показаний температур по сравнению с простым защищенным от излучения термометром является мерой эффективного тепла излучения.

При помощи нескольких приборов, которые измеряют отдельные определяющие факторы влияния, можно, используя суммирующую схему, непосред-

ственно определять комфортную температуру. Отдельные измеряемые величины вводят в схему с весовыми коэффициентами соответственно доле их воздействия, отнесенной к воздействию температуры воздуха [8.6].

### **8.1.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СОСУДАХ, КАНАЛАХ И ТРУБОПРОВОДАХ**

В связи с обычно неблагоприятными условиями теплопередачи между измеряемой средой и датчиком необходимо конструкции датчиков точно согласовывать с условиями применения. Для лабораторных измерений термометры можно выполнять почти всегда в соответствии с теоретически выведенными правилами. Тонкостенные плохо проводящие защитные чехлы, в некоторых случаях снабженные для улучшения теплоотдачи ребрами, приблизительно устраняют погрешность в результате отвода тепла. При помощи вспомогательного нагревательного устройства можно, кроме того, нагревать стенку трубопровода до температуры газа или при помощи экранирующего устройства, дополняемого в некоторых случаях электрообогревом, полностью устранить облучение датчиков температуры. Очень тонкие термоэлектродные проволоки или термопары в металлических чехлах, которые находятся в непосредственном контакте с измеряемой средой, характеризуются хорошей теплоотдачей и имеют поэтому малую погрешность измерения вследствие отвода тепла, а также лишь небольшую погрешность измерения в результате теплоизлучения. Погрешность измерения вследствие отвода тепла через теплопроводность можно определить, если установить одновременно три термометра с различными теплопроводностями (например, с различными толщинами стенок защитных чехлов), нанести на график их показания и экстраполировать кривую к погрешности измерения вследствие отвода тепла равной нулю. По ходу кривой видно, как велико остаточное влияние погрешности измерения в результате отвода тепла даже у термометра с минимальной погрешностью измерения этого происхождения. Таким же образом можно определить влияние излучения, если применить датчики с разными излучательными характеристиками.

### **8.1.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

При выполнении измерений в промышленных условиях с учетом химической и механической нагрузки на термометры нельзя выбирать материалы произвольно и придавать защитным чехлам любую форму. Необходимо учитывать приведенные в 7.1.3 выводы относительно конструкции и способов монтажа термометров (вычисление погрешности измерения по законам теплопередачи, см. 7.1.1) с тем, чтобы при конкретных условиях обеспечить проведение измерений с минимальной погрешностью. Погрешности измерения вследствие отвода тепла и времени установления показаний можно просто определить для любых сред, если определить в соответствии с указаниями, данными в разделе 7.1.2, параметры термометра  $V_T$  и  $K_T$  и если известны коэффициенты теплоотдачи в конкретных цеховых условиях для измеряемой среды. Обычно защитные чехлы ввинчивают или сваривают в стенки трубопроводов или сосудов. В ДИН 43763 приведен ряд конструкций, которые могут применяться во многих случаях и для которых были рассчитаны диаграммы нагрузок (раздел 6.3). Специальные конструкции необходимо рассчитывать.

На рис. 8.2 показан термометр, который применяется для измерения температуры газов при производстве полиэтилена в области температур до 300°С и давлений до 3000 бар. Термометр в защитном чехле на длинном участке впаян в защитную гильзу высокого давления и выступает из нее лишь на 2—5 мм. Изготовление деталей и сборка этого узла должны быть особенно тщательными, так как иначе при большом давлении защитный чехол термометра может быть вдавлен.

На рис. 8.3 показана также специальная конструкция термоэлектрического термометра, предназначенного для измерения температур газа до  $1400^{\circ}\text{C}$  при давлении до 60 бар. Здесь термопара защищена от непосредственного контакта с измеряемой средой при помощи двух керамических защитных чехлов, однако измеряемая среда может попадать внутрь защитного чехла через отверстие для выравнивания давлений. Керамический защитный чехол защищает термопару из благородного металла только от частиц пыли, сажи и т. п., которые могут быть захвачены потоком газа. Термоэлектродные проволоки выведены наружу через герметичные изоляционные втулки и соединены в головке термометра с компенсационными проводами.

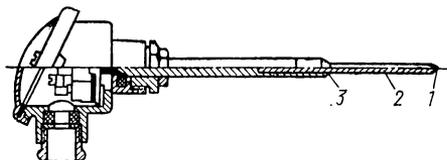


Рис. 8.2. Термоэлектрический термометр высокого давления для температуры  $300^{\circ}\text{C}$  и давления 3000 бар:

1 — термопара (NiCr—Ni, диаметр термоэлектродов 1,6 мм, защитный чехол из качественной стали); 2 — защитная гильза (качественная сталь); 3 — поверхность завальцовки

В резьбовом штуцере герметично вмонтированы четыре несущих стержня, выполненных из термоэлектродного материала (например, NiCr и Ni). На рабочих концах этих стержней закреплены тонкие термопары с термоэлектродными проволоками различного диаметра. Если нанести на графике зависимость показанной температуры от диаметра термоэлектродной проволоки этих термопар,

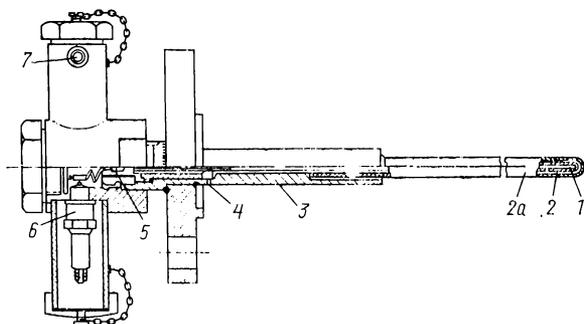


Рис. 8.3. Специальный термоэлектрический термометр для температуры  $1400^{\circ}\text{C}$  и давления 60 бар:

1 — термопара PtRh (70/30) — PtRh (94/6); 2, 2a — керамические защитные чехлы ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 3 — монтажная гильза (жаростойкая сталь); 4 — отверстие для выравнивания давления; 5 — герметизированный ввод; 6 — герметизированный вывод (свеча зажигания); 7 — штуцер для присоединения к источнику противодействия

то можно выполнить экстраполяцию диаметра проволоки до нуля и очень точно определить температуру газа. По ходу кривой можно также определить погрешность измерения для проволок разного диаметра. Это важно прежде всего тогда, когда, например, вследствие непосредственного контакта измеряемой среды с термопарой происходит уменьшение ее т. э. д. с.

При помощи термометра такой же конструкции можно определить или исключить также погрешности измерения вследствие отвода тепла теплопроводностью и излучением. Действительная температура газа показывается правильно, если применить 1 + 3 + 3 термопары, отношение диаметров термоэлектродных проволок которых составляет 9 : 4 : 1. Термопары средних диаметров включены встречно с остальными термопарами. При использовании термометров сопротивления следует предусмотреть три измерительных сопротивления величиной  $1R + 3R + 3R$ , отношение диаметров проволоки которых составляет 9 : 4 : 1,

а отношение длин 27 : 16 : 1. И в этом случае термометр с проволокой среднего диаметра должен быть включен встречно с обоими другими [8.7 и 8.8].

Во многих случаях можно также определять наружную температуру стенки сосуда в качестве меры температуры заполняющей его среды, если предусмотрена очень хорошая тепловая изоляция стенки и имеется хороший теплообмен между измеряемой средой и стенкой. Этим пользуются при определении температуры угля в мельницах шахтно-мельничных топок и при измерении температуры в трубопроводах высокого давления, а также в нагревательных устройствах; при этом датчики температуры размещают на наружной поверхности стенки.

### 8.1.5. УСТРАНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ОТВОДА ТЕПЛА ПУТЕМ НАГРЕВА МОНТАЖНОЙ ЗОНЫ АРМАТУРЫ ТЕРМОМЕТРА

Избежать погрешностей вследствие отвода тепла можно также путем нагрева монтажной зоны арматуры термометра и приведения ее температуры по возможности в точное соответствие с температурой газа. При электрическом нагреве стенки трубопровода или арматуры термометра у фланца либо рассчитывают такое количество энергии, чтобы поддерживалась средняя температура газа, либо регулируют нагрев с применением встроенной в арматуру термометра термопары, так что разность температур по отношению к измеряемой среде исчезает (рис. 8.5, а). При нагреве арматуры в монтажной зоне с использованием горячего газа, в соответствии с рис. 8.5, б, тепло подводится к фланцу термометра по дополнительному, охватывающему защитный чехол экрану из отрезка трубы или стального листа. Благодаря этому компенсируется основная часть тепла, отдаваемого защитным чехлом термометра наружу, что проявляется в повышении температуры арматуры термометра в месте его заделки в толстостенный трубопровод.

Дополнительный экран должен допускать беспрепятственное поступление газа к термометру через просверленные в нем отверстия, с тем чтобы условия омывания термометра газом по возможности остались неизменными и с тем, чтобы сам экран также хорошо омывался потоком газа и нагревался. При этом дополнительный экран одновременно действует в качестве защиты от излучения. Размещение одной или нескольких металлических шайб (рис. 8.5, в) или нескольких ребер поперёк защитного чехла вблизи стенки трубопровода также целесообразно. Такое благоприятное с точки зрения техники измерения мероприятие, как применение обогреваемого дополнительного экрана или ребер, не всегда возможно. При измерении температуры неочищенных газов, например дымовых, следует проявить определенную осторожность, так как при некоторых условиях на поверхности экрана или ребер могут оседать твердые частицы, вследствие чего все измерительное устройство покрывается теплоизолирующим слоем. При этом погрешность измерения может стать особенно большой.

В результате отвода тепла защитным чехлом протекающий вдоль него газ охлаждается. Поэтому его чувствительная к температуре часть должна омываться газом раньше. В связи с этим термометры при установке в коленах трубопроводов

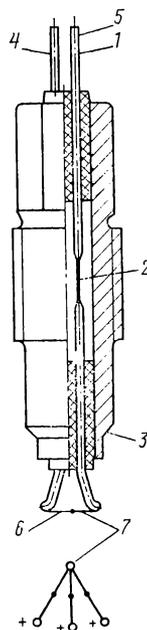


Рис. 8.4. Термоэлектрический термометр для измерения быстро изменяющихся температур газа:

1 — выводы (термоэлектродные стержни); 2 — герметизированный вывод; 3 — поверхность завальцовки; 4 — 3X NiCr-проволока; 5 — 1X NiCr-проволока; 6 — Ni-проволока

должны по возможности размещаться навстречу потоку газа. В крайнем случае можно располагать термометр под некоторым углом или перпендикулярно к потоку газа (рис. 8.6). Для того чтобы погрешность измерения вследствие излучения была минимальной, защитные чехлы должны иметь блестящую, желательнее

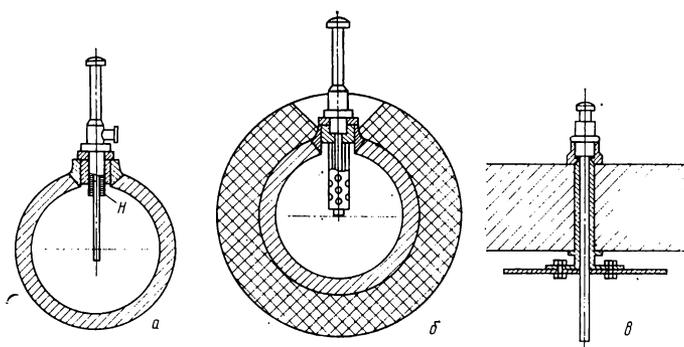


Рис. 8.5. Устранение погрешности измерения, обусловленной отводом тепла, путем нагрева монтажной зоны защитной арматуры термометра:

*a* — электрический нагрев; *b* — нагрев при помощи дополнительного экрана, одновременно служащего защитой от излучения; *v* — нагрев при помощи диска, расположенного перпендикулярно защитному чехлу; *H* — нагревательная обмотка

полированную поверхность. У стеклянных термометров нанесение рефлектирующего металлического покрытия значительно снижает обмен энергии излучением. Если этого недостаточно, необходимо предусматривать дополнительные экраны для защиты от излучения (рис. 8.7).

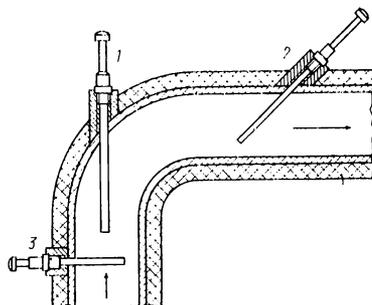


Рис. 8.6. Установка защитных чехлов термометров на газопроводах (VDI/VDE 3511):

*1* — в коленах навстречу потоку газа; *2* — в узких трубопроводах под углом по отношению к потоку газа; *3* — перпендикулярно потоку газа

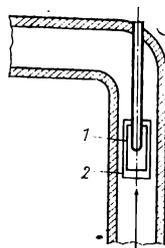


Рис. 8.7. Защитный чехол с двойной защитой от излучения (*1* и *2*)

Если термометр устанавливают на трубопроводе небольшого диаметра или из соображений надежности на стенку трубопровода высокого давления сверху наваривают полусферический фланец с резьбовым штуцером для термометра, то внутри фланца скорость потока газа снижается и вследствие этого ухудшаются условия теплоотдачи. Поэтому при больших по сравнению с выступающей длиной защитного чехла размерах фланца необходимо при помощи направляющих пластин способствовать хорошему обтеканию термометра газом,

с тем чтобы и в прилегающей к фланцу части термометра поддерживать достаточный теплообмен. Если влажный термометр омывается сухим или ненасыщенным водяным паром или газом, то в результате испарения воды термометр охлаждается, вследствие чего он показывает заниженную температуру.

### 8.1.6. ТЕРМОМЕТРЫ ПРОТОЧНОГО ТИПА

В результате только одной защиты от излучения, особенно при высоких температурах, погрешность измерения устраняется не полностью (рис. 8.8). Если необходимо точно определить температуру горячих газов, необходимо спизить погрешность измерения вследствие излучения при помощи защитных экранов и повысить скорость потока газа таким образом, чтобы улучшить теплообмен между газом и термометром. Изготовителями измерительных приборов разработаны проточные термоэлектрические термометры различных исполнений. На рис. 8.9 показана конструкция такого термометра, предложенная Обществом немецких металлургов [8.9]. Термометр состоит из водоохлаждаемой трубы с термоизолированной керамической надставкой, которая выступает на 150 мм из водоохлаждаемой трубы и дополнительно защищена от излучения при помощи керамической трубки звездообразного сечения. Количество отсасываемого газа уста-

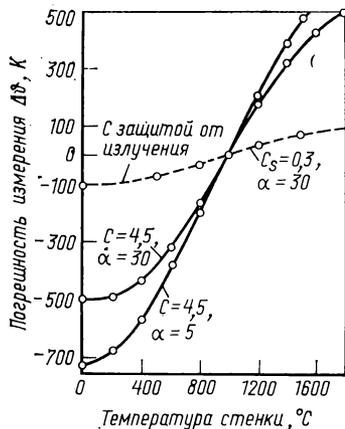


Рис. 8.8. Погрешность измерения  $\Delta\theta$  температуры газа ( $100^\circ\text{C}$ ) при различных температурах, коэффициентах теплоотдачи  $\alpha$  и постоянных излучения  $C$  стенок трубопровода (по Егеру)

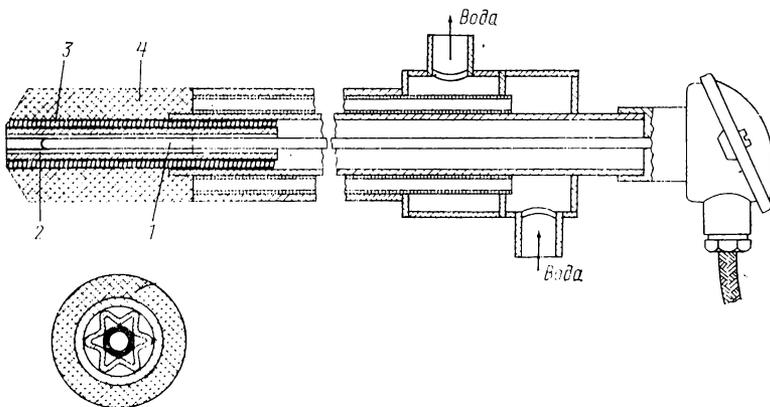


Рис. 8.9. Водоохлаждаемый отсасывающий термоэлектрический термометр: 1 — термопара; 2 — керамическая трубка звездообразного сечения; 3 — защитная керамическая трубка ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); 4 — термоизоляция

навливается таким, чтобы его скорость в надставке составляла примерно 150 м/с. При высоких температурах, например при измерениях температуры отходящих газов мартеновских печей в диапазоне температур свыше  $1600^\circ\text{C}$ , возникают трудности, так как захватываемые газом пыль и частицы жидкого шлака раеги-

руют с керамическим материалом термопары. В связи с этим срок службы керамической надставки термометра ограничен и составляет при таких высоких температурах 6 ч.

Эффективность отсасывающей термопары можно выразить формулой

$$\eta = (\Delta\theta_0 - \Delta\theta) / \Delta\theta, \quad (8.4a)$$

где  $\Delta\theta_0$  — погрешность измерения (разность между действительной и показываемой температурой) при обычных условиях (без отсасывания);  $\Delta\theta$  — погрешность измерения при отсасывании [8.10]. Обычно оказывается достаточной эффективность порядка 95%. Если температура окружающих газ стен незначительно отличается от температуры газа, то достаточна даже эффективность 80%. При увеличении числа экранов для защиты от излучения и повышении скорости газа у термометра эффективность повышается.

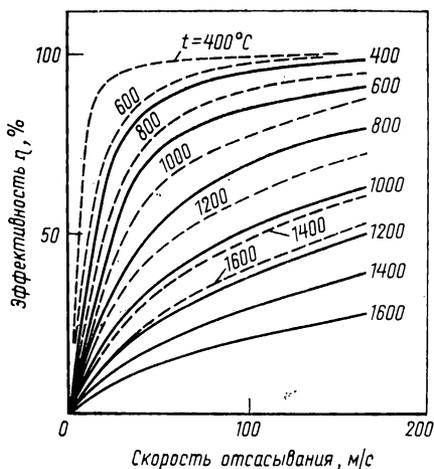


Рис. 8.10. Эффективность  $\eta$  термометра с окисленным металлическим защитным чехлом и одним (сплошные линии) или двумя (штриховые линии) экранами для защиты от излучения из окисленного металла (по Т. Лэнду и Р. Барберу)

Термометра можно определить, если мгновенно отключить отсос газа. Тогда термометр охлаждается в результате обмена энергии излучением. Если отсос газа снова включается, то термометр нагревается вследствие конвективного действия значительно быстрее. По изменению времени охлаждения и нагрева можно определить времена выхода на половинное установившееся значение  $A_1$  или на  $9/10$  его при отключении и  $A_2$  при повторном включении отсоса газа. Тогда эффективность составляет

$$\eta = 1 - (A_1)^2 / (A_2)^2. \quad (8.4б)$$

Отсасывающие термометры для измерений в водотрубных котлах снабжаются металлическими экранами для защиты от излучения и пригодны для измерения температур до  $1150^\circ\text{C}$ . Защита от излучения состоит из нескольких ребристых трубок, которые легко могут быть заменены. Если газ находится под давлением, то этот же термометр может быть использован в режиме продувки. Взамен отсасывающего устройства в выпускное отверстие встраивают диафрагму, ограничивающую поток газа.

При использовании термометров отсасывающего типа следует также обращать внимание на погрешность измерения, которая получается в связи с явлениями торможения потока внутри термометра при больших скоростях потока газа (см. раздел 8.1.7).

Для того чтобы поддерживать погрешность измерения вследствие излучения небольшой даже при низких скоростях отсоса, у отсасывающих термометров, в соответствии с рис. 8.11, потери излучением компенсируются за счет дополнительного нагрева термометра. Правильная мощность компенсирующего нагрева определяется путем изменения скорости отсоса. Если дополнительный нагрев

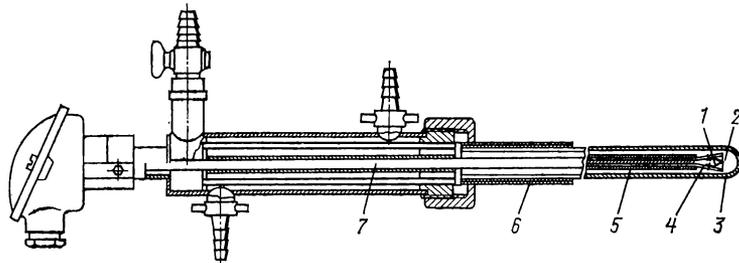


Рис. 8.11. Водоохлаждаемый термоэлектрический термометр с компенсирующим обогревом:

1 — термопара (PtRh—Pt); 2 — нагреватель из проволоки (Pt); 3 — керамический защитный чехол; 4 — выводы (PtRh и Pt — для термопары, Pt — для нагревателя); 5 — керамические трубки с четырьмя отверстиями; 6 — монтажная гильза; 7 — водяное охлаждающее устройство

недостаточен, то показываемая температура при повышении скорости отсоса увеличивается. Если дополнительный нагрев слишком велик, то показываемая температура при увеличении скорости отсоса становится меньше. Мощность компенсирующего нагрева является правильной в том случае, если при изменении скорости отсоса показания термометра остаются неизменными.

Компенсирующий нагрев применяется также при определении температуры несветящихся или слабо светящихся пламен (например, при помощи термоэлектрических термометров). При этом температуру определяют при различных мощностях нагрева. Если, кроме того, определяют температуру при изменении мощности нагрева в холодных газах (строго — в вакууме), то точка пересечения кривых соответствует действительной температуре газа (рис. 8.12).

Еще одну возможность измерения высоких температур газа обеспечивает дифференциальный термометр давления по Гебелю (1925). Прибор изучали и совершенствовали различные исследователи (рис. 8.13) [8.9—8.12].

Для идеальных газов в соответствии с общим уравнением для газов справедливо уравнение

$$(p_1 V_1 / T_1) = (p_2 V_2 / T_2) = \text{const}$$

для состояния 1 в переднем сопле 1 и для состояния 2 в заднем сопле 2. Решая уравнение относительно  $T_1$ , получим

$$T_1 = (V_1 / V_2) (p_1 / p_2) T_2, \quad (8.5)$$

где  $p$  — давление;  $V$  — объем;  $T$  — температура.

На пути между обоними дросселирующими элементами (соплами) газ проходит через охлаждаемые трубы, так что температура  $T_2$  может быть измерена при помощи обычного термоэлектрического термометра (например, NiCr—Ni). При  $p_1 \approx p_2$  уравнение упрощается и принимает вид

$$T_1 = (h_1 / h_2) T_2, \quad (8.6)$$

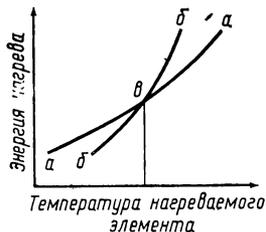


Рис. 8.12. Определение температуры пламени по Нернсту—Беркенбушу.

Ниже точки пересечения обеих кривых элемент поглощает тепло, выше точки пересечения отдает тепло:

а — температура нагреваемого элемента в вакууме; б — в пламени; в — действительная температура газа

где  $h_1$  — разность давлений у дросселя 1, а  $h_2$  — разность давлений у дросселя 2. Опыты показали, что необходимо также учитывать коэффициент  $a$ , характеризующий прибор:

$$T_1 = a (h_1/h_2) T_2. \quad (8.7)$$

Благодаря особой форме сопла даже при различных числах Рейнольдса в соплах коэффициент  $a$  остается почти постоянным. Сравнительные замеры при помощи классического отсасывающего термометра показали, однако, отклонения, зависящие от температуры  $T_1$ . Измеряемый газ охлаждается до некоторой

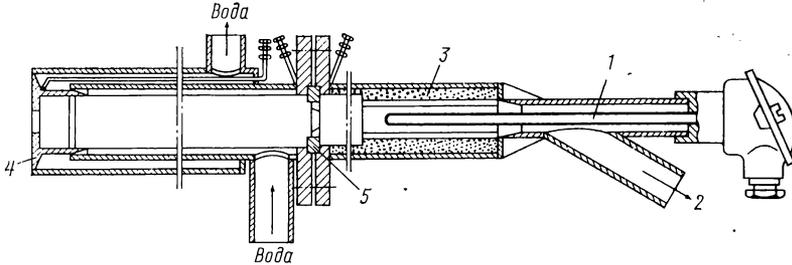


Рис. 8.13. Термoeлектрический термометр дифференциального давления (по Капвальду):

1 — термoeлектрический термометр; 2 — отсос; 3 — термоизоляция; 4, 5 — сопла 1 и 2

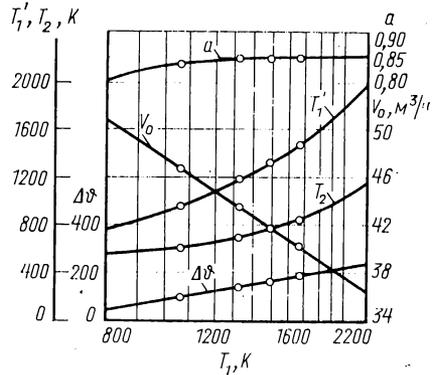


Рис. 8.14. Температуры газа  $T_1'$  и  $T_2$ , падения температуры газа  $\Delta\phi$ , расход газа  $V_0$  и коэффициент  $a$  в функции действительной температуры  $T_1$  для термометра дифференциального давления по рис. 8.13

температуры  $T_1'$  еще до того, как он поступает в дифференциальный термометр давления. Разность температур  $\Delta\phi = T_1 - T_1'$  является функцией действительной температуры газа  $T_1$ . Таким образом, коэффициент  $a$ , характеризующий прибор, также является функцией температуры  $T_1$ :

$$a = [(T_1' + \Delta\phi)/T_2] (h_2/h_1). \quad (8.8)$$

На рис. 8.14 показан найденный для конкретного термометра коэффициент  $a$  и падение температуры  $\Delta\phi$ . Этот термометр имеет класс точности 1,5, если применяются показывающие приборы класса точности 0,5 [8.9].

## 8.1.7. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

В очень быстро текущих газах погрешности измерения температуры вследствие отвода тепла в термометре в связи с большими коэффициентами теплоотдачи по сравнению с измерениями в неподвижных газах или текущих с небольшой скоростью гораздо меньше. Но возникают другие погрешности измерения в связи с тем, что слой газа, находящийся непосредственно у термометра, след-

ствие трения тормозятся и от этого нагреваются. Таким образом, термометром измеряется температура этих слоев, которая носит название температуры в точке полного торможения или общей температуры  $\vartheta_p$ . Чтобы определить действительную температуру  $\vartheta_w$ , необходимо знать вызываемое торможением газа повышение температуры  $\Delta\vartheta$ :

$$\vartheta_p = \vartheta_w + \Delta\vartheta. \quad (8.9)$$

В соответствии с теорией подобия отношение  $R$  найденного повышения температуры  $\Delta\vartheta$  к повышению температуры  $\Delta\vartheta_{ad}$ , которое происходит при адиабатическом превращении энергии потока в потенциальную энергию в идеальных газах, является функцией числа Рейнольдса  $Re$  (отношение скорости, умноженной на длину, к кинематической вязкости), числа Маха  $Ma$  (отношение скорости к скорости звука) и числа Прандтля  $Pr$  (отношение кинематической вязкости к теплопроводности газа). В соответствии с этим имеем

$$\vartheta_p = \vartheta_w + R \Delta\vartheta_{ad}. \quad (8.10)$$

Повышение температуры в идеальных газах при адиабатическом сжатии составляет

$$\Delta\vartheta_{ad} \approx 2 \cdot 10^{-3} (\omega^2/c_p), \quad (8.11)$$

где  $\omega$  — скорость потока, м/с;  $c_p$  — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении [кДж/(кг·К)]. Практически  $R$  зависит только от числа Прандтля  $Pr$  и для ламинарных потоков пропорционально  $Pr^{1/2}$ , а для турбулентных потоков пропорционально  $Pr^{1/3}$ . При  $Pr = 1$  получается, что также  $R = 1$ .

Вычисленное повышение температуры  $\Delta\vartheta_{ad}$  составляет для воздуха:

Скорость потока, м/с	25	50	100	150	200
$\Delta\vartheta_{ad}$ , К . . . . .	0,3	1,2	5	11	20

Определяемое практическим путем повышение температуры  $\Delta\vartheta$  еще меньше. Для пластины, обтекаемой продольно ламинарным граничным потоком, было вычислено отношение  $\Delta\vartheta/\Delta\vartheta_{ad}$ , равное 0,85; такое же значение было получено опытным путем. Для турбулентных граничных слоев, которые образуются на определенном расстоянии от начала пластины при  $Re = 5 \cdot 10^5$ , это отношение увеличивается до 0,89.

Для цилиндров, обтекаемых в поперечном направлении, отношение повышения температуры в зависимости от скорости потока не остается постоянным, так что подобные термометры нельзя использовать для точных измерений температуры. Исследование местного распределения температуры по периметру цилиндра из плохо проводящих тепло материалов показало, что в точке полного торможения достигается также температура полного торможения и что, напротив, в точке отрыва струи температура может стать даже ниже действительной температуры протекающего газа.

Измерение температуры в точке полного торможения осуществляется с помощью обычного термоэлектрического термометра в соответствии с рис. 8.15, а или продольно обтекаемого углового термометра (рис. 8.15, б). В сильно турбулентных потоках, в которых, в соответствии с изложенными выше соображениями, погрешности могут возникнуть вследствие турбулентного движения, температуру в точке полного торможения измеряют при помощи диффузорного термометра (рис. 8.15, в), который выполнен по типу трубки Пито, или при помощи шарикового термометра, перед точкой полного торможения которого размещается термоэлектрический термометр. Для определения небольших разностей температур — порядка 1/100 К — на осевых компрессорах используют такие диффузорные термометры очень небольших размеров.

Статическую температуру можно определить непосредственно, если использовать эффект Ранкве—Хильша, т. е. охлаждение газов в центре вихревого потока. У такого вихревого термометра температура перегрева текущего газа должна быть скомпенсирована путем охлаждения в вихревом потоке. В трубку, один конец которой закрыт, газ входит по касательной, так что в трубке обра-

зудется поток газа, вращающийся в свободном вихре. Термоэлектрический термометр располагается по оси трубки вблизи отверстия для входа газа. Статическую температуру можно определить также без помощи термометров путем измерения давления и расхода [8.13—8.17].

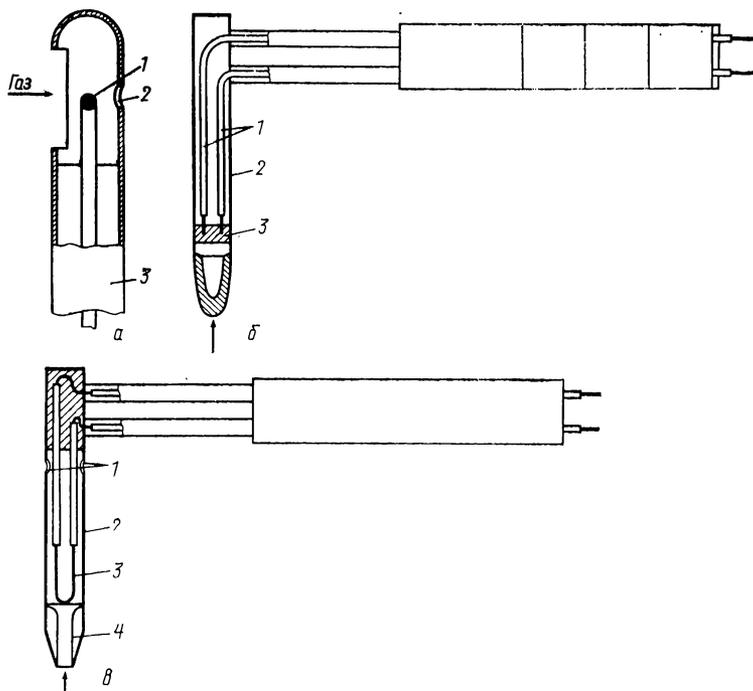


Рис. 8.15. Датчики для измерения температуры высокоскоростных газовых потоков: *a* — обычный термоэлектрический термометр для измерения температуры высокоскоростных газовых потоков (1 — термопара; 2 — выходное отверстие; 3 — защитный чехол); *б* — угловой термоэлектрический термометр по Эккерту (1 — термоэлектроды термопары; 2 — защитный чехол; 3 — рабочий спай термопары в обтекаемом медном наконечнике); *в* — термометр-диффузор по Францу (1 — выходные отверстия; 2 — никелированный защитный чехол; 3 — термопара; 4 — диффузор)

При измерениях в подовых печах для определения температуры и теплопроводности горячего газа применяют калориметры. При этом поток газа, отобранный из топочного пространства, охлаждается в водоохлаждаемом трубчатом холодильнике и затем измеряются его температура и количество. По количеству тепла, отданного охлаждающей системе (определяется по количеству охлаждающей воды, температуре охлаждающей воды на входе и выходе), можно затем вычислить температуру газа на входе и теплопроводность [8.18; 8.19].

## 8.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТЕЙ

Правильно измерить температуру в жидкостях обычно легко, так как:

- 1) теплоизлучение практически отпадает;
- 2) благодаря большим коэффициентам теплоотдачи происходит хороший теплообмен между жидкостью и термометром;
- 3) благодаря большой величине  $\alpha$  разность температур жидкости и стенки трубопровода невелика.

Однако и в этом случае требуется известная осторожность, так как это общее правило иногда перестает быть справедливым, если, например, коэффициенты теплоотдачи обеих сторон трубопровода довольно высоки и одинаковы. Такой случай наблюдается при измерении температуры в трубах теплообменников. Отвод тепла от защитного чехла к стенке трубы теплообменника происходит частично до расположенной в воде части трубы, так что, например, при температуре воды  $35^{\circ}\text{C}$  в баке и  $98,2^{\circ}\text{C}$  в трубопроводе получаются погрешности измерения до 2,2 К. Поэтому при изготовлении и выборе термометров, предназначенных для измерений в жидкостях, необходимо учитывать выводы из расчетов погрешностей измерения температуры.

Для того чтобы измерить среднюю температуру в трубопроводах и каналах, необходимо так же, как и при измерении в неподвижных жидкостях, например в резервуарах, обеспечить перемешивание жидкости путем встраивания завихрителей или при помощи мешалок, если не требуется измерять именно температуру слоев, которые образуются, например, в теплоаккумуляторах.

Защитные чехлы датчиков температуры должны выдерживать нагрузки под действием давления, потока, температуры и коррозии. В ДИН 43763 приведены диаграммы нагрузок для нормированных защитных чехлов. Во всех остальных случаях выполняют расчет в соответствии с разделом 6.3.

При установке термометров следует использовать рекомендации, приведенные в разделе 8.5.

## 8.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВОВ

Сложность измерения температуры расплавов существенно определяется явлениями коррозии защитного чехла термометра. Погрешности в результате отвода тепла через защитный чехол благодаря хорошей теплопередаче расплавов практически не играют роли. Исключение составляют расплавы синтетических материалов. Поэтому в следующих разделах будут рассмотрены только важнейшие проблемы.

### 8.3.1. РАСПЛАВЫ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

При обработке термопластичных пластмасс температуру обработки следует поддерживать в сравнительно узких допусках. Это особенно трудно потому, что в перерабатывающих машинах, например экструдерах, тепло развивается ча-

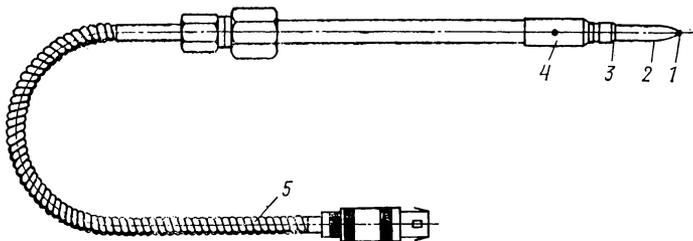


Рис. 8.16. Устройство датчика для измерения температуры пластмассы по данным фирмы «Gräff»:

1 — армированная термопара; 2 — мечевидная несущая трубка; 3 — поверхность зачеканки; 4 — резьбовое соединение; 5 — компенсационные провода в защитном шланге со штепсельным разъемом

стично при помощи расположенных снаружи нагревательных устройств и частично в результате внутреннего трения в пластмассе. Поэтому в месте установки датчика обычно очень неблагоприятные условия — высокое давление, большая скорость течения и высокая вязкость среды. Поскольку, кроме того,

расплавы пластмасс почти всегда характеризуются плохой теплопередачей, измерительный датчик должен иметь такую конструкцию, чтобы возникла лишь незначительная погрешность измерения вследствие отвода тепла через защитный чехол датчика. В простых машинах для переработки пластмасс и прежде всего тогда, когда практически перерабатывается один и тот же материал при неизменяющейся производительности, применяют измерительные датчики, которые измеряют только температуру стенки экструдера (см. рис. 3.45).

На рис. 8.16 показан датчик для измерения температуры пластмассы. Датчик, представляющий собой чаще всего армированную термопару, выступает из мечевидного корпуса с большим моментом сопротивления в направлении, противостоящем потоку пластмассы. Путем изменения глубины его погружения можно определить также температурные профили. В некоторых случаях используются также конструкции, содержащие несколько датчиков температуры. При помощи соответствующей схемы соединения благодаря этому можно измерять как среднюю температуру, так и распределение температуры [8.20].

### 8.3.2. РАСПЛАВЫ СОЛЕЙ

Соляные ванны иногда нагревают при помощи электрода, непосредственно погруженного в жидкую соль. При этом в ванне появляются как сильные гра-

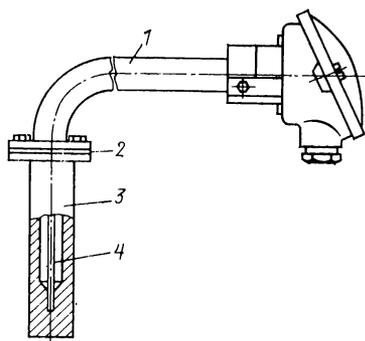


Рис. 8.17. Угловой термоэлектрический термометр для соляных ванн:

1 — несущая трубка; 2 — крепежный фланец для сменного защитного чехла; 3 — защитный чехол; 4 — армированная термопара

диенты температур, так и электрические поля. Для автоматического регулирования температуры ванны требуются очень быстродействующие датчики температуры; обычно применяют непосредственно погружаемые в ванну угловые термоэлектрические термометры. Защитный чехол такого термометра является одновременно одним из термоэлектродов термопары (см. рис. 3.42). Влияние на величину т. э. д. с. поглощенных из ванны посторонних веществ начинается уже через 20—30 ч эксплуатации термометра. Особенно в содержащих углерод соляных ваннах защитный чехол термометра поглощает углерод и очень сильно изменяет т. э. д. с. термопары. В этих случаях применяют термометры с защитными чехлами из обычной стали, которые обеспечивают хороший тепловой контакт и имеют сравнительно небольшие значения  $t_{0,5}$ . Так как и этот защитный чехол поглощает углерод, его необходимо заменять после непродолжительной эксплуатации. Вследствие этого для изготовления чехлов обычно используют наиболее дешевую сталь (рис. 8.17).

### 8.3.3. РАСПЛАВЫ СТЕКЛА

В расплавах стекла практически можно применять только защитные чехлы из графита или из благородных металлов, так как кварц в большинстве случаев неприменим, а защитные чехлы из окиси алюминия не выдерживают больших градиентов температур на поверхности ванны. В термометрах с графитовыми защитными чехлами должен быть предусмотрен герметичный керамический внутренний защитный чехол, так как иначе вследствие восстановительной атмосферы происходит искажение градуировочной характеристики термометра из благородных металлов уже после непродолжительной эксплуатации. Вследствие такой конструкции термопары имеют большую тепловую инерцию и могут применяться только там, где отсутствуют быстрые колебания температуры, например в ваннах

для варки стекла. Напротив, в питательном устройстве вследствие изменения скорости отбора стекла происходят кратковременные колебания температуры, которые должны выравниваться при помощи соответствующих нагревательных устройств. В качестве датчиков температуры для этой цели применяют термоэлектрические термометры с защитными чехлами из благородных металлов или комбинированную защитную арматуру в соответствии с рис. 8.18. Такие термометры можно применять только там, где на поверхности стекла можно обеспечить окислительную атмосферу. При восстановительной атмосфере из расплава стекла восстанавливаются, например кремний и фосфор, которые проникают внутрь защитного чехла и загрязняют термоэлектроды из благородных металлов. Уже после непродолжительной эксплуатации образуются частично эвтектические соединения (например, между платиной и кремнием), характеризующиеся низкой температурой плавления и очень крупнозернистой кристаллической структурой [8.21]. Измерения при помощи пирометров излучения в расплавах стекла и питателях описаны в разделе 9.9.6.

### 8.3.4. РАСПЛАВЫ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ

Измерение температуры расплавов легких металлов вызывает в настоящее время, как это и было раньше, большие трудности. Металлические защитные чехлы через короткое время корродируют и должны часто заменяться. Проведенные в последнее время опыты с использованием специальных сплавов дали некоторые положительные результаты, которые, однако, сильно зависят от производственных условий. Керамические защитные чехлы можно использовать лишь в некоторых случаях, так как возникающий на поверхности ванны большой градиент температур разрушает большинство керамических материалов. Кварц нельзя применять, так как он соединяется с практически всегда имеющейся окисью алюминия и превращается в низкоплавкое стекло. Таким образом, пригодными материалами для защитных чехлов остаются только графит или карбид кремния. Для этих защитных чехлов в зависимости от температуры и состава расплава получены весьма различные стойкости [8.22; 8.23]. Измерения при помощи пирометров излучения рассматриваются в разделе 9.9.7.

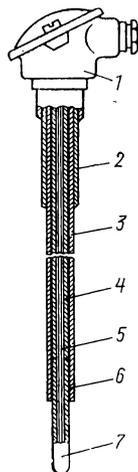


Рис. 8.18. Термоэлектрический термометр для расплава стекла:

1 — головка термометра; 2 — стальной монтажный патрубков; 3, 4 — защитные чехлы из глинозема; 5 — изолирующие трубки термопары; 6 — цементная набивка; 7 — платиновый защитный чехол

### 8.3.5. РАСПЛАВЫ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Для расплавов цветных металлов в отдельных случаях еще можно применять металлические защитные чехлы, например из хромистого чугуна; для расплавов стали (а также в значительной степени и для расплавов цветных металлов) распространение получили сменные погружные измерительные головки с кварцевыми защитными чехлами. Очень тонкая (обычно с диаметром электродов 0,08 мм) платиnorodий — платиновая термопара находится в U-образном защитном чехле из кварцевой трубки. Ее свободные концы присоединены непосредственно к контактам из компенсационных материалов. Все устройство находится в керамическом корпусе, который не допускает соприкосновения жидкого расплава с соединительными контактами головки (рис. 8.19). Для измерений используют специальную арматуру (жезл) с контактным разъемом, на которую насаживают сменную погружную измерительную головку. В качестве тепловой защиты слу-

жит многослойный картонный защитный чехол соответствующей длины. Продолжительность погружения составляет 10 с. В течение этого времени часть картонного чехла сгорает и образующаяся в результате этого газовая прослойка из-за плохой теплопроводности предотвращает перегрев контактного разъема и других элементов жезла. При измеряемой температуре свыше 1700°С через 10 с температура контактного разъема повышается максимум до 60—70°С. После измерения измерительную головку вместе с картонным защитным чехлом снимают с жезла и заменяют новой. Преимущества этого способа заключаются прежде всего в надежности и точности измерений. Благодаря применению для каждого отдельного измерения нового сменного блока (измерительная головка с картонным чехлом) практически исключается всякая возможность изменения т. э. д. с. термометра под влиянием загрязнений. Если измерение по какой-либо причине не получилось, его можно повторить через 1—2 мин. Для защиты от механического разрушения U-образной кварцевой трубки во время транспортировки, хранения и измерения на нее надет металлический колпачок, который расплавляется в жидком металле. При измерениях температуры жидких цветных металлов

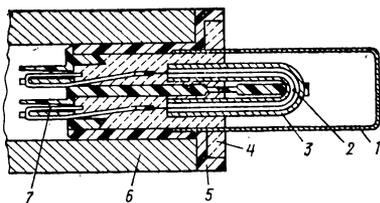


Рис. 8.19. Сменный блок для измерения температуры расплавов стали и цветных металлов методом кратковременного погружения:

1 — защитный колпачок; 2 — термопара; 3 — кварцевый защитный чехол; 4 — жаростойкая керамическая замазка; 5 — фасонная пластмассовая деталь; 6 — картонный защитный чехол; 7 — соединительные контакты

лов колпачок выполняют большей частью из латуни или меди, для расплавов чугуна применяют алюминий, а для жидкой стали колпачки изготавливают штамповкой из стального листа. Все устройство присоединяют через контактный разъем и компенсационный кабель к измерительной системе, которая показывает температуру в аналоговой или цифровой форме и дает звуковой сигнал об окончании измерения. При записи процесса измерения при помощи самописца результат измерения можно легко получить по записанной кривой [8.24]. Для обработки результатов измерений в цифровой форме в измерительную систему вводится блок дифференцирования, который прекращает процесс измерения или записи в момент, когда скорость изменения температуры становится равной нулю. Благодаря специальному подбору термоэлектродной проволоки удается достичь в пределах 1500—1600°С относительной точности<sup>1</sup> измерения  $\pm 2$  К [8.25].

Высокая точность этого способа измерения температуры обеспечивает возможность выполнить в случае применения специального измерительного устройства даже термический анализ, например определение углерода в стали или состава расплава медь—цинк. На рис. 8.20 показан сменный блок такого устройства, предназначенного для анализа стали на углерод. Сменный блок надевают на жезл и погружают примерно на 2 с в расплав. После изъятия жезла из расплава в пробнице блока остается небольшое количество расплава. Встроенной в пробницу термопарой с помощью самописца измеряется и записывается кривая охлаждения взятой пробы расплава. Записанная кривая охлаждения гиповтектического расплава имеет вертикальный участок, который совпадает с температурой

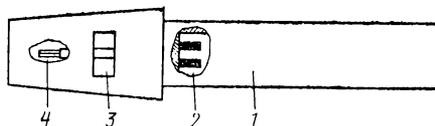


Рис. 8.20. Сменный блок для определения содержания углерода в расплавах железа (по данным фирмы «Electro-Nite», Вельгия):

1 — картонный защитный чехол; 2 — соединительные контакты; 3 — пробница; 4 — термопара с кварцевым защитным чехлом

<sup>1</sup> Если имеется в виду погрешность измерения, то ближе к истине вдвое большая величина, во всяком случае в реальных условиях применения. Понятие «относительной точности измерения» здесь использовано явно неуместно. (Прим. ред.)

начала затвердевания. На основе сравнения полученного значения с тарировочной кривой (рис. 8.21) получают углеродный эквивалент. Диаграмма затвердевания зависит, кроме того, от содержания кремния и фосфора в расплаве. Для этого случая углеродный эквивалент СЕ вычисляют по формуле

$$CE = \%C + 0,312\% Si + 0,274\% P \text{ (формула Ханнемана).}$$

На рис. 8.22 приведена зависимость между процентным содержанием меди в расплаве медь—цинк и температурой затвердевания. В результате измерения получают как температуру расплава, так и данные о его составе.

Погружные блоки еще одного специального исполнения позволяют определять содержание кислорода в жидкой стали. В этом случае, кроме температуры, измеряют напряжение электролитического элемента. По температуре и напряжению элемента можно найти содержание свободного кислорода в расплаве.

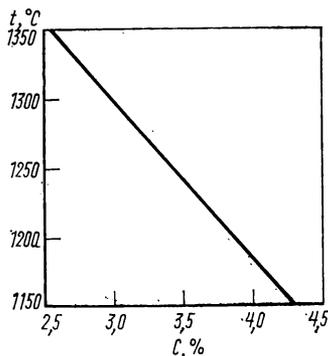


Рис. 8.21. Диаграмма для определения содержания углерода в расплавах железа (по данным фирмы «Electro-Nite»)

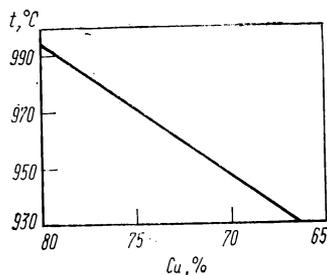


Рис. 8.22. Диаграмма для определения содержания меди в расплаве медь—цинк (по данным фирмы «Electro-Nite»)

Специальный метод измерения для определения температуры жидкой стали разработан Карповым [8.26]. Он использует для измерения никельхром-никелевые термопары, которые находятся в защитном чехле с низкой теплопроводностью. Если погрузить такое устройство в металлический расплав, то скорость нагрева цилиндрического измерительного зонда изменяется в соответствии с приведенной на рис. 8.23 кривой:

$$Fo = \lambda t / R^2 \text{ (критерий Фурье),}$$

где  $\lambda$  — теплопроводность материала цилиндра;  $R$  — радиус цилиндра;  $t$  — время.

Автор показывает в выводе, что максимум функции достигается при  $Fo = 0,118$ . Тогда относительная температура перегрева равна

$$\theta = [(\vartheta_c - \vartheta_{m \max}) / (\vartheta_c - \vartheta_0)] 0,7819, \quad (8.12)$$

где  $\vartheta_c$  — температура измеряемой среды;  $\vartheta_m$  — температура в середине цилиндра;  $\vartheta_0$  — начальная температура цилиндра;  $\theta$  — относительная температура перегрева.

Измерение следует продолжать лишь до достижения максимальной скорости нагрева (максимум 20 с). При  $t_c = 1600^\circ C$  и  $t_0 = 20^\circ C$  температура цилиндрического датчика получается около  $360^\circ C$ . Предел применимости этого метода измерения составляет примерно четырехкратное значение максимально допустимой температуры для термоэлектрических термометров.

В некоторых случаях, например при отливке очень крупных деталей, а также при контроле кислородно-конверторного процесса, температуру расплава нужно в течение определенного периода времени измерять непрерывно. В этом случае температуру нельзя измерять с помощью погружных термопар с картонными

защитными чехлами. Хорошие результаты были получены при использовании термопар из благородных металлов, которые были размещены в специальных защитных чехлах. Для расплава чугуна обычно достаточно защита термопары толстостенным кварцевым чехлом. Для расплавов стали с температурой  $1600^{\circ}\text{C}$  применяют защитные чехлы из окиси хрома [8.27а] или так называемых керметов,

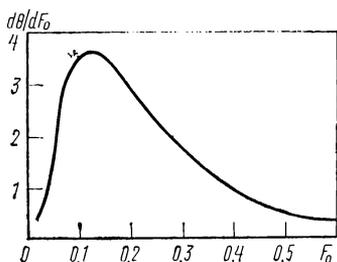


Рис. 8.23. Скорость нагрева цилиндрического измерительного зонда (по данным Карпова [8.26])

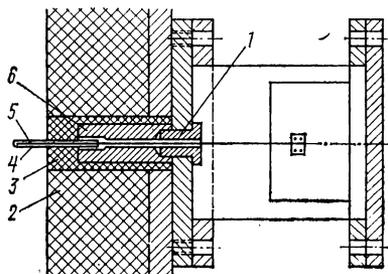


Рис. 8.24. Способ безопасной установки термоэлектрического термометра в стенке разливочного ковша (по патенту 1054735):

1 — герметичная пробка; 2 — внутренняя футеровка разливочного ковша; 3 — керамический блок; 4 — металло-керамический защитный чехол; 5 — термометр; 6 — песок

которые получают путем спекания металлического порошка и порошка окиси металла. Стойкость таких чехлов зависит от вида расплава и температуры. Измерительное устройство либо вводят в расплав при помощи охлажденной фурмы, либо встраивают в донную плиту конвертора или в стенку разливочного ковша. Благодаря специальной конструкции обеспечивается невозможность прорыва жидкой стали наружу в случае разрушения защитного чехла термопары (рис. 8.24) [8.27б].

## 8.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Теплопередача на поверхности подробно была рассмотрена в разделе 7.2. Как указывалось, датчик должен как можно меньше нарушать имеющееся температурное поле (распределение температуры вдоль и перпендикулярно поверхности). В зависимости от характера температурного поля и теплопроводности соприкасающихся на поверхности материалов требуются различная конструкция и различное размещение датчиков температуры.

### 8.4.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕПОДВИЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Если соприкасаются материалы с очень различной теплопроводностью, например воздух и металл, то необходимо обеспечить между датчиком и измеряемой поверхностью хороший тепловой контакт. Если объектом измерения является поверхность металла, обладающего хорошей теплопроводностью, то к его поверхности поступает достаточное количество энергии и дополнительный отвод тепла, который вызывает датчик температуры, не оказывает практически влияния на ее температуру. В качестве датчиков температуры в этом случае пригодны термопары из тонких изолированных термоэлектродных проволок или термопары в защитных чехлах, которые плотно прижимают к поверхности, а еще лучше — припаивают или приваривают (см. рис. 7.13). Если датчик прижимается к по-

верхности, то можно улучшить теплопередачу при помощи металлической пластинки, припаянной к рабочему спаю термопары. Благодаря этому отводимое датчиком температуры тепло отбирается от большой поверхности объекта. Особенно малые погрешности измерения получают, если теплопроводность и коэффициент излучения прижатой пластинки примерно равны соответствующим параметрам материала объекта намерения. На рис. 8.25 показана конструкция полупроводникового термоэлектрического термометра с пластинчатым наконечником для улучшения теплопередачи.

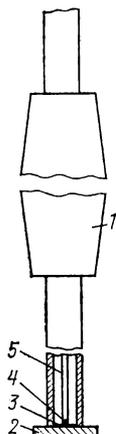


Рис. 8.25. Полупроводниковый термоэлектрический термометр для измерения температуры плоских поверхностей:

1 — рукоятка; 2 — пластинчатый наконечник; 3 — изоляция; 4 — полупроводник; 5 — внутренний проводник

При изотермических поверхностях можно существенно уменьшить погрешность измерения, если проложить термоэлектроды термопары

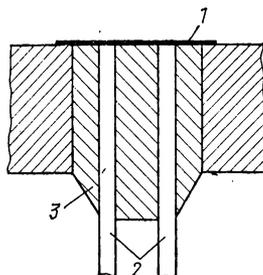


Рис. 8.26. Поверхностный термоэлектрический термометр:

1 — рабочий спай, образованный гальванически нанесенным никелем; 2 — термоэлектродные провода из NiCr и Ni; 3 — керамическая масса

или компенсационные провода вдоль измеряемой поверхности (см. рис. 7.13, б и 7.15).

На рис. 8.26 рабочий спай термопары образуется никелевым покрытием, нанесенным гальваническим способом. Это покрытие соединяет между собой торцы

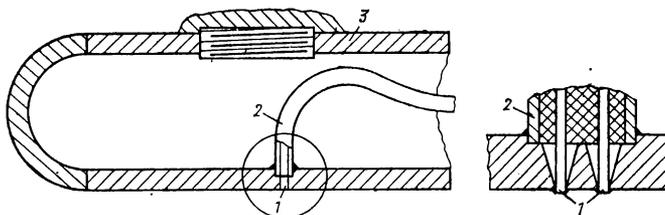


Рис. 8.27. Кабельная термопара для измерения температуры стенки трубопровода:

1 — рабочий спай (термоэлектродные провода термопары сварены со стенкой трубопровода); 2 — кабельная термопара; 3 — закрытое резьбовой пробкой и затем заваренное отверстие в стенке трубопровода, через которое производилась приварка оболочки кабельной термопары

заложённых в керамику термоэлектродных проволок термопары [8.28, а]. Устройство, показанное на рис. 8.27, обеспечивает возможность выполнять измерения температуры поверхности труб, подвергающихся действию внутреннего давления. Здесь термоэлектродные проволоки кабельной термопары варены в стенку трубопровода и герметизированы приваренной к той же стенке оболоч-

кой кабельной термопары. Устройство можно использовать при температурах до 700°С и давлении до 500 бар. Для измерения изотермической температуры поверхности металлических слитков особенно пригоден штыковой термоэлектрический термометр (рис. 8.28). У этого термометра обе термоэлектродные проволоки заострены и вдавливаются при измерении через пленку окиси в поверхность измеряемого металла. Устройство работает безупречно лишь тогда, когда можно обеспечить хороший электрический контакт и хорошую теплопередачу.

У игольчатого термоэлектрического термометра в соответствии с рис. 8.29 рабочий спай термопары расположен в игле (например, инъекционной игле). Острие датчика наклонно вводится непосредственно под измеряемую поверхность (например, при измерении температуры пластмасс, тканей, растений, мяса и т. д.), так что вдоль иглы получается минимальный градиент температур. Благодаря малым размерам (диаметр 0,3—0,5 мм) получается малая погрешность измерения вследствие отвода тепла.

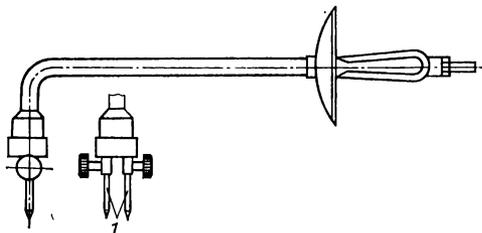


Рис. 8.28. Штыковой термоэлектрический термометр (VDE/VDI 3511):

1 — рабочий спай

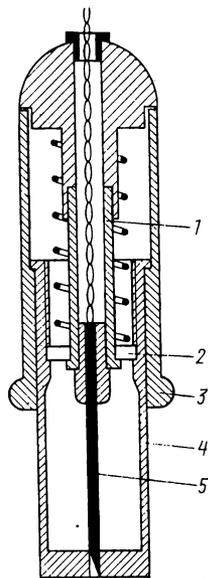


Рис. 8.29. Игольчатый термоэлектрический термометр:

1 — упор; 2 — регулировочная гайка; 3 — рукоятка; 4 — защитная гильза; 5 — игла с термопарой

Особенно малые погрешности измерения получают, если датчик температуры, например термопара или термометр сопротивления, наносится в виде пленки или фольги непосредственно на измеряемую поверхность (рис. 8.30) [8.28б; 8.28в].

С помощью дополнительных покрытий достигается точное соответствие теплопроводности промежуточных слоев и излучательной способности поверхности соответствующим параметрам ее ненарушенного участка. Необходимо, однако, учитывать, что во многих случаях физические свойства, такие как т. э. д. с. и электрическое сопротивление напыленных слоев, значительно отличаются от свойств соответствующих пластичных материалов. Т. э. д. с., а также температурный коэффициент напыленных слоев зависят от коэффициента теплового расширения материала основы, толщины слоя напыленного материала и от дополнительной термической обработки. На рис. 8.31 и 8.32 приведена зависимость температурного коэффициента никелевых и хромовых покрытий, напыленных на стекло, от толщины покрытия. При очень тонких покрытиях, нанесенных методом разложения паровой фазы, могут получаться даже отрицательные температурные коэффициенты. У напыленных металлических покрытий температур-

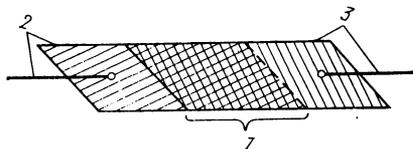


Рис. 8.30. Пленочная термопара:

1 — рабочий спай; 2 — термоматериал и электродный вывод а; 3 — термоматериал и электродный вывод б

ный коэффициент зависит от тех же факторов, что и у покрытий, полученных из паровой фазы. При большой толщине покрытия достигается приблизительно такой же температурный коэффициент, как и у пластичного металла.

При необходимости определить температуру однородного материала лучшие результаты, чем при размещении на поверхности мешающих теплопередаче датчиков, можно получить, если расположить несколько подходящих датчиков

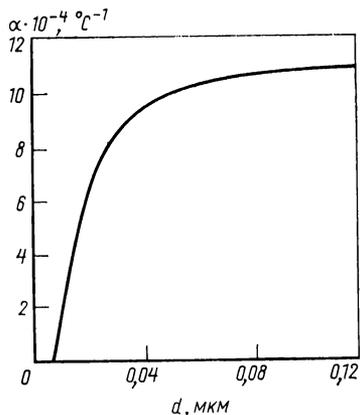


Рис. 8.31. Температурный коэффициент сопротивления напыленных никелевых покрытий в функции толщины покрытия  $d$

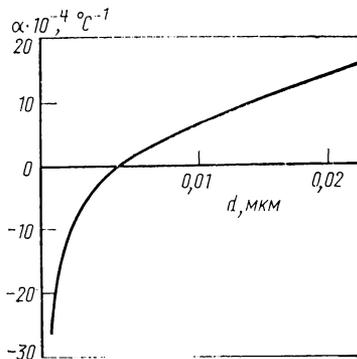


Рис. 8.32. Температурный коэффициент сопротивления напыленных хромовых покрытий в функции толщины покрытия  $d$

на различной глубине и определять градиент температуры в однородном материале (рис. 8.33, а). При нанесении на график результатов замеров путем экстраполяции получают температуру поверхности (рис. 8.33, б) [8.28а].

У термоэлектрического термометра, показанного на рис. 8.34, рабочий спай термопары прижимается к поверхности объекта при помощи пружины. В случае

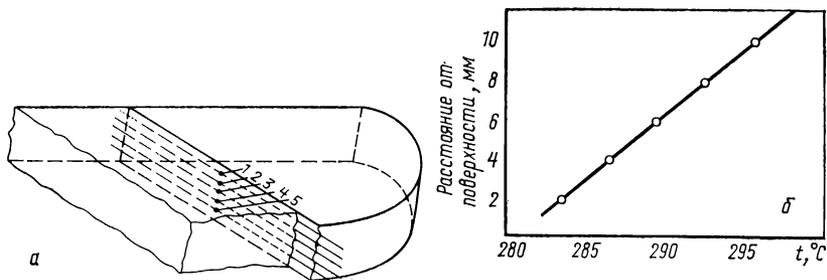


Рис. 8.33. Определение температуры поверхности по градиенту температур: а — расположение термопар (1—5 — рабочие спай термопар); б — обработка результатов измерения

выпуклых поверхностей особенно хорошие результаты дает ленточный термоэлектрический термометр лучкового типа (рис. 8.35). Термопара термометра изготовлена из двух отрезков тонкой ленты, сваренных в середине, и при прижатии к объекту может под действием пружины принимать форму его выпуклой поверхности. У термометра сопротивления, схема которого дана на рис. 8.36, измерительное сопротивление подводится как можно ближе к измеряемой поверхности, благодаря чему обеспечивается хороший тепловой контакт. Изолирующий промежуточный слой препятствует слишком сильному отводу тепла. Если для изме-

рения температуры поверхности различных тел применять один и тот же датчик температуры, то при достаточной толщине тела погрешность измерения практически зависит только от теплопроводности тела и шероховатости поверхности.

У прибора для измерения температуры поверхности «Сартемп» фирмы «Leeds and Northrup» применен датчик температуры с подогревом (см. раздел 7.2). Погрешность из-за отвода тепла у этого прибора исключается, так как внешняя

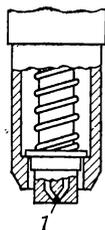


Рис. 8.34. Термоэлектрический термометр с прижимной пружиной (VDE/VDI 3511)

1 — рабочий спай термопары

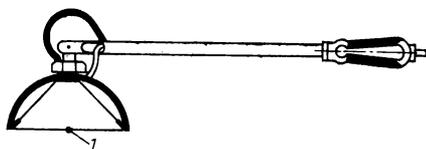


Рис. 8.35. Ленточный термоэлектрический термометр лучкового типа для плоских и выпуклых поверхностей (VDE/VDI 3511);

1 — рабочий спай термопары

поверхность измерительного датчика и компенсационные провода нагреваются до такой же температуры, как и измеряемая поверхность. На рис. 8.37 показана схема измерения. Для измерения температуры применяют никельхром-никелевую термопару, рабочий спай которой одновременно является также рабочим спаем дифференциальной термопары. Холодный спай дифференциальной термопары расположен на внешней стороне оболочки датчика и измеряет, таким образом,

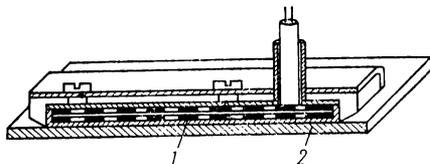


Рис. 8.36. Поверхностный термометр сопротивления:

1 — измерительная обмотка; 2 — пластина датчика

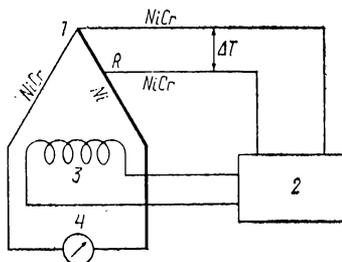


Рис. 8.37. Прибор для измерения температуры поверхности «Сартемп» фирмы «Leeds and Northrup»: 1 — рабочий спай (никельхром-никелевая термопара); 2 — регулятор дополнительного нагревательного устройства; 3 — дополнительное нагревательное устройство; 4 — показывающий прибор; R — холодный спай дифференциальной термопары

температуру окружающей среды. Т. э. д. с., появляющаяся вследствие разности температур между рабочим спаем и оболочкой, используется для управления при помощи регулятора обмоткой, нагревающей оболочку датчика до температуры, которая немного ниже температуры рабочего спаю. Небольшая разность температур необходима для того, чтобы даже при плохой теплоотдаче от объекта к рабочему спаю термопары не происходило перегрева. Прибор можно применять для измерения температур в диапазоне от комнатной до 650°С. Время измерения составляет 1,5 с.

**Медицинские термометры.** К приборам для измерения температуры поверхности следует также отнести электронные термометры для определения температуры тела человека или животного. Для применения термометров разных конструкций необходимо иметь разрешение Федеральногоного физико-технического ведомства [8.29]. Важнейшие требования для выдачи разрешения следующие:

1. Показания должны быть только в градусах Цельсия.

2. Диапазон измерений должен охватывать, по меньшей мере, область от 35,5 до 42° С. Он может быть разделен на поддиапазоны, однако названный диапазон должен быть охвачен.

3. Цена деления шкалы должна составлять для термометров, выдающих показания в аналоговой форме: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1° С; для термометров, выдающих показания в цифровой форме: 0,1° С.

4. Пределы допустимой погрешности измерения должны составлять в зависимости от диапазона измерений 0,1—0,3° С.

5. Градуировка действительна в течение двух лет. В качестве измерительных датчиков применяют обычно полупроводниковые измерительные сопротивления со специальными схемами линеаризации.

Измерительные приборы изготавливают как с аналоговыми, так и с цифровыми показывающими устройствами. Как только показания достигли конечного значения, результат замера фиксируется, а в случае необходимости выдается сигнал. Датчики снабжены сменными защитными чехлами.

На рис. 8.38 показан датчик для измерения кровоснабжения поверхности кожи. Рабочий спай дифференциальной термопары нагревается, так что в зависимости от отвода тепла возникает превышение температуры по отношению к холодному спая. Превышение температуры служит мерой кровоснабжения кожи [8.30].

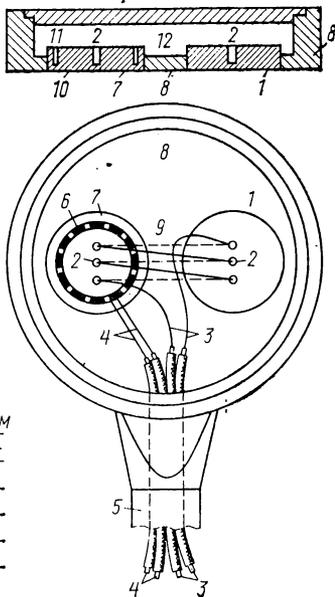


Рис. 8.38. Плоский двухэлементный датчик для измерения кровоснабжения поверхности кожи:

1 — эталонный элемент; 2 — отверстия для термобатарей; 3 — соединительные провода термобатарей; 4 — соединительные провода нагревателя; 5 — изолирующий шланг; 6 — нагревательная обмотка; 7 — нагреваемая золотая пластинка; 8 — корпус (плексиглас); 9 — термобатарея; 10 — измеряемая поверхность; 11 — паз для нагревательной обмотки; 12 — воздушный зазор; сплошная линия — постоянная термоэлектродная проволока; штриховая линия — медная термоэлектродная проволока

## 8.4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Измерение температуры движущихся поверхностей с помощью контактных термометров особенно затруднительно и его следует применять только в тех случаях, когда измерение температуры при помощи пирометров излучения невозможно. При измерениях с помощью контактных термометров различают в основном три следующих способа:

1. Жестко закрепленный на поверхности объекта измерительный датчик передает результаты измерения с помощью гибких соединительных проводов, контактов или контактных колец к стационарной измерительной установке.

2. Расположенный на движущейся поверхности объекта жестко закрепленный датчик передает результаты измерения на совместно с ним движущееся телеметрическое устройство. Сигналы датчика принимаются, обрабатываются и показываются стационарным приемным устройством.

3. Измерительный датчик располагается стационарно непосредственно над движущейся поверхностью, а температура передается от движущейся поверхности объекта измерительному датчику с помощью промежуточной среды (большей частью воздуха). К этой группе относят также измерительные устройства, у которых датчик скользит по движущейся поверхности объекта. При этом большей частью необходимо применять смазку.

1. У измерительных устройств, указанных в п. 1, гибкие соединительные провода можно применять только в тех случаях, когда речь идет о возвратно-поступательном движении, а не о прямолинейном или вращательном движении объекта, температура поверхности которого измеряется. Перемещающиеся синхронно контакты применяют преимущественно при небольших скоростях перемещения измеряемого объекта, например при вращательном движении, если в связи с размерами установки трудно расположить контактные кольца.

Переходные сопротивления и вторичные т. э. д. с. на контактах практически не вызывают затруднений, так как всегда можно выбрать соответствующие материалы. Применяя большое усилие прижатия и соответствующие схемы, можно практически полностью исключить влияние переходного сопротивления.

При измерении температуры поршней тепловых двигателей термоэлектродные проволоки термопар выводят к измерительным системам либо с помощью шарнирных устройств, либо передают т. э. д. с. через контакты, которые одновременно замыкаются в верхней и нижней мертвых точках хода поршня.

Значительно более широко применяются контактные кольца, которые используют прежде всего в схемах с термометрами сопротивления. Различными изготовителями выпускаются измерительные системы со щетками и с ртутными токосъемниками. Во всех этих системах трудно избежать присутствия паразитных т. э. д. с., а также переменных переходных сопротивлений, и прежде всего тогда, когда установка работает в тяжелых производственных условиях. Вследствие относительного перемещения и усилия прижатия между контактной щеткой и контактным кольцом возникает т. э. д. с., вызванная трением, которая в значительной мере зависит от сочетания использованных материалов. Графитосодержащие материалы, которые часто применяют для изготовления щеток в связи с постоянным переходным сопротивлением и низким трением, создают значительные по величине т. э. д. с. в паре с медью или серебром. Одинаковый материал для изготовления контактных колец и щеток можно применять только в том случае, когда скорости относительного перемещения невелики. Контактные кольца с ртутными контактами практически не нагреваются даже при высоких скоростях. Тем не менее, необходимо следить за хорошим выравниванием температуры, так как образующиеся слои амальгамы дают очень высокую т. э. д. с., например, по отношению к меди. Недостатком смоченных ртутью контактных колец является зависимость от положения. Однако уже выпускают системы с вертикальным расположением оси. Практически не оказывает влияния на передачу результатов замеров система с контактными кольцами при измерительных схемах с термометрами сопротивления, у которых сопротивления измерительного моста расположены на вращающейся системе. При этом через контактные кольца замыкаются только цепи диагоналей мостовой схемы.

Так как цепи питающего тока и гальванометра измерительной системы можно выполнить высокоомными, то изменяющееся переходное сопротивление контактных колец практически не оказывает влияния на результаты измерения. Т. э. д. с., образующаяся на контактных кольцах, существенно меньше влияет на результаты измерения с помощью термометров сопротивления, чем на измерения с помощью термопар, так как выходной сигнал измерительного моста примерно в 10 раз превышает т. э. д. с. термопары [8.31, 8.32].

При измерениях с помощью термопар в некоторых случаях можно в значительной мере уменьшить возникающую на контактных кольцах паразитную т. э. д. с., используя вспомогательные контуры, такие как компенсационные термопары (рис. 8.39).

II. У приборов второй группы результат измерения передается при помощи телеметрической системы. В принципе применимы все способы телеметрической передачи, однако на практике почти без исключения применяются индуктивные методы передачи. Индуктивную передачу результатов замеров при схемах с термометрами сопротивления во многих случаях легче осуществить, чем при измерении температуры термоэлектрическими термометрами. Поскольку обычная мостовая схема при соответствующем безындукционном исполнении сопротивлений измерительного моста может также работать на переменном токе, питающее напряжение и напряжение измерительной диагонали могут соответственно подводиться и сниматься как переменные напряжения. Обмотки трансформаторов, обычно залитые в пластмассу, должны быть очень точно установлены и надежно закреплены, так как любое изменение их положений приводит к изменению характеристик передачи. Поскольку оба трансформатора работают на одинаковой частоте, они не должны оказывать взаимного влияния. Недосток такой установки заключается главным образом в необходимости юстировки трансформаторов. Если применять такие системы, например при вытягивании перлоновых нитей, то практически при каждом ремонте необходимо заново выполнять юстировку (рис. 8.40). Этому недостатка лишено устройство, работающее с измерительным мостом Вина. В измерительном мосте Вина сопротивления и емкости включены по схеме, приведенной на рис. 8.41. Наличие в схеме усилителя с об-

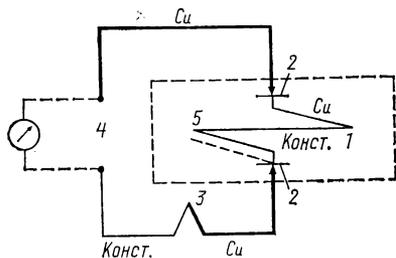


Рис. 8.39. Термоэлектрический термометр с контактными кольцами и компенсационной термопарой:  
 1 — вращающийся рабочий спай термопары; 2 — контактные кольца; 3 — неподвижный холодный спай компенсационной термопары с температурой спая 5; 4 — свободные концы термопары; 5 — вращающийся холодный спай термопары с температурой спая 3

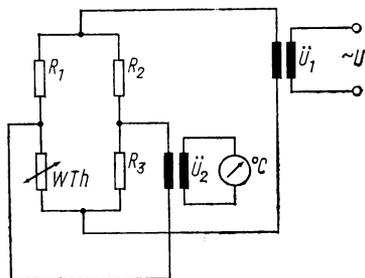


Рис. 8.40. Мостовая измерительная схема с термометрами сопротивления и индуктивной передачей результатов измерения:  
 $R_1, R_2, R_3$  — сопротивления измерительного моста;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  — трансформаторы индуктивной передачи;  $WTh$  — термометры сопротивления

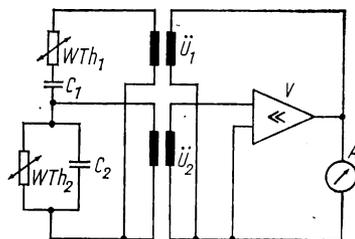


Рис. 8.41. Измерительная схема соединения термометров сопротивления с мостиком Вина:  
 $WTh_1, WTh_2$  — термометры сопротивления;  $C_1, C_2$  — емкости с низким температурным коэффициентом;  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  — трансформаторы;  $V$  — усилитель;  $A$  — измеритель частоты со шкалой ( $^{\circ}C$ )

ратной связью вызывает незатухающие колебания токов и напряжений, частота которых определяется величинами сопротивления и емкостей, так как только при этой частоте обратная связь осуществляется правильно по фазе. Сопротивлениями в схеме являются используемые для измерения температуры термометры сопротивления, а емкости образуются неподвижными и вращающимися элемен-

тами системы. При присоединении моста Вина к усилителю характеристики трансформаторной связи играют второстепенную роль. При выборе правильных размеров катушек ими можно пренебречь. Результат измерения передается в форме частоты, которая очень точно преобразуется в счетном устройстве в соответствующее цифровое показание температуры. Рассмотренный выше метод измерения температуры нашел широкое применение в текстильной промышленности на машинах для вытягивания нитей перлона. Применение этого метода ограничивается допустимой температурой термометров сопротивления и температурной зависимостью емкостей; таким образом, этот метод не применим для измерения температур выше  $500^{\circ}\text{C}$  [8.33, 8.34].

Значительно труднее при помощи индукционных методов осуществить передачу результатов измерения температуры термоэлектрическими термометрами.

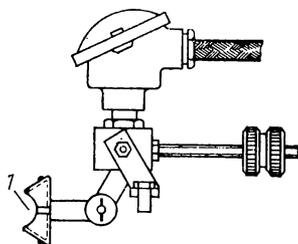


Рис. 8.42. Термоэлектрический термометр для измерения температуры выпуклых поверхностей (VDE/VDI 3511):

1 — рабочий спай термопары

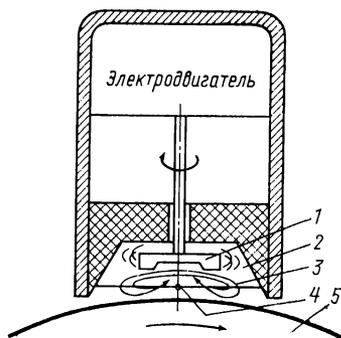


Рис. 8.43. Термовибратор фирмы «Hartmann und Braun»:

1 — крыльчатка вентилятора; 2 — измерительная камера; 3 — воздушный вихрь; 4 — измерительный датчик; 5 — поверхность объекта

Если, например, подвести т. э. д. с. термопары к многополюсному якорю, то индуктированное в статоре напряжение зависит не только от тока, протекающего в обмотке якоря, но и от скорости его вращения. Кроме того, коэффициент передачи зависит от геометрии катушек. Катушки обычно залиты в пластмассу и расположены так, чтобы исключить электромагнитные помехи, например, вызываемые магнитным полем земли (с помощью экранов из магнитномягкого сплава) [8.35].

3. Приборы третьей группы работают без сложных передающих систем. В простых устройствах применяются термоэлектрические термометры с ленточными термоэлектродами, подобные термометру, изображенному на рис. 8.35, или же термометры со специальной формой контактной поверхности, как у термометра, показанного на рис. 8.42. В обоих устройствах измерительный датчик скользит по движущейся поверхности объекта, так что под действием тепла трения возникает погрешность измерения. В связи с этим этот способ измерения можно применять только при небольших скоростях скольжения. Существенное улучшение достигается в случае использования обычных смазок или специальных смазывающих паст. Эти большей частью содержащие графит пасты снижают коэффициент трения и одновременно улучшают теплопередачу.

Использование воздуха в качестве передающей среды между измеряемой поверхностью и измерительным датчиком предусмотрено в термовибраторе, показанном на рис. 8.43. Измерительная камера, в которой расположен измерительный датчик, образована в детали из материала, плохо проводящего тепло. Расположенная также в измерительной камере крыльчатка вентилятора создает завихрение, которое подводит к термопаре граничные слои воздуха, находящегося в непосредственном тепловом контакте с движущейся поверхностью объекта и имеющего поэтому приблизительно ту же температуру. В связи с этим термо-

вибрулятор можно рассматривать в части электротехнических параметров как обычную термопару. Соответствующее конструктивное исполнение устройства благодаря отводу тепла позволяет поддерживать потери его на очень низком уровне. Часто оказывается, что температура окружающей среды вблизи движущегося объекта выше температуры помещения. Чтобы защитить прибор от перегрева, на том же валу двигателя расположен второй вентилятор, который охлаждает корпус прибора. Изготовитель прибора указывает следующие особые преимущества устройства: малое время срабатывания, отсутствие контакта с измеряемой поверхностью, независимость от характера поверхности, независимость от скорости движения и направления движения измеряемой поверхности, возможность присоединения любых вторичных измерительных устройств, например даже простых гальванометров [8.36].

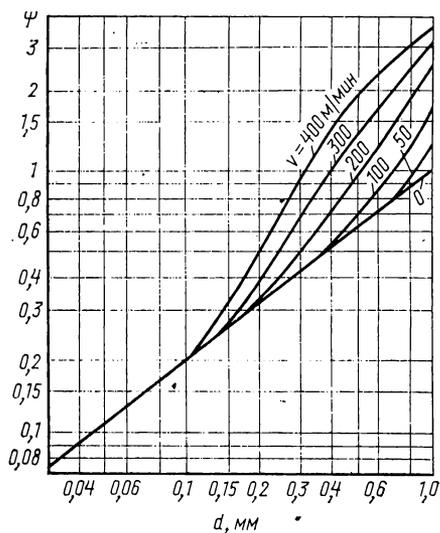


Рис. 8.44. Зависимость коэффициента  $\psi$  от расстояния  $d$  при различных окружных скоростях цилиндра (Крюгер [8.37])

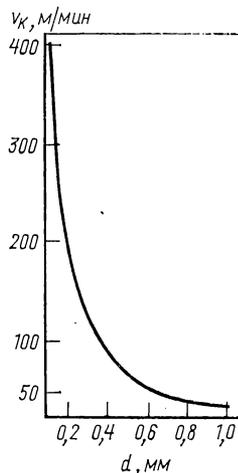


Рис. 8.45. Зависимость критической скорости  $v_k$  от расстояния  $d$  (Крюгер [8.37])

Сходный способ измерения описывает Крюгер [8.37]. Он располагает ленточную термопару непосредственно над поверхностью вращающегося цилиндра, так что датчик температуры находится внутри граничного слоя воздуха, который вращается вместе с цилиндром. В результате теоретического анализа теплоотдачи и обработки результатов опытов Крюгер получает приближенную формулу для разности между температурой поверхности цилиндра и температурой датчика:

$$\Delta T = a_t \psi(v, d). \quad (8.13)$$

Здесь  $a_t$  — коэффициент, учитывающий влияние температуры;  $\psi(v, d)$  — коэффициент, учитывающий влияние расстояния и скорости цилиндра. Зависимость  $\psi(v, d)$  представлена на рис. 8.44.

Влияние скорости становится заметным лишь после превышения некоторой критической скорости, зависящей от расстояния. Ниже этой критической скорости величина  $\psi$  и, таким образом, также величина  $\Delta T$  не зависят от скорости вращения цилиндра. Коэффициент  $a_t$  учитывает корректировку для различных температур. Таким образом, зависимость от температуры связана с тем, что перепад температур в воздушном зазоре становится тем больше, чем больше разность между

температурой цилиндра и температурой окружающей среды и чем меньше теплопроводность воздуха. Для  $a_t$  справедлива формула

$$a_t = \beta [(T_0 - T_u)/\lambda_t]. \quad (8.14)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $\beta$  — эмпирическая константа, зависящая от опытной аппаратуры ( $\beta \approx 10^{-2}$  Вт/мК);  $T_0$  — температура поверхности цилиндра;  $T_u$  — температура окружающей среды;  $\lambda_t$  — теплопроводность воздуха на поверхности цилиндра, Вт/мК.

Величина погрешности, определенная при помощи корректировочной формулы:

$$\Delta T = \beta \frac{T_0 - T_u}{\lambda_t} \psi(v, d), \quad (8.15)$$

очень хорошо совпадает с действительными результатами измерений. На рис. 8.45 приведена зависимость критической скорости перемещения поверхности цилиндра от расстояния между датчиком и поверхностью цилиндра.

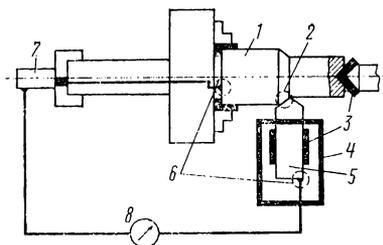


Рис. 8.46. Устройство для измерения температуры режущей кромки токарного резца (по Готтвайну):

1 — обрабатываемая деталь; 2 — рабочий спай термопары; 3 — изоляция; 4 — изоляционный защитный кожух; 5 — резец; 6 — свободные концы термопары; 7 — ртутный контакт; 8 — цифровое бестоковое измерение т. э. д. с.

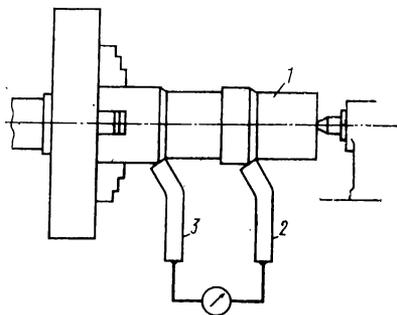


Рис. 8.47. Схема метода двух резцов: 1 — обрабатываемая деталь; 2, 3 — резцы

В результате излучения практически не возникает погрешностей. При температурах  $70-180^\circ\text{C}$  и расстояниях  $0,3-1$  мм возникают погрешности менее  $0,2$  К, если постоянная излучения находится в пределах  $2,77-0,11$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Температуру поверхности измеряют также при исследованиях режущего инструмента. Обширные исследования были проведены прежде всего для токарных резцов с тем, чтобы определить температуру режущей кромки. Имеются различные способы измерения. При обработке с помощью одного резца [8.38] измеряют т. э. д. с., возникающую между токарным резцом и обрабатываемой деталью (рис. 8.46). В зависимости от расположения инструмента результаты измерения могут сильно различаться, так как обычно в измерительном контуре имеется несколько материалов, которые создают паразитные т. э. д. с.

Лучшие результаты дает метод двух резцов (рис. 8.47), описанный Райхелем [8.39]. Для обеспечения безупречного измерения резцы должны иметь различные термоэлектрические характеристики и в обеих точках резания должны быть одинаковые температуры. Так как в большинстве случаев при различных термоэлектрических характеристиках резцы имеют также различные значения теплопроводности, метод часто не дает однозначных температур. Его применяют главным образом для того, чтобы продемонстрировать однородность поставленного инструмента с точки зрения режущих свойств. Измерение температурных полей в резце возможно при использовании так называемых микротермопар. Если

резец состоит из однородного материала, то его можно использовать в качестве термоэлектрода термодпары. Для резцов с твердосплавными пластинами необходимо обязательно устанавливать комплектные термодпары, так как иначе возникают слишком большие погрешности измерения (рис. 8.48) [8.40, 8.41].

## 8.5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

При установке термометров в твердых телах необходимо рационально использовать указания, приведенные в разделе 7.2 (влияние теплопередачи при измерениях температуры поверхности). Обусловливаемое датчиком нарушение температурного поля зависит от:

- 1) диаметра и глубины отверстия;
- 2) разности теплопроводностей тела и датчика температуры;
- 3) градиента температур в теле;
- 4) внутренней конструкции термометра.

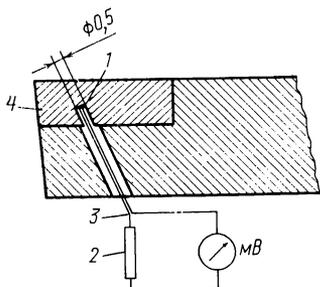


Рис. 8.48. Измерение температуры в резце с твердосплавной пластиной с помощью встроенной термодпары: 1 — рабочий спай термодпары; 2 — выравнивающее сопротивление; 3 — холодный спай термодпары; 4 — твердосплавная пластина

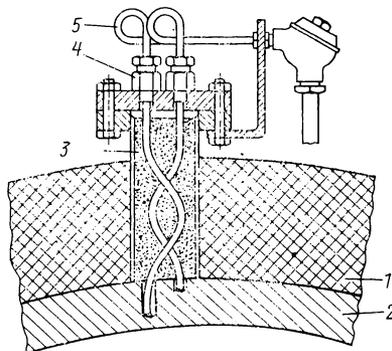


Рис. 8.49. Измерение разности температур в стенке кожуха турбины с помощью кабельных термодпар: 1 — теплоизоляция; 2 — кожух турбины; 3 — хлопья асбеста; 4 — зажимная гайка; 5 — кабельные термодпары диаметром 4,8 мм

Небольшие отверстия мало искажают температурное поле, поэтому для измерений следует предпочитать термометры небольшого диаметра, например миниатюрные термометры сопротивления, изолированные термоэлектродные проволоки термодпар или кабельные термодпары (рис. 8.49). Глубина отверстия в телах с хорошей теплопроводностью должна составлять примерно пятикратную величину, в телах с низкой теплопроводностью 10—15-кратную величину диаметра отверстия [8.42]. Только в телах с хорошей теплопроводностью и при низких градиентах температур можно допускать отверстия большего диаметра. Между термочувствительной частью термометра (измерительное сопротивление у термометра сопротивления или рабочий спай у термодпары) и телом необходимо по возможности обеспечить хороший тепловой контакт; напротив, тепловой контакт соединительных проводов должен соответствовать конкретным производственным условиям. Если теплопроводность датчика температуры соответствует теплопроводности тела или если в точке измерения имеется равномерное распределение температуры, то наличие теплового контакта при прокладке проводов не приводит к появлению погрешности измерения. Если же теплопроводность термометра отличается от теплопроводности тела, а в теле имеется градиент температур,

то более благоприятным оказывается применение тепловой изоляции. Ниже приведены данные о теплопроводности  $\lambda$  различных материалов при 20°С, (Вт/(м·К)):

### I. Металлы

	Вт/(м·К)
Алюминий чистый . . . . .	264
Алюминий (99,75%)	235
Свинец . . . . .	36
Бронза . . . . .	36—84
Дюралюминий (94—96% Al)	170
Чугун . . . . .	48—60
Магний (99,6%)	148
Латунь* (70% Cu, 30% Zn) . . . . .	115
Латунь† (61,5% Cu, 38,5% Zn)	82
Нейзильбер (22% Zn, 62% Cu, 15% Ni)	25
Никель (технический)	60—90
Хромоникелевая сталь 18/8	15
Жаропрочная сталь	43—56
Жароупорная сталь	13—23
NiCr (ДИН 43710)	13
Хромель . . . . .	19,7
Никель (ДИН 43710)	60
Алюмель . . . . .	30
Железо (ДИН 43710) . . . . .	70—77
Константан (ДИН 43710)	30—43
Медь (ДИН 43710) . . . . .	400
Платина (ДИН 43710) . . . . .	72
Платинородий (ДИН 43710)	31
Цинк . . . . .	116
Олово . . . . .	67

### II. Неорганические твердые материалы

Шамотный кирпич . . . . .	0,64—1,4
Силикатный кирпич . . . . .	1,2—1,5; 0,75
Бетон, воздушно-сухой	0,92; 1,14
Гранит . . . . .	3
Кирпич, воздушно-сухой	0,4—0,54
Стекло для термометров	1,0
Кварцевое стекло . . . . .	1,4
Зеркальное стекло . . . . .	1,1
Земля с крупным гравием, влажность 10% .	0,54
Глинистая почва, влажность 50%	1,32
Песчаник . . . . .	1,7—2,16
Мрамор . . . . .	2,9
Лед . . . . .	2,28
Фарфор . . . . .	1,1—1,8
MgO . . . . .	15—20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	18—25

### III. Органические твердые вещества

Бакелит . . . . .	0,24
Резина (мягкая)	0,13—0,24
Кожа . . . . .	0,144—0,17
Бумага . . . . .	0,144
Дуб (радиальное направление), воздушно-сухой .	0,18—0,22
Ель (радиальное направление), воздушно-сухая .	0,144
Каменный уголь . . . . .	0,22—0,26
Угольная пыль . . . . .	0,084
Высокотемпературный кокс	0,72

При установке термометров в телах с плохой теплопроводностью необходимо принимать специальные меры предосторожности с тем, чтобы вызываемые соединительными проводами погрешности вследствие теплопроводности не исказили результатов измерения (см. 7.2). Внутренняя конструкция датчика температуры играет роль в том случае, если она затрудняет теплопередачу (вследствие, например, наличия промежуточных слоев воздуха), несмотря на то что наружный защитный чехол термометра может быть приведен в хороший тепловой контакт с измеряемым телом (см. 7.1.1 и 7.1.3) [8.43].

Для измерения температуры нагретых поковок применяют термопары, встроенные в стальной закаленный дюбель, внедряемый в поковку выстрелом. Благодаря этому достигается очень хороший тепловой контакт с измеряемым материалом (рис. 8.50) [8.44].

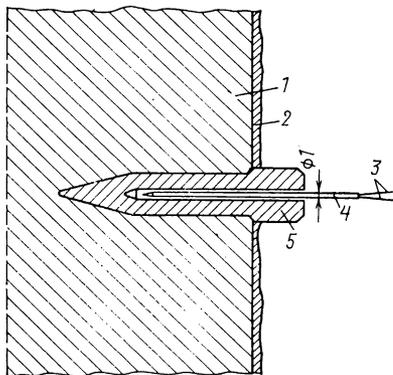


Рис. 8.50. Измерение температуры поковки при помощи термопары, встроенной в пристреливаемый дюбель:  
1 — поковка; 2 — окалина; 3 — термопара; 4 — металлическая трубка; 5 — дюбель

На рис. 8.51 показан термоэлектрический термометр для измерения температуры корпусов паровых турбин. В процессе разгона в корпусе турбины возникают большие градиенты температуры, которые приводят к чрезмерным механическим напряжениям. При помощи датчиков температуры, расположенных на различной глубине в стенке корпуса турбины, можно определить распределение температуры и так управлять процессом разгона, чтобы максимально допустимые тепловые напряжения не превышались. Хорошая теплопередача к рабочему спая термопары достигается за счет конического острия на конце трубчатого внешнего термоэлектрода и низкого отвода тепла через усиленную керамическую теплоизоляцию шейки термометра [8.45] (измерение температуры при помощи термической модели, см. 8.6.2).

В экструдерах часто необходимо измерять и регулировать температуру стенки цилиндра шнекового пресса. Для этой цели можно использовать термометр в соответствии с рис. 3.45. Пружина и штыковой наконечник позволяют быстро заменять термометр и устанавливать его на различной глубине. Сферический или

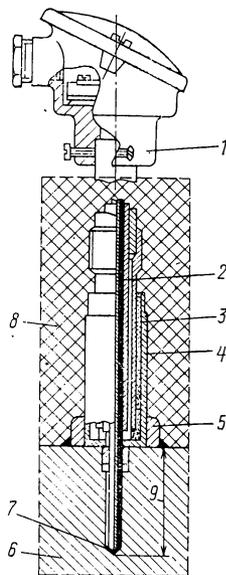


Рис. 8.51. Установка термоэлектрического термометра для измерения температуры стенки корпуса турбины:  
1 — головка термометра; 2 — изоляционная трубка внутреннего термоэлектрода; 3 — дополнительная керамическая теплоизоляция; 4 — монтажный патрубок; 5 — монтажный штуцер; 6 — корпус турбины; 7 — рабочий спай термопары; 8 — тепловая изоляция кожуха турбины; 9 — глубина погружения

конический рабочий спай, выполненный из серебра, обеспечивает хорошую теплопередачу от объекта к рабочему спаю терморпары термометра.

На рис. 8.52 показан пример применения термоэлектрических термометров в медицине. Термометр состоит из дифференциальной термобатареи, смонтированной в чехол с двумя иглами; одна из игл снабжена устройством нагрева. Если обе иглы одновременно ввести в ткань человека или животного, то разность температур нагреваемой и ненагреваемой игл датчика будет мерой кровоснабжения тканей [8.30].

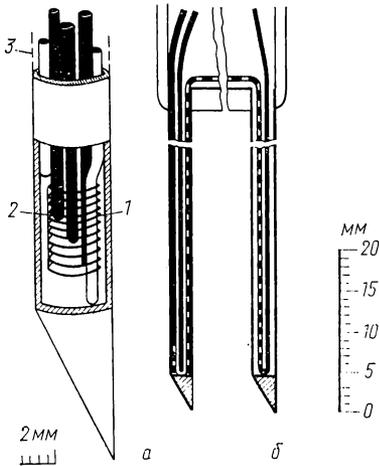


Рис. 8.52. Дифференциальный термоэлектрический термометр для измерения кровоснабжения тканей:

*а* — обогреваемые рабочие спаи дифференциальной термобатареи; *б* — необогреваемые рабочие спаи дифференциальной термобатареи; 1 — нагревательная обмотка; 2 — рабочие спаи терморпар термобатареи; 3 — соединительные провода нагревателя

температуру обмотки, а некоторое промежуточное значение, так как они расположены между изоляцией медной обмотки и стальными частями трансформатора или электрической машины. При очень больших перегрузках, например при коротком замыкании, показываемая термометром температура может в связи с этим значительно отставать от действительной температуры меди. Этого можно избежать, если в качестве измеряемой величины для определения температуры использовать непосредственно изменение сопротивления медной обмотки или если воспроизвести процесс нагрева в так называемой термической модели.

Поскольку трансформаторы и электрические машины до достижения предельной температуры можно эксплуатировать с некоторой перегрузкой, необходимо контролировать температуру во время эксплуатации. Для ориентировочного замера температуры генераторов пользуются электродинамическим измерительным прибором или автоматическим компенсационным измерительным прибором; при этом измеряют отношение силы тока к напряжению на медной обмотке. Чтобы обеспечить независимость от переходных сопротивлений на обычных токоподводящих щетках возбудителя, для съема напряжения применяют специальные щетки. Кратковременные повышения напряжения сглаживаются дросселем перед обмоткой напряжения измерительного устройства. У трансформаторов на переменный нагрузочный ток накладывают небольшой постоянный ток, который используется для измерения сопротивления обмоток в нагретом состоянии [8.46]. В схеме, представленной на рис. 8.53, переменный ток при помощи соответствующих дросселей и фильтров отводится от измерительных приборов постоянного тока. Так как измерительные приборы непосредственно связаны с высоким напряжением, они должны быть соответствующим образом изолированы и снабжены

## 8.6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

### 8.6.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Проще всего измерять температуру медных обмоток с помощью пазового термометра сопротивления. Платиновую или медную обмотку такого термометра выполняют строго бифилярной (см. 3.2.2.2), так что даже очень сильные магнитные поля индуцируют в термометре сопротивления лишь очень слабые переменные напряжения и их составляющие в выходном сигнале не вызывают в измерительной схеме погрешностей измерения. Пазовые термометры показывают не

световыми указателями. При тщательном выборе фильтров и дросселей погрешность измерения составляет 1—3 К.

При снятии кривых охлаждения обмоток трансформаторов можно избежать погрешностей измерения, вызванных индуцированными токами, если измерения производить на постоянном токе [8.47]. Для трансформатора справедливо соотношение

$$\ddot{u} = U_1/U_2 = n_1/n_2, \quad (8.16)$$

где  $\ddot{u}$  — коэффициент трансформации;  $U_1, U_2$  — напряжение обмоток 1 и 2 соответственно;  $n_1, n_2$  — число витков обмоток 1 и 2 соответственно.

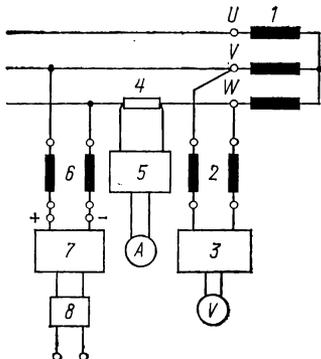


Рис. 8.53. Схема для измерения температуры медных обмоток электрических машин:

1 — обмотка машины (трансформатора); 2, 3 — фильтры в схеме измерения напряжения; 4 — шунт для измерения силы тока; 5 — фильтр в схеме измерения силы тока; 6, 7 — фильтры в схеме вспомогательного питания; 8 — питающий агрегат постоянного тока

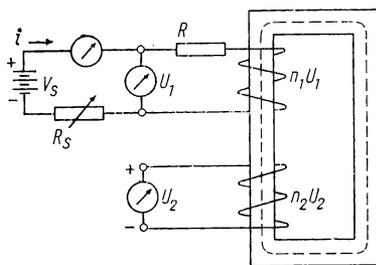


Рис. 8.54. Схема для определения кривых охлаждения трансформаторов (по Тассикеру)

Для измерения применяют схему в соответствии с рис. 8.54. Сначала трансформатор нагревают коротким замыканием, затем его отсоединяют от сети и присоединяют к измерительной схеме (в соответствии с рис. 8.54). После окончания переходного процесса, вызванного включением, магнитный поток трансформатора изменяется только под влиянием изменяющегося сопротивления меди обмотки 1. Для измерения индуцированного напряжения в обмотке 2 необходимо применять вольтметр с очень большим входным сопротивлением. По измеренному значению  $U_2$  и по формуле (8.16) можно определить  $U_1$ . Если теперь ввести обозначение  $R_A = U/i$ , где  $U$  — напряжение, показываемое вольтметром  $V$ , а  $i$  — ток, измеряемый амперметром  $A$ , то сопротивление медной обмотки будет равно  $R = R_A - U_1/i = R_A + \Delta R$ .

Величина  $\Delta R$  представляет собой погрешность определения сопротивления медной обмотки 1 при измерении на постоянном токе. Для больших трансформаторов  $\Delta R$  может составлять несколько процентов.

## 8.6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В термической модели часть энергии, приводящей к нагреву устройства, подлежащего защите или контролю, подводится к телу, которое выполнено так, что его характеристики нагрева по возможности точно соответствуют характери-

кам этого устройства. У масляного трансформатора величина и длительность допустимой нагрузки зависят не только от габарита трансформатора, но также от температуры масла и от температуры окружающей среды. Термическая модель

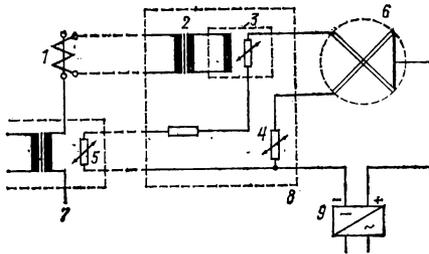


Рис. 8.55. Контроль температуры обмотки масляного трансформатора при помощи термической модели (по данным фирмы «Siemens»):

1 — трансформатор тока; 2 — промежуточный трансформатор; 3 — моделирующее тело; 4 — термометр для измерения температуры окружающей среды; 5 — термометр для измерения температуры масла; 6 — показывающий прибор; 7 — контролируемый трансформатор; 8 — термическая модель; 9 — выпрямитель

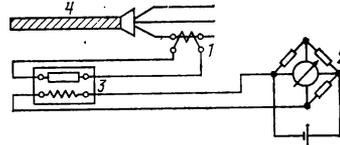


Рис. 8.56. Контроль температуры кабеля при помощи термической модели (метод фирмы «Grüb, Täuber und Co»):

1 — трансформатор тока; 2 — мостовая измерительная схема; 3 — моделирующее тело (нагревательное устройство и термометр сопротивления); 4 — контролируемый кабель

трансформатора состоит из тела, нагреваемого током нагрузки трансформатора; условия теплоотдачи этого тела соответствуют условиям теплоотдачи трансформатора. По разности температур модели и окружающей среды и по температуре масла в трансформаторе получают температуру его обмотки (рис. 8.55).

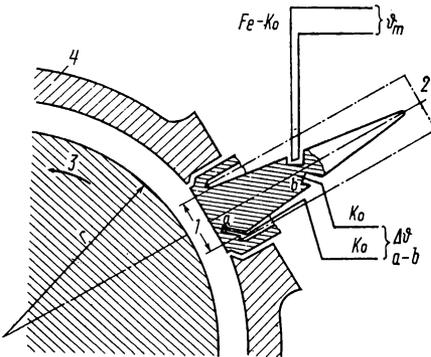


Рис. 8.57. Контроль температуры ротора паровой турбины с использованием термической модели:

1 — торцовая поверхность моделирующего тела; 2 — защита от излучения; 3 — ротор турбины; 4 — кожух турбины;  $r$  — радиус ротора турбины;  $\theta_m$  — средняя температура

Аналогичным образом измеряют также температуру электрических кабелей [8.48]. Термическую модель в этом случае также нагревают, например за счет отбираемой от контура тока пропорциональной доли нагрузочного тока, и температуру перегрева измеряют с помощью термометра сопротивления или термоэлектрического термометра (рис. 8.56).

В стенке кожуха паровой турбины при разгоне или изменении нагрузки происходят изменения температуры, которые приводят к опасным перенапряжениям в статоре и роторе турбины. Превышение максимально допустимых значений разности температур необходимо контролировать при помощи специальных устройств. В наружный кожух для этой цели обычно встраивают термоэлектрический термометр (см. 8.5).

Ротор турбины подвержен действию нестационарных термических напряжений, особенно в области полости ступени и часто подвергается большей опасности, чем корпус или фланцы корпуса турбины. Поэтому контроль температуры ротора особенно важен. Результаты замеров температуры ротора, вращающегося с высокой скоростью, недостаточно надежны, поскольку выполняются в тяжелых условиях работы электростанции в связи с большой

длительностью межремонтных периодов. Кроме того, сам по себе агрегат весьма труден для обслуживания и испытаний. С помощью термической модели ротора можно достаточно точно воспроизводить нестационарное распределение температуры по его радиусу (рис. 8.57) [8.49]. Измерительный стержень специального зонда выполнен так, что в нем практически в каждый момент распределение температуры такое же, как по радиусу  $r$  ротора турбины. Между обемными точками замера  $a$  и  $b$  измерительного стержня имеется всегда такая же разность температур  $\Delta\theta$ , как и между поверхностью ротора и его серединой. Торцовая сторона измерительного зонда обтекается тем же самым паром примерно с той же скоростью, что и поверхность ротора. При одинаковом коэффициенте теплоотдачи получается аналогичная термическая характеристика. Измерительный стержень должен быть снаружи защищен экраном от воздействия излучения, так как обычно температура стержня превышает  $400^\circ\text{C}$ . Разность температур  $\Delta\theta$  определяется с помощью кабельных термопар или, как показано на рис. 8.57, константановых проволочек, причем материал измерительного зонда выполняет функцию второго термоэлектрода термопары.

### 8.6.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

В зависимости от вида изоляции для электрических кабелей устанавливают различные допустимые максимальные температуры. В то время как в простых электрических сетях, например радиальных или кольцевых, нагрузка кабеля

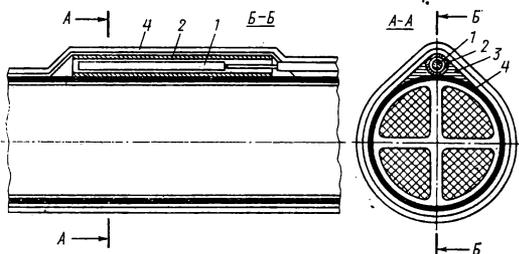


Рис. 8.58. Установка термометра сопротивления (Pt100 по ДИН 43760) на кабеле со свинцовой оболочкой:

1 — измерительное сопротивление; 2 — медная гильза со свинцовой оболочкой; 3, 4 — наружная изоляция

определяется потребителями, в сложных петлевых сетях часто создается иная ситуация. Если в первом случае достаточно защита при помощи плавких предохранителей, то во втором случае необходим непрерывный контроль температуры

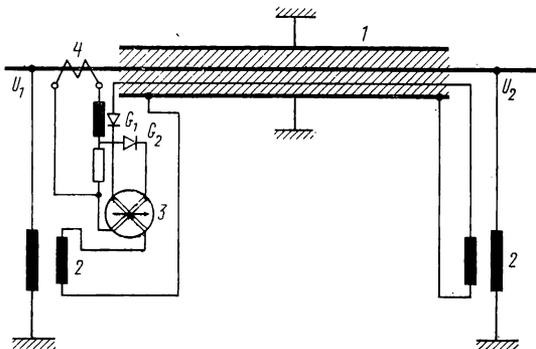


Рис. 8.59. Измерительное устройство для определения температуры жил кабелей с применением вспомогательного провода в кабеле и свинцовой оболочки в качестве обратного провода: 1 — кабель; 2 — трансформатор напряжения; 3 — измерительный прибор; 4 — трансформатор тока

кабелей. Нагрев вызывается омическими потерями в проводниках и вихревыми токами в свинцовой оболочке и стальной броне кабеля. Обычно температуру измеряют термометром сопротивления (Pt 100, ДИН 43760), который размещают на

свинцовой оболочке кабеля, однако еще в пределах наружной изоляции (рис. 8.58) [8.50, 8.51]. Измеренная таким образом температура обычно ниже, чем температура середины кабеля, так как в нагруженном кабеле всегда имеется тепловой поток, направленный наружу. Разность температур  $\Delta\theta$  зависит от толщины и от теплопроводности отдельных  $n$  слоев и может быть вычислена по формуле

$$\Delta\theta = \frac{P}{2\pi l} \sum_1^n \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_n + 1}{r_n}. \quad (8.18)$$

Здесь  $P$  — мощность потерь;  $r$  — радиус;  $l$  — длина кабеля;  $\lambda$  — теплопроводность.

Установленная контрольными приборами предельная температура на  $\Delta\theta$  ниже, чем верхняя предельная температура, обусловленная изоляцией. Допустимое значение  $\Delta\theta$  зависит также и от температуры окружающей среды.

Можно также находить температуру электрических кабелей по изменению сопротивления меди проводников или по изменению сопротивления свинцовой оболочки. При этом необходимо учитывать, что оболочка обычно состоит из технически чистого свинца, температурный коэффициент которого надо определять. Кроме того, результат замера может искажаться под влиянием влаги и гальванических э. д. с. На рис. 8.59 показана схема измерения температуры жилы кабеля при помощи вспомогательного провода; при этом в качестве обратного провода используют свинцовую оболочку [8.52]. Зависящее от температуры активное сопротивление кабеля измеряют при помощи логометрического измерительного устройства по силе тока и падению напряжения. Нагрузочный ток измеряют с помощью трансформатора тока, падение напряжения — с помощью двух трансформаторов напряжения (в начале и в конце кабеля). Такое измерение можно выполнять только на кабелях, нагруженных рабочим током. Температуру жилы кабеля при отключенном токе можно измерить с помощью двух соединенных в петлю вспомогательных проводов и измерительной схемы, показанной на рис. 8.60 [8.48]. При применении таких измерительных устройств нагрузочная способность кабеля может быть использована более полно, так как она зависит не только от силы тока в кабеле, но и от температуры окружающей среды.

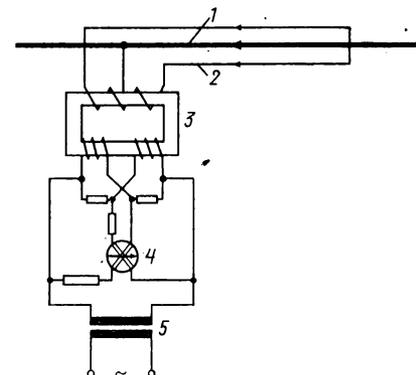


Рис. 8.60. Измерение температуры жил кабеля с применением двух вспомогательных проводников:

1 — внутренняя жила кабеля; 2 — вспомогательные проводники (в кабеле); 3 — измерительный трансформатор; 4 — измерительный прибор; 5 — трансформатор для вспомогательного тока

стого свинца, температурный коэффициент которого надо определять. Кроме того, результат замера может искажаться под влиянием влаги и гальванических э. д. с. На рис. 8.59 показана схема измерения температуры жилы кабеля при помощи вспомогательного провода; при этом в качестве обратного провода используют свинцовую оболочку [8.52]. Зависящее от температуры активное сопротивление кабеля измеряют при помощи логометрического измерительного устройства по силе тока и падению напряжения. Нагрузочный ток измеряют с помощью трансформатора тока, падение напряжения — с помощью двух трансформаторов напряжения (в начале и в конце кабеля). Такое измерение можно выполнять только на кабелях, нагруженных рабочим током. Температуру жилы кабеля при отключенном токе можно измерить с помощью двух соединенных в петлю вспомогательных проводов и измерительной схемы, показанной на рис. 8.60 [8.48]. При применении таких измерительных устройств нагрузочная способность кабеля может быть использована более полно, так как она зависит не только от силы тока в кабеле, но и от температуры окружающей среды.

## 8.6.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВО ВЗРЫВООПАСНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Взрывоопасные помещения в соответствии с нормами VDE 0170—0171 делят на три группы. В помещениях группы 0 в течение всего периода эксплуатации имеются взрывоопасные смеси. В помещениях группы 1 взрывоопасные смеси появляются в некоторых случаях, в то время как в помещениях группы 2 опасность взрыва появляется только в случае повреждения. Горючие жидкости и пары в зависимости от их температуры воспламенения делят на группы, приведенные ниже:

Температура, °С	450	300	200	135	100	85
Обозначение	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$

При монтаже установок контроля температуры имеются две области, в которых взрывоопасные смеси приходят в соприкосновение с датчиком. Если в зоне измерения имеются взрывоопасные смеси, то измеряемая температура должна быть ниже температуры воспламенения данной группы газовой смеси. Защитный чехол (арматура) измерительного датчика предотвращает возможность воспламенения газовой смеси за счет энергии, подводимой к измерительному датчику.

В тех случаях, когда измерения выполняют с помощью термометров сопротивления без специальной защитной арматуры, присоединенный контур тока должен быть выполнен так, чтобы воспламенения не могло произойти даже при перегрузке цепи в результате короткого замыкания или при разгрузке ее вследствие обрыва. Такой контур тока называется искробезопасным. Все кабели и провода искробезопасного контура тока должны обозначаться синей краской.

Если в клеммном отсеке головки термометра появляются взрывоопасные пары или газовые смеси, то можно также работать с искробезопасными контурами тока при условии, что измеряемая температура ниже температуры воспла-

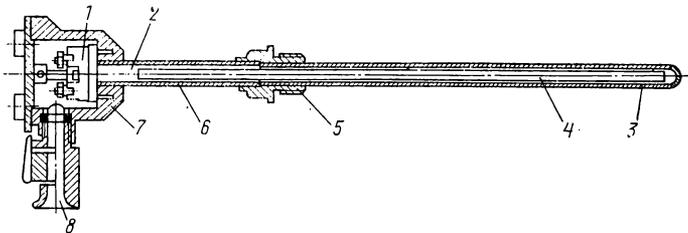


Рис. 8.61. Термометр сопротивления для взрывоопасных помещений (зона 0, группа воспламенения  $G_1-G_6$ ):

1 — клеммный отсек головки термометра ( $Ex$ )  $e$ ; 2 — уплотнение зазора ( $Ex$ )  $d$ ; 3 — защитный чехол; 4 — измерительная вставка; 5 — крепежная деталь; 6 — шейка термометра; 7 — головка термометра; 8 — штуцер соединительного кабеля

менения данной группы газовой смеси. Термоэлектрические термометры, непосредственно соединенные с показывающими гальванометрами, считаются искробезопасными. Если измеряемые температуры превышают температуру воспламенения данной группы взрывоопасной смеси, то при использовании обычных термометров сопротивления и термоэлектрических термометров пары смеси могут через присоединительную головку попасть в защитный чехол, там воспламениться и дать обратную вспышку. В этом случае следует применять термометры, безопасные с точки зрения обратной вспышки. На рис. 8.61 показано исполнение с уплотнением между внутренним пространством защитного чехла и клеммным отсеком головки термометра. При воспламенении во внутреннем пространстве защитного чехла пламя надежно гасится в уплотнении и взрыв не может распространиться наружу.

Кабели с металлической оболочкой по типу кабельных термопар, начиная с длины в несколько сантиметров от конца, являются практически газонепроницаемыми и их можно использовать в качестве уплотнения. Ориентировочная газопроницаемость кабеля в металлической оболочке длиной 1 м, диаметром 6 мм с изоляцией из окиси магния составляет около  $1 \cdot 10^{-6}$  мкБар·л/с. Для электрических термометров можно практически использовать только следующие защитные мероприятия:

- 1) ( $Ex$ )  $i$  — применение искробезопасных контуров тока;
- 2) ( $Ex$ )  $d$  — герметизация (например, применение уплотнений или соединительного кабеля с металлической оболочкой);
- 3) ( $Ex$ )  $e$  — обеспечение повышенной безопасности (обычно только для клеммных отсеков головок термометров).

Во многих случаях указывают также защитное исполнение ( $Ex$ )  $s$  (специальное защитное исполнение). Для этих термометров необходимо соблюдать при эксплуатации особые условия, если заранее нельзя определить назначение термо-

метра или если термометр должен применяться по возможности универсально. Взрывобезопасные термометры имеют особое обозначение и на их табличке должен быть указан номер испытания в Федеральном физико-техническом институте. Кроме того, необходимо иметь специальное разрешение на производство работ, которое выдается территориальной организацией госнадзора. За приводимые на табличке термометра данные строительного характера отвечает изготовитель термометра. Все мероприятия, необходимые для практической эксплуатации и монтажа, должен контролировать потребитель [8.53, 8.54].

Аналогичные предписания действуют и в области защиты от взрыва рудничного газа. Однако они не идентичны требованиям по защите от других взрывов, так что электрические датчики температуры, которые обозначены как взрывобезопасные, нельзя без специальных мер применять на предприятиях, где существует опасность взрыва рудничного газа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 8.1. *Naumann, A.*: Neue elektrische Raumthermometer. Siemens-Z. 1951, 5, S. 67—70.
- 8.2a. *Lück, W.*: Die Meßfehler der Lufttemperaturmessung. Regelungstechn. Praxis u. Prozeß-Rechentechn. 1972, H. 1, S. 18—22.
- 8.2b. *Hausen, H.*: Die Messung von Lufttemperaturen in geschlossenen Räumen mit nicht, strahlungsgeschützten Thermometern. Z. techn. Phys. 1924, 5, S. 169—196.
- 8.3. *Röhnik, R., Lieneweg, F.*: Die Erfassung von Witterungseinflüssen bei der Heizungs-Lüftungs- und Klimaregelung. Heizung—Lüftung—Haustechnik. 1963, 14, S. 106—110.
- 8.4. *Bradtko, F., Liese, W.*: Hilfsbuch für raum- und außenklimatische Messungen. Berlin, 1937.
- 8.5. *Größ, H.*: Messung des Innenraumklimas (Katathermometrie). Handbuch der technischen Betriebskontrolle. Bd. III, Phys. Meßmethoden Kap. V. S. 377—400. Akad. Verlagsgesellschaft, 3. Auflage, Leipzig, 1959.
- 8.6. *Lieneweg, F.*: DBP 1002537 (1956).
- 8.7. *Blackl, A.*: A proposed new type of pyrometer for measuring gas temperatures. J. Sci. Instr. 1941, 18, S. 113—115.
- 8.8. *Rowse, R. H.*: Further considerations to a proposed new type of pyrometer for measuring gas temperatures. J. Sci. Instr. 1941, 18, S. 240—242.
- 8.9. *Kahnwald, H.*: Entwicklung eines neuen Absaugthermometers zur Messung hoher Gastemperaturen. Arch. Eisenhüttenwesen. 1963, 34, S. 673—678.
- 8.10. *Land, T., Barber, R.*: The Design of Suction Pyrometers. Trans. Soc. Instr. Technol. 1954, 6, S. 112—123.
- 8.11. *Förster, S.*: Pneumatisches Verfahren zur Messung hoher zeitlich schnell veränderlicher Gastemperaturen. Dissertation. 1963, TH Aachen.
- 8.12. *Fischer, S.*: Die Temperaturmessung mit dem thermodynamischen Temperaturmessgerät. Wiss. Z. Techn. Universität Dresden, 1956, 15, H. 1, S. 89—92.
- 8.13. *Scott, D. S.*: Flowmeters for the measurement of gas temperatures. Chem. Eng. Sci. 1960, 17, S. 127.
- 8.14. *Benedict, R. P.*: Temperature measurement in moving fluids. ASME Publikation № 59-A-257, 1960.
- 8.15. *Werner, F. D.*: Total-temperature measurement. Instr. and Contr. Systems, 1960, S. 800—801.
- 8.16. *Faul, J. C.*: Thermocouple performance in gas streams. Instr. and Contr. Systems, Vol. 35, 1962, H.-12, S. 251—255.
- 8.18. *Neher, E.*: Bestimmung von hohen Gastemperaturen. Arch. techn. Messen, V 21654, Okt. 1958.
- 8.19. *Leukel, W., Braud, J.*: Verfahren und Geräte zur Messung von Flammeneigenschaften. Arch. Eisenhüttenwes., 1968, 39, H. 2, S. 119—126.
- 8.20. *Henning, P. G.*: Temperaturmessung an Kunststoffverarbeitungsmaschinen in «Techn. Temperaturmessung». VDI-Bericht, № 112, 1966, S. 133—135.
- 8.21. *Weber-Klein, P.*: Meß- und Regeltechnik in Glashütten. Zeitschrift für Glaskunde. 32, H. 3, S. 107—120 und H. 4, S. 158—172.
- 8.22. Firmenschrift. Firma Friedr. Krupp GmbH, Essen. Dreifache Standzeit von Thermoelementen für Aluminiumschmelzen.
- 8.23. *Liebig, W.*: Probleme der Temperaturmessung und Regelung an Leichtmetallschmelz- und vergießöfen. Aluminium, 39, H. 11, 1963, S. 683—688.
- 8.24. *Pfingst, H., Krausch, F.*: Thermoelektrische Temperaturmessung in Gießstahl zur Ermittlung des Temperaturabfalls und-Profiles bei 65t Pfannen. Neue Hütte 9, 1964, H. 9, S. 524—528.
- 8.25. *Barth, G.*: Neuere Untersuchungen über die Genauigkeit der Tauchelementmessung. Stahl und Eisen, 1964, H. 84, S. 953—957.
- 8.26. *Капнов И. В.* Об измерении температуры жидкой стали низкотемпературными датчиками. «Заводская лаборатория», 1960, т. 26, № 6, с. 733—736.
- 8.27a. *Fischer, A.*: Die kontinuierliche thermoelektrische Messung des Temperaturverlaufs der Eisenschmelzen bei den Blasstahlverfahren. Stahl und Eisen, 1962, 82, № 13, S. 797—808.

- 8.27b D. Patentschrift 1 054 735: In einem Schmelzbehälter mizeiner Schutzvorrichtung eingebauter Temperaturfühler.
- 8.28a. *Watson, G. G.*: Techniques for measuring surface temperature part 4. Instrument Practice, June 1966, S. 517—524.
- 8.28b. *Watson, G. G.*: Techniques for measuring surface temperature part 2. Instrument Practice, April, 1966, S. 335—341.
- 8.28c. *Löffler, H. I., Henrich, H.*: Die Messung von Oberflächentemperaturen mit aufgedampften Widerstandsthermometern. Chemie Ing. Techn., 1958, 30, H. 11, S. 708—714.
- 8.29. Normblatt: DIN 13402 (Entwurf Juni 1974) und Eichordnung, Anlage 15. Abschnitt 2
- 8.30. *Golenhofen, K., Hensel, H., Hildenbrand, G.*: Durchblutungsmessung mit Wärmeleit-elementen in Forschung und Klinik. Georg Thieme Verlag (1963), Stuttgart.
- 8.31. *Schliff, H. G.*: Ein Verfahren zur Temperaturmessung in umlaufenden Maschinenteilen. Werkst. und Betrieb 98 (1965), H. 11, S. 801—804.
- 8.32. *Lehmann, K., Schmeister, K.*: Neuartige Temperaturmeßeinrichtung an Drehöfen. ETZ 14 (1967), H. 17, S. 462—464.
- 8.33. *Erdmann, W.*: Ein neues Verfahren zur berührungslosen Meßwert bertragung. Elektro-anzeiger 18 (1968), H. 18, S. 2—4.
- 8.34. *Kraus, K.*: Temperaturen anhand kleiner Frequenzänderungen gemessen. Elektronik 23 (1974), H. 3, S. 90—92.
- 8.35. *Weiß, H.*: Das Übertragen kleiner elektrischen Meßwerte von schnell rotierenden Maschinen auf ruhende Anzeigergeräte. ETZ 13 (1961), H. 2, S. 29—34.
- 8.36. *Lück, W.*: Berührungslose Oberflächentemperaturmessung in der Verfahrensindustrie. In Technische Temperaturmessung. VDI—Berichte № 112, Düsseldorf (1966), S. 109—114.
- 8.37. *Krüger, H.*: Fühler für die Messung und Regelung der Temperatur rotierender Walzen und Trockenzylinder. Regelungstechnik 6 (1958), H. 5, S. 167—173.
- 8.38. *Gottwein, K.*: Die Messung der Schneidentemperatur beim Abdrehen von Flußeisen. Maschinenbau 4 (1925), S. 1129—1135.
- 8.39. *Reichel, W.*: Abgekürztes Standzeitenermittlungsverfahren für spangebende Werkzeuge. Maschinenbau und Betrieb 11 (1932), № 22, S. 473.
- 8.40. *Küsters, K. J.*: Temperaturen im Schneidkeil spanender Werkzeuge. Ind. Anz. 89 (1956), S. 1337.
- 8.41. *Meyer, K. F.*: Die Ermittlung der Temperaturen an den Schneiden spanender Werkzeuge. VDI—Bericht 112. Techn. Temperaturmessung, Düsseldorf (1966), S. 115—121.
- 8.42. *Linnemann, H.*: Temperaturmessung an Turbinen und Generatoren. In «Technische Temperaturmessung». VDI—Berichte 112, Düsseldorf (1966), S. 129—132.
- 8.43. *Mittelmann, G., Friz, R.*: Temperaturmessung in Beton unter Verwendung von Thermo-elementen. Industrie—Elektronik 1959, H. 2, S. 13—15.
- 8.44. *Lux, B., Perthefer, N., Schniewind, J.*: Oberflächen-Temperaturmessung an hocherhitzten verzünderten Metallblöcken mit Hilfe von eingeschossenen Thermoelementen. Stahl und Eisen 85 (1965), H. 14, S. 875—878.
- 8.45. *Brehm, J., Antkowiak, H.*: Zur Praxis der Temperaturmessung in Turbinenhäusen. Brennstoff, Wärme, Kraft, (1961), H. 9, S. 400—403.
- 8.46. *Huber, F.*: Meßmethoden und deren Fehlergrößen bei Erwärmungsversuchen an Transformator. Brown, Boveri Mitteilungen, Bd. 52 (1965), H. 11/12, S. 890—896.
- 8.47. *Tassicker, O. I.*: Measurement of winding temperature by change of resistance. PROC. IEE Vol. 111 № 8, Aug. (1964), S. 1454—1460.
- 8.48. *Röttsieper, K.*: Temperaturüberwachung für Starkstromkabel und elektrische Leitungen. Arch. techn. Messen, V 2177—2 (Dez 1932).
- 8.49. *Linnemann, H.*: Temperaturüberwachung von Dampfturbinen. BBC—Nachrichten, Mai (1968), S. 263—270.
- 8.50. *Butz, U.*: Temperaturkontrolle an Metallmantelkabeln. Elektrie, Bd. 6 (1963), S. 181—184.
- 8.51. *Scharfe, K., Panzer, G.*: Thermische Überwachung von Starkstromkabeln. Elektrie, H. 6 (1963), S. 184—186.
- 8.52. *Kelnath, G.*: Kabel-Überwachung auf Leitertemperatur und elektrische Verluste. Arch. techn. Messen, V8253—1 (Mai 1933).
- 8.53. *Malsy, H., Vanvor, H.*: Temperaturmessung in Ex-geschützten Räumen. Maschinenmarkt 80 A 11 (1974), S. 170—171.
- 8.54. *Malsy, H.*: Explosionsgeschützte Elektrowärmeeinrichtungen für Industriebetriebe und Laboratorien. Chemiker-Zeitung 94 (1970), A. 11, S. 398—406.

## 9. ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерение температур пирометрами излучения, иногда называемыми также просто пирометрами, по сравнению с измерением температур контактными термометрами имеет то преимущество, что температура определяется только по излучению данного тела. Поэтому температурное поле объекта измерения не искажается пирометром.

### 9.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

#### 9.1.1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И КОНСТАНТЫ

Каждое тело испускает в окружающее пространство электромагнитные волны различной длины  $\lambda$  или частоты  $\nu$  (число колебаний в секунду). Произведение частоты на длину волны ( $\nu\lambda = c$ ) характеризует скорость распространения электромагнитных волн. В вакууме она составляет  $2,997925 \cdot 10^8$  м/с или около 300 тыс. км/с. Волновое число  $\omega$  определяется как  $1/\lambda$ .

Электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением в твердых материалах, жидкостях, газах или плазмах, называют тепловым излучением. Оно возникает при температурах до  $4000^\circ\text{C}$  преимущественно в результате колебаний атомов в пространственной решетке твердых тел или в результате колебательных или вращательных движений молекул газа. При более высоких температурах излучение вызывается процессами диссоциации и ионизации.

Если излучение какого-либо тела падает на другое, непрозрачное для этого излучения оптически толстое тело, то оно поглощается на поверхности и превращается в тепловое движение. Оптически не толстые тела пропускают падающее на них излучение без изменений или поглощают часть излучения на пути его движения. Если излучение проникает в тело и полностью в нем поглощается, то глубину проникновения (оптическую) рассчитывают по закону Ламберта—Буге из натуральной экстинкции  $E$  (произведение модуля экстинкции  $M$  на толщину слоя  $l$ ). Из этой глубины подобных оптически толстых излучателей возбужденное в них излучение выходит наружу. Излучение, не проникающее в тело и не проходящее через него, направляется обратно в пространство, т. е. отражается.

Отношения поглощенного, пропущенного и отраженного потока излучения к падающему на тело потоку называются коэффициентом поглощения  $\alpha = \Phi_{\text{п}}/\Phi$ , коэффициентом пропускания  $\tau = \Phi_{\text{пр}}/\Phi$  и коэффициентом отражения  $\rho = \Phi_{\text{от}}/\Phi$  соответственно.

Для монохроматического излучения эти величины называются соответственно спектральным коэффициентом поглощения  $\alpha(\lambda) = \Phi_{\lambda\alpha}/\Phi_\lambda$  и т. д. Они являются функциями длины волны и зависят от материала тела, от состояния его поверхности и от его температуры. Между указанными величинами существует следующая зависимость:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad \text{или} \quad \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1. \quad (9.1)$$

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, имеет коэффициент поглощения, равный единице, и называется абсолютно черным телом или абсолютно черным излучателем. Хотя абсолютно черного излучателя как такового не бывает, им может с любым приближением служить закрытая со всех сторон полость, стенка которой не пропускает излучения; отверстие в стенке должно быть таким малым, чтобы его площадь по сравнению с площадью внутренней поверхности полости была пренебрежимо мала (рис. 9.1). Если полость имеет температуру  $T$ , то от испускаемого из точки  $A$  излучения  $L$  отражается доля  $\rho L$ , где  $\rho$  — коэффициент отражения внутренней поверхности стенки. Из точки  $B$  в этом случае

исходит излучение  $L(1 + \rho)$ , падающее на точку  $C$ . От этой точки отражается доля излучения  $L[(1 + \rho)\rho]$ , так что суммарно от нее исходит излучение  $L(1 + \rho + \rho^2)$ . Поскольку очень велика вероятность, что излучение выйдет через отверстие  $\dot{\sigma}$  лишь после многократного отражения, то выходящую энергетическую яркость (лучистость) можно записать следующим образом:

$$L(1 + \rho + \rho^2 + \dots + \rho^n) = L/(1 - \rho) = L/\alpha.$$

Отклонение коэффициента поглощения от единицы рассчитывают для полости диаметром  $D$ , в стенке которой имеется отверстие диаметром  $d$ , по формуле  $1 - \alpha = (\rho/4)(d/D)^2$ . Уменьшая отношение  $d/D$  и коэффициент отражения  $\rho$  внутренней поверхности стенки полости, коэффициент поглощения полости можно сделать сколь угодно близким к единице.

### 9.1.2. ЗАКОН КИРХГОФА

По закону Кирхгофа, который можно вывести из первого и второго законов термодинамики для энергообмена излучением, отношение спектральной энергетической яркости любого теплового излучателя  $L_\lambda$  при длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$  к его коэффициенту поглощения  $\alpha(\lambda)$  равно спектральной энергетической яркости абсолютно черного излучателя  $L_{\lambda s}$  при той же температуре и длине волны:

$$L_\lambda = \alpha(\lambda) L_{\lambda s}. \quad (9.2)$$

Поскольку  $\alpha(\lambda) = 1$  верно лишь для абсолютно черного излучателя, то на основе уравнения (9.2) наибольшей будет спектральная энергетическая яркость абсолютно черного тела, достигаемая при длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$  независимо от других его свойств.

### 9.1.3. ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

С увеличением коэффициента поглощения  $\alpha(\lambda)$  любого оптически толстого тела спектральная энергетическая яркость  $L_\lambda$ , согласно уравнению (9.2), возрастает. Поэтому отношение излучения данного тела к излучению абсолютно черного тела называется спектральной излучательной способностью  $\varepsilon(\lambda)$ . Этот коэффициент характеризует лишь собственное излучение тела; влияние излучения от окружающих предметов, например стен, не учитывается.

Поскольку спектральная энергетическая яркость  $L_\lambda$  зависит от направления излучения (табл. 9.1), то и спектральная (направленная) излучательная способность

$$\varepsilon(\lambda; \vartheta, \varphi) = L_\lambda(\lambda; \vartheta, \varphi)/L_{\lambda s}(\lambda) \quad (9.3)$$

зависит в общем случае от направления излучения, характеризуемого углами  $\vartheta$  и  $\varphi$  (зенитный и азимутный углы).

При излучении в направлении нормали к поверхности излучателя ( $L_{\lambda n}$ ) угол  $\vartheta$  равен нулю и спектральная излучательная способность определяется из отношения

$$\varepsilon(\lambda)_n = L_{\lambda n}/L_{\lambda s}. \quad (9.4)$$

Если необходимо учесть спектральное распределение, то приведенные в табл. 9.1 величины следует отнести к дифференциальной области, например к длине волны  $\lambda$ . В этом случае их называют спектральными плотностями этих

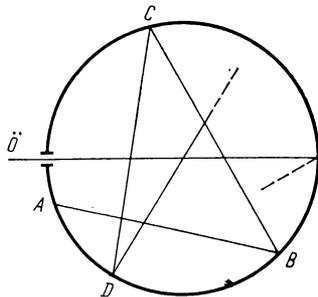


Рис. 9.1. Модель абсолютно черного излучателя

Т а б л и ц а 9.1

## Величины и константы, применяемые в пирометрии излучения

Величина	Обозначение	Определение	Единица измерения
Энергия излучения, количество излучения	$W$	—	Вт·с
Поток излучения	$\Phi = \frac{dW}{dt}$	Энергия, излучаемая в единицу времени	Вт
Энергетическая сила света	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Энергия, излучаемая в единицу времени в единичный телесный угол	Вт/ср.
Плотность излучения	$M = \frac{d\Phi}{dA_1}$	Энергия, излучаемая в единицу времени единицей площади поверхности излучателя	Вт/м <sup>2</sup>
Энергетическая освещенность	$E = \frac{d\Phi}{dA_2}$	Энергия излучения, воспринимаемая в единицу времени единицей площади поверхности тела	Вт/м <sup>2</sup>
Энергетическая яркость (лучистость)	$L = \frac{dI}{dA_1 \cos \vartheta}$	Энергия, излучаемая в единицу времени в единичный телесный угол и единицу площади в направлении излучения ( $\vartheta$ — угол между направлением излучения и нормалью к поверхности излучателя)	Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)
Спектральная энергетическая яркость	$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$	—	Вт/(м <sup>3</sup> ·ср)

же величин или просто спектральными величинами. Они являются функциями длины волны. В качестве примера можно указать спектральную энергетическую яркость  $L_\lambda = dL/d\lambda$  (размерность Вт/(м<sup>3</sup>·ср)).

При справедливости косинусного закона Ламберта ( $L = L_n \cos \vartheta$ , где  $\vartheta$  — угол между направлениями излучений с энергетическими яркостями  $L$  и  $L_n$ ) энергетическая яркость  $L$  будет одинакова для всех направлений. Интегрированием  $L$  по полусфере получаем

$$M = \Omega_0 \pi L$$

( $\Omega_0$  — телесный угол полусферы, деленный на  $2\pi$ , т. е.  $\Omega_0 = 1$  стерадиану).

Ниже приведены значения и названия констант излучения:  $c = 2,997925 \times 10^8$  м/с  $\approx 300$  тыс. км/с (скорость света в вакууме);

$h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  Дж·с (постоянная Планка);

$k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$  Дж/К (постоянная Больцмана);

$c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> (первая постоянная излучения);  
 $c_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$  мК (1,438 см·К по МПТШ-48) (вторая постоянная излучения);  
 $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) = 5,67·10<sup>-12</sup> Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) (постоянная Стефана—Больцмана);  
 $C_s = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) = 4,875 ккал/(м<sup>2</sup>·ч·К<sup>4</sup>) = 10<sup>9</sup>σ\*.

Если при измерении температуры по излучению объект измерения визируется под углом  $\vartheta$  к нормали, меньшим или равным 45°, то спектральная излучательная способность может считаться величиной, достаточно независимой от направления излучения. В этом случае

$$L_{\lambda} = \varepsilon(\lambda) L_{\lambda s} \quad \text{или} \quad M_{\lambda} = \varepsilon(\lambda) M_{\lambda s}. \quad (9.5)$$

Из уравнения (9.2), кроме того, имеем

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda). \quad (9.6)$$

При справедливости закона Ламберта значения  $\varepsilon$  и  $\alpha$  никогда не зависят от направления излучения. Если излучение распространяется на любую область спектра, то и в этом случае соблюдается закон Кирхгофа. Излучательная способность, определенная интегрированием в пределах от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  (может быть и направленно излучение), называется излучательной способностью для данной области спектра  $\varepsilon_b$ :

$$\varepsilon_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda s} d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) L_{\lambda s} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda s} d\lambda}. \quad (9.7)$$

При интегрировании по всему диапазону длин волн получают суммарную излучательную способность  $\varepsilon_t$ , зависящую уже только от температуры, тогда как на значение  $\varepsilon_b$  влияют и пределы интегрирования. Значения  $\varepsilon_b$  и  $\varepsilon_t$  не зависят от направления излучения, если объект измерения визируется под углом к нормали менее 45°. Максимальные отклонения от закона Ламберта наблюдаются в случае блестящих металлов и рефлекторов, которые при больших углах излучения к нормали испускают сильно поляризованное излучение. В этом случае необходимо учитывать зависимость  $\varepsilon$  от направления.

## 9.1.4. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для абсолютно черного излучателя действительны следующие закономерности:

1. Закон излучения Планка описывает взаимосвязь между абсолютной температурой  $T$  и спектральным распределением энергетической яркости абсолютно черного излучателя. Для неполяризованного излучения спектральная энергетическая яркость  $L_{\lambda s}$  или спектральная плотность излучения  $M_{\lambda s}$  имеют соответственно следующий вид:

$$L_{\lambda s} = \frac{c_1}{\Omega_0 \pi} \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}; \quad M_{\lambda s} = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (9.8)$$

где  $c_1 = 2\pi c^2 h$  — первая постоянная излучения;  $c_2 = hc/k$  — вторая постоянная излучения;  $c$  — скорость света в вакууме;  $h$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана. Характер изотерм приведен на рис. 9.2.

Для линейно поляризованного излучения в формуле (9.8) следует  $c_1$  заменить на  $c_1/2$ .

\* В практике еще часто принимают  $C_s = 5,77$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) = 4,96 ккал/(м<sup>2</sup>·ч·К<sup>4</sup>).

В случае малых значений  $\lambda T$  в формуле (9.8) можно пренебречь единицей в скобках. Тогда получим закон излучения Вина:

$$L_{\lambda s} = \frac{c_1}{\Omega_0 \pi} \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}. \quad (9.9)$$

Отклонения от закона Планка при  $3000^\circ\text{C}$  и  $\lambda = 0,665$  мкм составляют 3К. Они возрастают с увеличением температуры и длины волны.

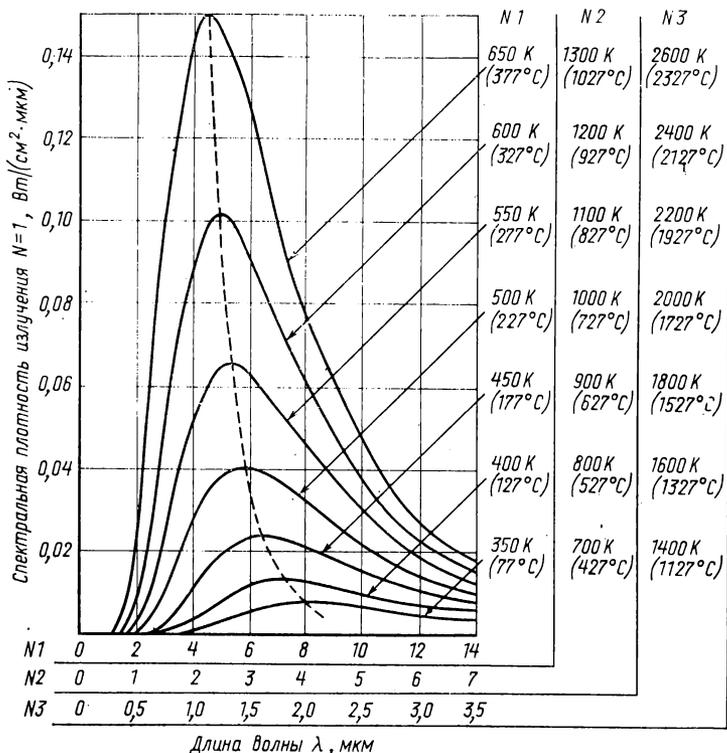


Рис. 9.2. Изотермы закона Планка по выражению (9.8). Спектральная плотность излучения  $M_{\lambda s}(\lambda, T)$ . Для указанных в координатах  $N = 1$  температур и длин волн получаем на ординате непосредственное значение  $M_{\lambda s}$  в зависимости от  $\lambda$  и  $T$  или  $t$ . Для температур и длин волн, указанных в координатах  $N = 2$ ,  $M_{\lambda s}$  получаем умножением значения ординаты на  $2^5 = 32$ . В координатах  $N = 3$  эти значения надо умножить на  $4^5 = 1024$ .

Для очень больших значений  $\lambda T$  получим путем разложения в ряд  $\exp c_2/\lambda T$  формулу излучения Рэлея—Джинса, которая справедлива при очень высоких температурах или очень длинных волнах:

$$L_{\lambda s} = c_1/(c_2 \Omega_0 \pi) \lambda^{-4} T. \quad (9.10)$$

2. Изотермы спектрального распределения энергии имеют максимум, зависящий от температуры. С увеличением температуры этот максимум смещается в область меньших длин волн (см. рис. 9.2). По закону смещения Вина положение максимума зависит от произведения  $\lambda_{\max} T$ :

$$\lambda_{\max} T = A, \quad (9.11)$$

где  $A = 0,28978 \cdot 10^{-2}$  м·К (по МПТШ-48  $A = 0,2896$  см·К).

Максимум спектральной плотности излучения определяется из выражения

$$M_{\lambda_s \max} = b_1 T^5, \quad (9.12)$$

где  $b_1 = 1,2864 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{К}^5) = 12,816 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$ .

3. Интегрированием спектральной плотности излучения  $M_{\lambda_s}$  абсолютно черного тела по  $\lambda$  от нуля до бесконечности получаем закон Стефана—Больцмана:

$$M_{t_s} = \sigma T^4 = C_s (T/100)^4 \quad \text{или} \quad L_{t_s} = \frac{\sigma}{\Omega_0 \pi} T^4, \quad (9.13)$$

где  $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^2$ .

4. Отношение спектральных плотностей излучения  $M_{\lambda_s}$  или спектральных энергетических яркостей  $L_{\lambda_s}$  для двух температур при длине волны  $\lambda$  описывается выражением, полученным из закона Вина (9.9):

$$\ln \frac{L_{\lambda_s}(\lambda, T_1)}{L_{\lambda_s}(\lambda, T_2)} = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right). \quad (9.14)$$

Для видимой части спектра энергетическая яркость пропорциональна яркости.

### 9.1.5. БЕЗРАЗМЕРНАЯ ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАКОНА ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАНКА

Функция Планка  $L_{\lambda_s}(\lambda, T)$  приведена в таблицах в зависимости от  $\lambda$  и  $T$  [9.3]. Поскольку постоянные закона Планка  $c_1$  и  $c_2$  могут изменяться с усовершенствованием техники измерения (см. значения  $c_2$  по МПТШ от 1948 и 1968 гг., табл. 9.1), целесообразно этот закон представить в безразмерной форме. С помощью формул Вина (9.9, 9.11) и соотношения  $\lambda/\lambda_{\max} = \lambda T/A$  можно получить приведенное распределение относительных спектральных плотностей излучения абсолютно черного тела  $M_{\lambda_s}/M_{\lambda_s \max}$  и составить соответствующие таблицы. Из уравнения (9.12) тогда имеем [9.4, 9.5]

$$M_{\lambda_s}(\lambda, T) = (M_{\lambda_s}/M_{\lambda_s \max}) b_1 T^5.$$

В безразмерной форме функции Планка и ее интеграл по длине волны можно табулировать в виде некоторой функции [9.9]. Эта функция не зависит от изменяющихся значений обоих постоянных излучения и длины волны. Числителем этой функции является интеграл излучения по интервалу длин волн от  $\lambda_1 = 0$  до  $\lambda_2 = \lambda$ , а знаменателем — интеграл по всему диапазону длин волн от  $\lambda_1 = 0$  до  $\lambda_2 = \infty$  либо спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела, либо его спектральной плотности излучения:

$$B(v) = L_{(0-\lambda) s} / L_{t_s} = M_{(0-\lambda) s} / M_{t_s}.$$

В соответствии с этим плотность излучения в ограниченной области длин волн можно записать как

$$M_{(0-\lambda) s} = \int_{\lambda_1=0}^{\lambda_2=\lambda} M_{\lambda_s}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 B(v); \quad (9.15a)$$

$$M_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1=a}^{\lambda_2=b} M_{\lambda_s} d\lambda = \sigma T^4 [B(v)_b - B(v)_a]. \quad (9.15b)$$

Дифференцированием функции  $B(v)$  по верхнему пределу интеграла получаем спектральную плотность излучения (функцию Планка):

$$M_{\lambda_s}(\lambda, T) = \frac{\sigma}{c_2} T^5 B'(v). \quad (9.16)$$

Таблица 9.2

Функции  $B(v)$  и  $B'(v)$ 

$v$	$B(v)$	$B'(v)$	$v$	$B(v)$	$B'(v)$
0,040	$0,00378 \cdot 10^{-5}$	$0,00209 \cdot 10^{-2}$	0,170	0,1499	3,032
0,041	0,00647	0,00340	0,200	0,2455	3,264
0,042	0,00852	0,00538	0,2041	0,2588	3,265 max
0,043	0,0176	0,00832	0,210	0,2781	3,251
0,045	0,0433	0,0186	0,220	0,3104	3,206
0,047	0,0985	0,0386	0,230	0,342	3,135
0,050	0,296	0,1016	0,250	0,403	2,942
0,053	0,778	0,235	0,282	0,500 *	2,562
0,055	1,392	0,389	0,300	0,535	2,344
0,057	2,381	0,615	0,35	0,638	1,787
0,059	3,916	0,938	0,40	0,716	1,345
0,060	4,955	1,144	0,50	0,819	0,771
0,0605	$0,555 \cdot 10^{-4}$	1,262	0,60	0,879	0,461
0,062	0,774	1,663	0,70	0,916	0,289
0,065	1,427	2,764	0,80	0,939	0,189
0,067	2,075	3,759	0,90	0,955	0,128
0,069	2,945	5,001	1,0	0,965	0,090
0,070	3,438	5,725	1,2	0,979	$4,72 \cdot 10^{-2}$
0,072	4,790	7,395	1,3	0,983	3,58
0,073	5,576	8,349	1,5	0,988	2,14
0,075	7,456	0,105	1,7	0,992	1,354
0,077	9,804	0,130	2,0	0,995	$7,42 \cdot 10^{-3}$
0,080	$1,436 \cdot 10^{-3}$	0,175	2,2	0,996	5,192
0,085	2,538	0,270	2,5	0,997	3,21
0,090	4,177	0,390	2,7	0,9977	2,394
0,095	6,476	0,534	3,0	0,9983	1,6018
0,100	9,550	0,699	3,2	0,9986	1,251
0,105	$1,350 \cdot 10^{-2}$	0,882	3,4	0,99883	0,991
0,110	1,839	1,078	3,5	0,99893	0,886
0,120	3,121	1,488	3,7	0,99909	0,7156
0,150	9,326	2,584	4,0	0,99927	0,5295

\* Среднее значение полного излучения.

В табл. 9.2 приведены значения функций  $B(v)$  и  $B'(v)$  в зависимости от аргумента  $v = \lambda T/c_2$  (по [9.9]). Здесь  $B(v)$  — отношение энергетической яркости или плотности излучения абсолютно черного тела в ограниченной области длин волн от  $\lambda_1 = 0$  до  $\lambda_2 = \lambda$  к энергетической яркости или плотности излучения абсолютно черного тела во всем диапазоне длин волн ( $L_{ts}$  или  $M_{ts}$ ), т. е.

$$B(v) = \frac{L_{(0-\lambda)} s}{L_{ts}} = \frac{M_{(0-\lambda)} s}{M_{ts}}; \quad L_{(0-\lambda)} s = \frac{\sigma T^4}{\Omega_0 \pi} B(v); \quad M_{(0-\lambda)} s = \sigma T^4 B(v).$$

Величина  $B'(v)$  — первая производная  $B(v)$  по верхнему пределу. Тем самым для закона излучения Планка получаем

$$L_{\lambda s} = \frac{\sigma T^5}{\Omega_0 \pi c_2} B'(v) \quad \text{или} \quad M_{\lambda s} = \frac{\sigma T^5}{c_2} B'(v).$$

Величины  $B(v)$  и  $B'(v)$  можно представить в следующем виде:

$$B(v) = \frac{15}{\pi^4} \int_{v=0}^{v=v} \frac{v^{-5}}{e^{1/v} - 1} dv \quad \text{и} \quad B'(v) = \frac{15}{\pi^4} \frac{v^{-5}}{e^{1/v} - 1}, \quad (9.17)$$

где  $v = \lambda T/c_2$ .

Обе эти функции приведены в табл. 9.2\*, а также на рис. 9.3. Максимум функции  $B'(v)_{\max} = 3,2648$  находим при  $v = 0,2041$ .

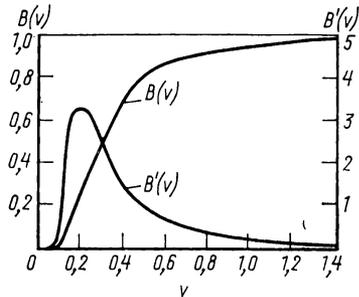


Рис. 9.3. Функции  $B(v)$  и  $B'(v)$  в зависимости от  $v = \lambda T/c_2$

**Пример.**  $T = 2000$  К;  $\lambda_1 = 0,6$  мкм  $= 0,6 \cdot 10^{-6}$  м;  $\lambda_2 = 0,7$  мкм  $= 0,7 \cdot 10^{-6}$  м;  $v_1 = \lambda_1 T/c_2 = 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2000/1,438 \cdot 10^{-2} = 0,08345$ ;  $v_2 = 0,09736$  (расчет такой же). Из табл. 9.2 по  $v_1$  и  $v_2$  получаем  $B(v)_1 = 2,144 \cdot 10^{-3}$ ;  $B(v)_2 = 0,7848 \cdot 10^{-2}$ .

Разность  $B(v)_2 - B(v)_1 = 5,704 \cdot 10^{-3}$  означает, что 0,5704% от полного излучения абсолютно черного тела при температуре 2000 К приходится на участок спектра между длинами волн 0,6 и 0,7 мкм.

Спектральная плотность излучения  $M_{\lambda_s}$  абсолютно черного излучателя с температурой 2000 К при  $\lambda_1 = 0,6$  мкм и  $\lambda_2 = 0,7$  мкм по уравнению (9.16) при  $\sigma/c_2 = 5,67 \cdot 10^{-8}/1,438 \cdot 10^{-2} = 3,938 \cdot 10^{-6}$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>6</sup>) и при  $B'(v)_1 = 0,2377$ , а также при  $B'(v)_2 = 0,6094$  (по табл. 9.2) составит  $2,995 \cdot 10^{-10}$  Вт/м<sup>3</sup> при  $\lambda_1 = 0,6$  мкм и  $7,704 \cdot 10^{-10}$  Вт/м<sup>3</sup> при  $\lambda_2 = 0,7$  мкм.

Для очень узких спектральных участков разность между соседними значениями функции  $B(v)$  в уравнении (9.15б) определяется по таблицам недостаточно точно. В этом случае плотность излучения для области  $\Delta\lambda$  надо рассчитывать интегрированием уравнения (9.16) в пределах от  $\lambda_a$  до  $\lambda_b$ .

## 9.1.6. СЕРЫЕ И СЕЛЕКТИВНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Спектральная излучательная способность любого излучателя  $\epsilon(\lambda)$  является функцией длины волны и температуры. Она зависит не только от материала излучателя, но во многом и от состояния его поверхности (шероховатость и окисленность): По этой причине зависимость излучательной способности от длины волны и температуры, как правило, приходится определять эмпирически для каждого отдельного объекта измерения. Лишь для небольшого числа материалов, например вольфрама, можно получить достоверные значения  $\epsilon(\lambda)$  (рис. 9.4). Если

\* В приводимых примерах значения функций  $B(v)$  и  $B'(v)$  взяты из более подробных таблиц. (Прим. ред.)

в некоторой области спектра (как это имеет место для некоторых металлов в видимой части спектра) излучательная способность изменяется с изменением температуры незначительно, то достаточно определять  $\epsilon(\lambda)$  лишь при одной температуре.

Если излучательная способность в какой-либо области спектра не изменяется, то плотность излучения соответствующего тела в этой области отличается от плотности излучения абсолютно черного излучателя<sup>1</sup> лишь на какую-то неизменяющуюся часть. Такие нечерные излучатели называют серыми излучателями.

Селективно излучающие тела, например газы, пары и органические материалы, на некоторых участках спектра совсем не излучают энергии, в то время как на других участках спектра они ведут себя как черные излучатели или же излучают лишь часть энергии черного излучателя.

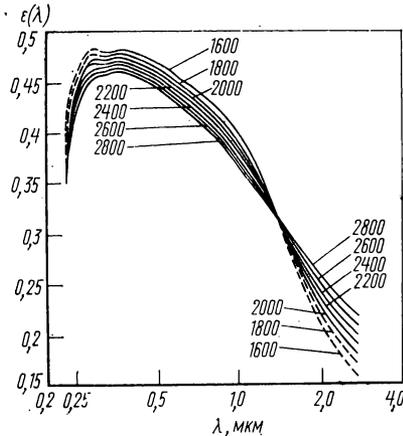


Рис. 9.4. Спектральная излучательная способность  $\epsilon(\lambda; T)$  вольфрама в зависимости от длины волны  $\lambda$ , мкм, в диапазоне длин волн от 0,23 до 2,64 мкм для температур от 1600 до 2800 К (по de Vries).

волны соответствует некоторая условная температура или яркостная<sup>2</sup> температура  $T_s$ , меньшая действительной, при которой черный излучатель имеет ту же спектральную энергетическую яркость  $L_{\lambda s}$ , что и рассматриваемый нечерный излучатель при его действительной температуре  $T$ . В этом случае по уравнению (9.5), если влиянием окружающей температуры можно пренебречь ( $T \geq T_U$ ), получим

$$L_{\lambda}(T) = \epsilon(\lambda, T) L_{\lambda s}(T) = L_{\lambda s}(T_s). \quad (9.18)$$

Отсюда с учетом уравнения (9.14) для зависимости между  $T$ ,  $T_s$  и  $\epsilon(\lambda, T)$  получим

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad \text{или} \quad \frac{1}{T} = \frac{1}{T_s} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon(\lambda, T). \quad (9.19)$$

Если в определенной области спектра излучатель имеет относительное спектральное распределение энергетической яркости, пропорциональное такому же распределению черного излучателя, то условную температуру, при которой черный излучатель имеет то же относительное спектральное распределение энергетической яркости, что и рассматриваемое тело при его действительной темпе-

<sup>1</sup> Для удобства в дальнейшем слово «абсолютно» опущено. (Прим. ред.)

<sup>2</sup> В буквальном переводе автор называет эту условную температуру «спектральной» или «черной» температурой, откуда и индекс  $s$ . Так как оба термина не являются общепринятыми, а вкладываемое в них понятие полностью соответствует общепринятому термину «яркостная температура», здесь и далее использован последний термин. (Прим. ред.)

ратуре  $T$ , называют температурой спектрального распределения  $T_v$  этого излучателя<sup>1</sup>.

Цветовой температурой  $T_f$  излучателя называют условную температуру черного излучателя, при которой он вызывает такое же цветовое впечатление, что и рассматриваемый излучатель при его действительной температуре  $T$ .

Температурой спектрального отношения  $T_r$  излучателя называется некоторая условная температура черного излучателя, при которой отношение спектральных энергетических яркостей для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  или отношение энергетических яркостей в двух различных областях длин волн такое же, как и у рассматриваемого излучателя при действительной его температуре  $T$ . Следовательно, отношение энергетических яркостей любого объекта измерения при двух длинах волн должно быть равным их отношению при температуре спектрального отношения. В этом случае, используя уравнение (9.18), получим [9.4]

$$\frac{L_{\lambda_2}(T)}{L_{\lambda_1}(T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_2, T) L_{\lambda_2 s_2}(T)}{\varepsilon(\lambda_1, T) L_{\lambda_1 s_1}(T)} = \frac{L_{\lambda_2 s_2}(T_{s_2})}{L_{\lambda_1 s_1}(T_{s_1})} = \frac{L_{\lambda_2 s_2}(T_r)}{L_{\lambda_1 s_1}(T_r)}. \quad (9.19a)$$

Отсюда с помощью уравнения (9.9) для зависимости между яркостными температурами  $T_{s_1}$  и  $T_{s_2}$  и температурой спектрального отношения  $T_r$  получаем

$$e^{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2 T_{s_2}} - \frac{1}{\lambda_1 T_{s_1}} \right)} = e^{\frac{c_2}{T_r} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}, \quad (9.19б)$$

откуда

$$\frac{1}{T_r} = \left( \frac{1}{\lambda_2 T_{s_2}} - \frac{1}{\lambda_1 T_{s_1}} \right) \frac{1}{1/\lambda_2 - 1/\lambda_1}. \quad (9.19в)$$

Между действительной температурой  $T$ , температурой спектрального отношения  $T_r$  и излучательными способностями  $\varepsilon(\lambda_1, T)$  и  $\varepsilon(\lambda_2, T)$  из уравнения (9.19a) получим следующую зависимость:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} = \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \frac{1}{c_2} \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}. \quad (9.19г)$$

Отношение  $\varepsilon(\lambda_1 T)/\varepsilon(\lambda_2 T)$  зависит в большей или меньшей степени от длины волны. Поэтому при одинаковой действительной температуре  $T$  измеренная температура спектрального отношения  $T_r$  может иметь различные значения в зависимости от длины волны.

## 9.1.8. ТЕМПЕРАТУРА ЧАСТИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИАЦИОННАЯ ТЕМПЕРАТУРА ( $T_b$ и $T_t$ )

Температурой частичного<sup>2</sup> излучения  $T_b$  данного излучателя называют такую условную температуру черного излучателя, при которой он в интервале длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  создает выходной сигнал пирометра частичного излучения такой же величины, что и измеряемый объект при его действительной температуре  $T$ . Излучательная способность частичного излучения  $\varepsilon_b(T)$  сильно зависит от положения и ширины использованной области спектра, а также от спектрального распределения излучения объекта. Положение и ширина используемой пиро-

<sup>1</sup> Применяемые автором названия условных температур  $T_v$  и  $T_r$  не являются общепринятыми. В литературе чаще всего применяется один термин (цветовая температура) для всех трех условных температур  $T_v$ ,  $T_f$  и  $T_r$ . Их принципиальные отличия друг от друга раскрываются лишь в связи с соответствующими методами измерения или даже конкретными пирометрами излучения. (Прим. ред.)

<sup>2</sup> В названии и тексте раздела автор использует два новых названия условных температур: «Температура частичного излучения» и «температура полного излучения» (буквальный перевод). Первое из них оставлено, так как полностью эквивалентного термина среди общепринятых не нашлось. Второму термину полностью соответствует термин «радиационная температура». (Прим. ред.)

метром области спектра определяются главным образом спектральной характеристикой его приемника излучения и фильтрами, т. е. конструкцией пирометра. Поэтому при данной действительной температуре объекта  $T$  измеренная температура частичного излучения  $T_b$  может иметь различные значения, если принимать различные по конструкции пирометры частичного излучения.

Радиационной температурой  $T_t$  излучателя с действительной температурой  $T$  называется такая условная температура черного излучателя, при которой его энергетическая яркость  $L_t$  по всему диапазону длин волн от  $\lambda_1 = 0$  до  $\lambda_2 = \infty$  равна энергетической яркости рассматриваемого излучателя. При измерениях температуры черных излучателей можно записать, что  $T_s = T_v = T_t = T_r = T_b = T_t = T$ , а при измерениях температуры серых излучателей  $T_v = T_f = T_r = T$ .

## 9.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры излучения можно классифицировать по области их спектральной чувствительности, методу измерения излучения и по их конструкции [9.8].  
*По области спектральной чувствительности*

Область спектральной чувствительности пирометра имеет значение для корректировки его показаний при измерении температур нечерных излучателей. Величина этой корректировки определяется по разности между действительной  $T$  и измеренной условной ( $T_s$ ,  $T_b$  или  $T_t$ ) температурой, которая зависит от излучательной способности объекта ( $\epsilon(\lambda)$ ,  $\epsilon_b$  или  $\epsilon_t$ ), а также от температуры  $T$ .

У квазимонохроматического (яркостного) пирометра спектральная чувствительность простирается на весьма узкую область спектра, так что, зная спектральную энергетическую яркость  $L_\lambda = dL/d\lambda$  и  $\epsilon(\lambda)$ , можно определить точное значение действительной температуры объекта  $T$ .

У пирометров частичного излучения спектральная чувствительность простирается на более широкую область спектра. Поэтому  $\epsilon_b$  и корректировка условной температуры нечерных излучателей зависят не только от положения, но и от ширины спектрального участка.

Если спектральная чувствительность пирометра охватывает весьма широкую область спектра излучения, так что его чувствительность уже практически не зависит от ширины этой области, то его называют пирометром полного излучения. Пирометры излучения, у которых при температуре  $T$  вследствие селективности приемников излучения или фильтров используемое излучение составляет не менее 90% полного излучения, т. е. функция  $B(v) = 0,9$ , еще могут характеризоваться как пирометры полного излучения.

### *По методу измерения излучения*

По методу измерения излучения пирометры делятся на два класса: энергетические и спектрального распределения. В первом случае используется зависимость энергетической яркости объекта измерения от его температуры<sup>1</sup>. Действие пирометра спектрального распределения основано на использовании зависимости распределения спектральной плотности энергетической яркости данного объекта от его температуры. Такие пирометры называют также цветовыми пирометрами. Вначале это название использовали для пирометров, при помощи которых цветовую температуру  $T_f$  определяли на основе визуального цветового восприятия объекта измерения. Поэтому в видимой части спектра  $T_f = T_v$ . В дальнейшем это понятие перенесли также и на невидимую часть спектра.

Класс пирометров спектрального распределения можно разделить на два подкласса: пирометры цветового сравнения и пирометры спектрального отношения.

<sup>1</sup> Класс энергетических пирометров в свою очередь подразделяется на подклассы: пирометр частичного излучения, монохроматический (яркостный) и пирометр полного излучения (радиационный). Два последних являются предельными случаями пирометра частичного излучения. (Прим. ред.)

При помощи пирометров цветового сравнения цветовую температуру  $T_f$  определяют сравнением визуального цветового восприятия средней окраски объекта измерения, полученной как результат смешения излучений в двух участках спектра, с таковым эталонного излучателя. Цветовую температуру  $T_f$  определяют при помощи пирометров спектрального отношения энергетических яркостей в минимум двух различных областях спектра излучения объекта измерения.

### По конструкции

Классификация по конструкции может основываться на типе приемника излучения, например термоэлектрический, болометрический или фотоэлектрический (фотоэлемент или фотосопротивление); на типе применяемой оптики, например линзы, вогнутые зеркала, диафрагмы; на способе сравнения излучения объекта с излучением эталонного источника, например пирометр с исчезающей нитью или пирометр с нейтральным клином и т. п.

Обычно указывают одну или максимум две отличительные особенности, например термоэлектрический рефракторный (линзовый) пирометр или фотоэлектрический пирометр спектрального отношения. Полное название звучало бы как термоэлектрический линзовый пирометр частичного излучения или термоэлектрический пирометр частичного излучения с линзами из фтористого лития и фильтром из арсенида индия.

## 9.3. ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НА ПОКАЗАНИЯ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Поскольку излучательные способности  $\varepsilon(\lambda)$ ,  $\varepsilon_b$  и  $\varepsilon_t$  большинства реальных тел в большей или меньшей степени зависят от температуры и длины волны и поскольку значительное влияние на их значения оказывает также состояние поверхности этих тел, можно привести лишь общие положения относительно влияния характера излучения материала того или иного объекта измерения на показания различных пирометров. (Зависимость излучательной способности от температуры для различных материалов рассмотрена в работе [9.10] для длины волны  $\lambda = 0,65$  мкм. Зависимость  $\varepsilon(\lambda)$  от  $\lambda$  рассмотрена в работах [9.11] и [9.11a].)

### 9.3.1. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ВЕЛИЧИНЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ $\varepsilon(\lambda)$

Для квазимонохроматического (яркостного) пирометра погрешность измерения  $f$  определяют из уравнения (9.19) для некоторого значения излучательной способности  $\varepsilon(\lambda)$  при заданной спектральной чувствительности пирометра. При этом принимают, что  $T \geq T_U$ , т. е. температуры окружающей среды или стен. Эта погрешность равна

$$f = t_s - t = -aT_s^2 / (1 - aT_s), \quad (9.20)$$

тогда как занижение  $t_s$  по сравнению с действительной температурой  $t$  составляет

$$t - t_s = aT^2 / (1 - aT). \quad (9.21)$$

Из уравнения (9.19) имеем

$$-a = (\lambda/c_2) \ln \varepsilon(\lambda) = 1/T - 1/T_s,$$

$$\text{т. е. } a = -\frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon(\lambda). \quad (9.21a)$$

Если известно  $\varepsilon(\lambda)$ , то  $-\ln \varepsilon/c_2$  можно определить по рис. 9.5. Умножая на  $\lambda$ , получим  $a$ . Имея это значение, можно по рис. 9.6 определить погрешность

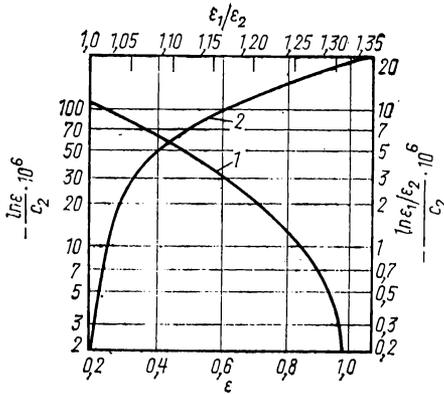


Рис. 9.5. Определение величин  $-\ln \epsilon/c_2$  в зависимости от  $\epsilon$  для яркостных пирометров (1) и  $\frac{\ln \epsilon_1/\epsilon_2}{c_2}$  в зависимости от отношения  $\epsilon_1/\epsilon_2$  для пирометров (2) спектрального отношения ( $c_2 = 1,438 \cdot 10^6$  мкм·К)

Рис. 9.6. Погрешность измерения температуры  $\Delta t$  пирометрами излучения в зависимости от температуры и значений параметра  $a$  ( $t$  — действительная температура;  $t_s$  — яркостная температура;  $t_r$  — цветовая температура);  $a = \lambda \left( -\frac{1}{c_2} \ln \epsilon \right)$  при измерении яркостными пирометрами;  $a = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_s - \lambda_1 c_2} \frac{1}{\epsilon_s} \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$  при измерении пирометрами спектрального отношения; сплошные кривые — занижение показания ( $t - t_s$ ) по сравнению с  $t$  при измерении яркостными пирометрами; погрешность измерения ( $t_r - t$ ) при измерении  $t_r$  пирометрами спектрального отношения; штриховые кривые — погрешность измерения ( $t_s - t$ ) при измерении  $t_s$  яркостными пирометрами; завышенные показания  $t - t_r$  по сравнению с  $t$  при измерении пирометрами спектрального отношения

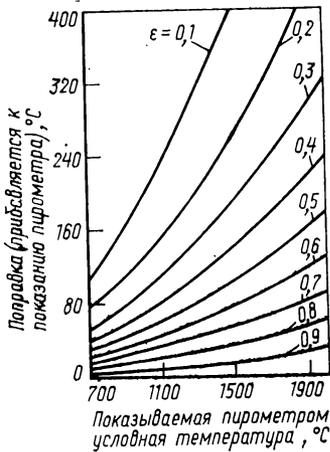
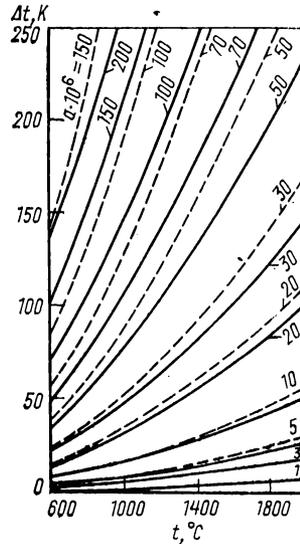


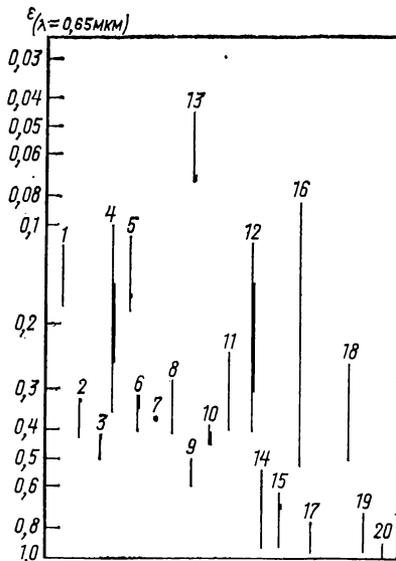
Рис. 9.7. Поправка ( $-t = t - t_s$ ) к показываемой яркостным пирометром температуре  $t_s$  для нечерных объектов ( $\lambda = 0,65$  мкм;  $t$  — действительная температура объекта)



измерения или занижение показания [9.12]. Для длины волны  $\lambda = 0,650$  мкм требуемая корректировка может быть определена непосредственно из рис. 9.7. Возможные значения излучательной способности  $\varepsilon_{0,65 \text{ мкм}}$  для основных технически важных материалов приведены на рис. 9.8. Наиболее достоверные значения отмечены жирной чертой. У некоторых тел излучательная способность  $\varepsilon_{0,65 \text{ мкм}}$  имеет небольшой разброс. Для них достаточно надежно действительную температуру определяют корректировкой показания пирометра. В противоположность этому для тел со значительным разбросом значений излучательной способ-

Рис. 9.8. Излучательные способности различных тел  $\varepsilon$  ( $\lambda = 0,65$  мкм). Максимальные и минимальные значения излучательной способности тела взаимосвязаны. Толщина и длина линий приблизительно характеризуют степень достоверности приводимых данных (наиболее достоверные значения излучательной способности отмечены жирной линией):

1 — алюминий неокисленный; 2 — железо в твердом состоянии блестящее; 3 — железо в жидком состоянии неокисленное; 4 — медь в твердом состоянии; 5 — медь в жидком состоянии неокисленная; 6 — никель в твердом состоянии; 7 — никель в жидком состоянии; 8 — платина; 9 — железо в жидком состоянии без шлака; 10 — вольфрам; 11 — цинк; 12 — глинозем; 13 — серебро; 14 — железо в жидком состоянии окисленное; 15 — железо окисленное в твердом состоянии; 16 — магний (окись магния); 17 — графит, уголь; 18 — фарфор; 19 — шлаки; 20 — силикатные огнеупоры



ности требуемые в каждом отдельном случае корректировочные значения приходится определять более или менее частыми повторяющимися сравнительными измерениями, например, с помощью термоэлектрических термометров при температуре эксплуатации. Если в объекте измерения высверлить несколько отверстий, то излучение будет как у черного излучателя (метод отверстий). Визированием мест сверлений и нетронутых участков поверхности объекта измерения определяют  $t$  и  $t_s$  и на их основе  $\varepsilon_{0,65 \text{ мкм}}$ , а также  $a$ .

Чем больше длина волны, для которой пирометр еще сохраняет свою чувствительность, тем больше погрешность измерения. С точки зрения влияния значения излучательной способности на показания в зависимости от длины волны монохроматический пирометр является наиболее типичным.

### 9.3.2. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ВЕЛИЧИНЫ СУММАРНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ $\varepsilon_t$

Если пирометром полного излучения измерена радиационная температура  $T_t$  нечерного тела с излучательной способностью  $\varepsilon_t$  и действительной температурой  $T$ , то плотность излучения этого тела  $M_t$  в соответствии с уравнением (9.13) можно записать как  $M_t = \varepsilon_t \sigma T^4 = \sigma T_t^4$ , откуда  $T = T_t / \sqrt[4]{\varepsilon_t}$ . Погрешность измерения и занижение показания определяются из следующих выражений:

$$f = t_t - t = T_t (1 - 1/\sqrt[4]{\varepsilon_t}); \quad t - t_t = T (1 - \sqrt[4]{\varepsilon_t}). \quad (9.22)$$

Поскольку в общем случае  $\varepsilon(\lambda)$  изменяется с изменением длины волны и температуры, то  $\varepsilon_t$  можно рассчитать интегрированием по длине волны функции  $\varepsilon(\lambda, T)$ :

$$\varepsilon_t = \frac{M_t}{M_{t_s}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) M_{\lambda_s} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{\lambda_s} d\lambda} = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda; T) d\lambda. \quad (9.23)$$

Если в пределах не очень узких спектральных интервалов спектральная излучательная способность  $\varepsilon(\lambda)$  имеет различные дискретные значения, например между  $\lambda_0$  и  $\lambda_a$ , между  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$  и т. д., то с помощью функции  $B(v)$  из раздела 9.1.5 (табл. 9.2) можно рассчитать  $\varepsilon_t$ :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{0,a} B(v)_a + \varepsilon_{a,b} [B(v)_b - B(v)_a] + \dots, \text{ до } \lambda = \infty, \quad B(v) = 1. \quad (9.24)$$

Пр и м е р:<sup>1</sup>  $T = 1300$  К; между  $\lambda_0$  и  $\lambda_a$  величина  $\varepsilon_{0,a}$  равна 0,10; между  $\lambda_a$  и  $\lambda_b = \infty$  величина  $\varepsilon_{a,b}$  равна 0,95;  $v_a = \lambda_a T / c_2 = 0,235$  и  $v_b = \infty$ . По табл. 9.2 находим, что  $B(v)_a = 0,357$  и  $B(v)_b = 1$ . Отсюда  $\varepsilon_t = 0,10 \cdot 0,357 + 0,95(1 - 0,357) = 0,646$  [9.5].

Суммарную излучательную способность  $\varepsilon_t$  можно определить простым методом, если пирометр полного излучения градуирован по излучению черного тела и если известна действительная температура  $t$  объекта измерения. В этом случае  $\varepsilon_t = (T_i/T)^4$ . Такое определение целесообразно прежде всего в том случае, если  $\varepsilon_t$  неизвестно, изменяется необычным образом с изменением длины волны или если объект измерения имеет селективное излучение.

### 9.3.3. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ВЕЛИЧИНЫ ЧАСТИЧНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ $\varepsilon_b$

Излучательную способность  $\varepsilon_b$  можно определить, как и  $\varepsilon_t$ , интегрированием по длинам волн по уравнению (9.7). Если значения  $\varepsilon(\lambda)$  в не очень узких спектральных интервалах можно принять постоянными, то при помощи функции  $B(v)$  величину частичной излучательной способности можно вычислить, используя следующее выражение:

$$\varepsilon_b = \frac{1}{B(v)_{\lambda x}} \{ \varepsilon_{a,b} [B(v)_b - B(v)_a] + \varepsilon_{b,c} [B(v)_c - B(v)_b] + \dots \text{ до } \lambda = \lambda_x \}. \quad (9.25)$$

Для данного пирометра частичного излучения можно определить зависимость между  $t$ ,  $t_b$  и  $\varepsilon_b$ , если известна характеристика сигнала  $S = f(t)$  и величина сигнала пропорциональна плотности излучения. Это практически верно для пирометров излучения с термопарами и фотоэлементами в качестве первичных пирометрических преобразователей. Например, для температуры  $t$  из градуировочной кривой можно определить сигнал  $S$ , а для  $t_b$  — сигнал  $S_b$ . Тогда

$$\varepsilon_b = S_b/S \text{ или } S = S_b/\varepsilon_b, \quad (9.26)$$

если известно значение  $\varepsilon_b$ .

Для пирометров полного и частичного излучения, как и для яркостного пирометра, зависимости между измеренными температурами  $t_t$ ,  $t_b$  и действительной температурой  $t$  определяются экспериментально путем нейтрального ослабления излучения черного тела. Если эти соотношения или требуемые корректировочные значения  $t - t_t$  или  $t - t_b$  представить как параметры  $\varepsilon_t$  или  $\varepsilon_b$  в зависимости от  $t$ , то при известных действительной и измеренной температурах можно

<sup>1</sup> См. примечание на с. 349.

определить соответствующую излучательную способность или по известным излучательным способностям и измеренным условным температурам определить действительную температуру объекта.

Для термоэлектрических линзовых пирометров погрешность измерения, если  $\epsilon_b > 0,85$ , определяется из выражения

$$f = - \frac{1 - \epsilon_b}{4} (t + 300). \quad (9.26a)$$

Измеренная условная температура частичного излучения  $t_b$  находится между радиационной температурой  $t_t$  и яркостной температурой  $t_s$ . В зависимости от положения и ширины области спектра пирометр частичного излучения ведет себя либо больше как пирометр полного излучения, либо как квазимонохроматический (яркостной) пирометр.

### 9.3.4. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОШЕНИЯ $\epsilon_1/\epsilon_2$

При измерении температуры пирометрами спектрального распределения их показания соответствуют действительной температуре  $T$  объекта, имеющего серое излучение независимо от величины излучательной способности. В этом случае  $t_v = t_f = t_r = t$ . Для нечерных или несерых объектов связь между действительной и условной температурой, измеряемой пирометром спектрального отношения, может быть найдена из уравнения (9.19г):

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{1}{c_2} \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = a;$$

$$t_r - t = \frac{a T_r^2}{1 + a T_r}, \quad (9.27)$$

где  $\epsilon_1$  соответствует  $\lambda_1$  и  $\epsilon_2 - \lambda_2$ .

Если измерение производится в двух не очень узких спектральных участках, то отношение  $\epsilon_{b1}/\epsilon_{b2}$  определяют по уравнению (9.7) или при помощи функции  $B(v)$  по уравнению (9.25). Если же известны значения  $\epsilon(\lambda)_1$  и  $\epsilon(\lambda)_2$ , то погрешность измерения  $f = t_r - t$  вычисляется по уравнению (9.27). Погрешность измерения можно также определить при помощи рис. 9.5 и 9.6 аналогично тому, как это выполняется для яркостных пирометров [9.12].

В табл. 9.3. приведены погрешности измерения различных пирометров в зависимости от показываемой ими условной температуры  $t_d$  и излучательной способности объекта  $\epsilon_1$ . Для пирометра спектрального отношения (Ардокол)  $\lambda_1 = 0,888$  мкм и  $\lambda_2 = 1,034$  мкм. Для вольфрама

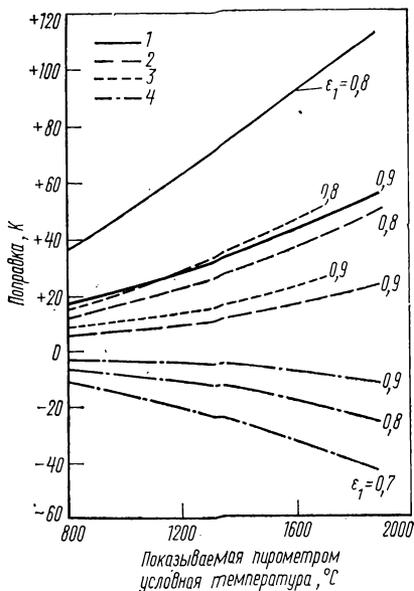


Рис. 9.9. Поправка (погрешность со знаком «минус»), к показаниям различных пирометров излучения в зависимости от значения излучательной способности  $\epsilon_1$  (для пирометра спектрального отношения — при измерении температуры вольфрама): 1 — рефракторный пирометр полного излучения (Ардометр); 2 — оптический пирометр с исчезающей нитью; 3 — пирометр частичного излучения с кремниевым фотоэлементом (Ардофот); 4 — пирометр спектрального отношения с кремниевым фотоэлементом (Ардокол)

Т а б л и ц а 9.3

## Погрешности измерения различных пирометров, К

$\varepsilon_1$	Пиро- метр *	Знак погреш- ности	Показываемая условная температура $t_A$ , °С						
			800	900	1100	1300	1500	1700	1900
0,9	I	+	2,5	3	4	5,5	7	9	11
	II	—	8	10	12	15	19	23	25
	III	—	12	16	22	30	37	45	52
0,8	I	+	5,5	7	10	13,5	16	21	25
	II	—	17	19	25	33	41	48	58
	III	—	36	40	51	67	80	94	106
0,7	I	+	10	12	17	22	28	35	42
	II	—	27	31	41	51	63	77	92
	III	—	65	71	87	109	128	150	—
0,6	I	+	16	20	27	35	44	55	66
	II	—	38	46	58	74	90	109	128
	III	—	99	107	128	162	187	216	—
0,5	I	+	25	30	41	53	67	83	99
	II	—	51	62	80	102	126	152	—
	III	—	133	145	183	225	260	—	—
0,4	I	+	35	43	60	78	99	122	147
	II	—	68	80	104	130	160	195	—
	III	—	185	199	250	315	367	—	—
0,3	I	+	55	68	92	120	152	186	224
	II	—	93	106	132	162	200	224	—
	III	—	250	270	345	—	—	—	—

\* I — пирометр спектрального отношения; II — пирометр частичного излучения с кремниевым фотоэлементом; III — пирометр полного излучения.

значение  $\varepsilon_2$  рассчитывают, пользуясь табличными значениями  $\varepsilon_1$ , с допущением, что  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(1 - \varepsilon_1) = K$  независимо от значения  $\varepsilon_1$  (см. 9.7.7.4 и [9.95]).

Из уравнения (9.27) следует, что при  $\lambda_2 > \lambda_1$  и  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \geq 1$  погрешность измерения может иметь нулевое, положительное или отрицательное значение и что поэтому измеряемая пирометром спектрального отношения условная температура  $t_r$  может быть равна, больше или меньше действительной температуры объекта ( $t_r \approx t$ ).

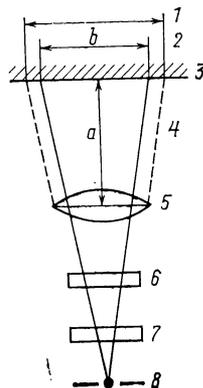
Данные рис. 9.9 и табл. 9.3 позволяют судить о влиянии величины излучательной способности на показания различных пирометров излучения в области температур 800—1900°С [9.15а, 9.15в].

## 9.4. ЭФФЕКТИВНАЯ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ДЛИНЫ ВОЛН ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Воспринимаемая приемником излучения и преобразуемая им в выходной сигнал пирометра часть падающего на приемник потока излучения определяется не только значением температуры и спектральным составом излучения объекта измерения, но и спектральной чувствительностью пирометра. На рис. 9.10 показана оптическая схема пирометра излучения и объекта измерения, из которой видно, что на приемник излучения пирометра падает излучение только от поля измерения объекта. В выходной сигнал пирометра преобразуется только некоторая часть излучения поля измерения, так как воспринимаемая приемником

Рис. 9.10. Схема действия пирометра излучения:

1 — поле наблюдения определяет размер изображения; 2 — поле измерения влияет на энергетическую освещенность приемника излучения; 3 — объект измерения создает энергетическую освещенность приемника излучения; 4 — показатель визирования — отношение  $b/a$ ; 5 — входное отверстие (апертура) объектива, например отверстие оправы объектива; 6 — нейтральный ослабитель поглощает излучение независимо от длины волны; 7 — фильтр влияет на спектральное распределение; 8 — приемник излучения (черный, серый, селективный) превращает воспринимаемое излучение в выходной сигнал пирометра; воспринимаемое излучение представляет собой часть температурного излучения поля измерения, превращаемую приемником излучения в выходной сигнал пирометра



излучения энергия зависит от спектральных характеристик входных устройств пирометра, как например линз или зеркал. Далее спектральная область ограничивается или сужается встроенными в пирометр селективными фильтрами, тогда как ослабляющие элементы, такие как обтюраторы, диафрагмы, нейтральные или серые стекла, ослабляют излучение неселективно, но в определенном отношении. При помощи нейтрального клина или поляризационного фильтра можно ослаблять излучение также в переменном отношении. Кроме того, если черные и серые приемники излучения, например зачерненные термомпары или болометры, превращают падающее на них излучение в выходной сигнал пирометра практически независимо от длины волны, то селективно действующие приемники излучения такие, как, например, фотоэлементы или фотосопротивления, имеют спектральную характеристику чувствительности, форма и спектральная область которой определяются типом приемника. Необходимо, кроме того, всегда помнить, что превращаемое в сигнал излучение может также претерпеть изменения вследствие отражений.

### 9.4.1. ЭФФЕКТИВНАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ $\lambda_e$

Для очень точных измерений температуры служат квазимонохроматические (яркостные) пирометры, чувствительные к излучению только в узком интервале длин волн  $\Delta\lambda$ , выделяемым в спектре излучения щелью спектрометра или фильтром. Такие пирометры можно характеризовать единственной эффективной длиной волны  $\lambda_e$ , при которой спектральная яркость или энергетическая яркость изменяются с температурой<sup>1</sup> точно так же, как и измеренные их значения [9.2; 9.2a; 9.4; 9.4a]. Такие эффективные длины волн можно рассматривать как не зависящие от температуры лишь в том случае, если полуширина пропускания

<sup>1</sup> Имеется в виду закон Планка или формула Вина при  $\lambda = \lambda_e$ . (Прим. ред.)

фильтра <sup>1</sup> меньше 5 нм (как у монохроматических интерференционных фильтров). При больших значениях полуширины пропускания фильтра величина  $\lambda_e$  зависит от температуры. Эффективную длину волны можно определить графическим интегрированием кривой пропускания фильтра. Вертикальная прямая, делящая площадь под этой кривой на две равные части, пересекает ось абсцисс в точке  $\lambda_e$ .

Такой метод определения эффективных длин волн пригоден и для пирометров частичного и полного излучения. Имея значения спектральной энергетической яркости  $L_{\lambda s}$  черного излучателя, коэффициента пропускания промежуточной среды  $\tau(\lambda)$ , коэффициента отражения линзы  $\rho(\lambda)$ , а также спектрального коэффициента чувствительности приемника излучения  $s(\lambda) = S/E_\lambda$  (где  $S$  — выходной сигнал пирометра,  $E_\lambda$  — спектральная энергетическая освещенность), эффективную длину волны пирометра получают как интегральную среднюю величину при графическом интегрировании из следующего соотношения:

$$\int L_{\lambda s}(\lambda, T) \tau(\lambda) [1 - \rho(\lambda)] s(\lambda) d\lambda = \int a(\lambda, T) = L_s(\lambda_e, T), \quad (9.28)$$

где  $a(\lambda, T)$  — преобразованная в выходной сигнал пирометра энергетическая яркость.

Эффективную длину волны также можно при известных условиях определить при помощи функции  $B_v$ . Так как интегральному среднему соответствует  $B_v = 0,5$ , то по табл. 9.2 находим величину  $v$ , равную  $\lambda_e T / c_2 = 0,282$ , откуда определяем  $\lambda_e$  в зависимости от  $T$ .

Эффективную длину волны можно определить также и по отношению энергетических яркостей черного тела при двух температурах  $t_1$  и  $t_2$  как некоторую длину волны  $\lambda_e(T_1, T_2)$ , при которой отношение энергетических яркостей при температурах  $T_1$  и  $T_2$  равно отношению преобразованных в выходные сигналы пирометра энергетических яркостей:

$$\frac{L_s(\lambda_e, T_1)}{L_s(\lambda_e, T_2)} = \frac{\int a(\lambda, T_1)}{\int a(\lambda, T_2)}. \quad (9.29)$$

Отсюда при помощи уравнения (9.14) путем замены  $\lambda$  на  $\lambda_e(T_1, T_2)$  получим

$$\lambda_e(T_1, T_2) = \frac{c_2(1/T_2 - 1/T_1)}{\ln \left[ \frac{\int a(\lambda, T_1)}{\int a(\lambda, T_2)} \right]} = \frac{c_2(1/T_2 - 1/T_1)}{\ln \epsilon_e}. \quad (9.30)$$

Таким образом, значение эффективной длины волны не только зависит от температуры при данном способе определения, но и от выбранной разности температур. Если пирометр отградуирован по черному излучателю, то его эффективную длину волны  $\lambda_e(T_1, T_2)$  можно рассчитать при помощи уравнения (9.30) по измеренным значениям температуры  $t_1$  и  $t_2$ , соответствующим неослабленной и ослабленной обтюратором энергетической яркости. Ослабление сигнала  $\int a(T_1) / \int a(T_2)$  эквивалентно некоторой излучательной способности  $\epsilon_e$ , которую надо подставить в уравнение (9.19) вместо  $\epsilon(\lambda)$ . Для почти черных или серых излучателей действительную температуру можно определить по измеренному значению температуры при учете экспериментально устанавливаемой температурной зависимости  $\lambda_e(T_1, T_2)$ . Поскольку эффективную длину волны рассчитывают на основе нейтрального ослабления излучения черного тела, то в случае измерения температуры объектов с селективным характером излучения при этом способе определения для пирометров частичного и полного излучения получим другие значения эффективной длины волны. Вследствие этого если по уравнению (9.19) рассчитать

<sup>1</sup> Т. е. разность абсцисс точек пересечения кривой пропускания фильтра с прямой, проведенной параллельно от оси абсцисс через ординату половины высоты кривой пропускания фильтра. (Прим. ред.)

с подстановкой  $\lambda_e (T_1, T_2)$  вместо  $\lambda$  излучательную способность такого объекта, то в зависимости от степени его селективности излучательная способность  $\epsilon_b$  будет в большей или меньшей степени отличаться от действительной излучательной способности объекта.

#### 9.4.2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ $\lambda_{ch}$

Для общей оценки точности пирометров частичного излучения, а также для приближенного расчета погрешностей измерения, вызванных неопределенностью величины излучательной способности объекта, рекомендуется (при умеренных требованиях к точности измерения) вместо эффективной длины волны применять легко определяемую характеристическую длину волны данного пирометра  $\lambda_{ch}$  [9.12]. Такую длину волны определяют экспериментально по показаниям пирометра, полагая, что излучательная способность объекта  $\epsilon = 0,6$ . В этом случае

Т а б л и ц а 9.4

**Зависимость величины занижения показаний \* пирометров  
частичного излучения от температуры  $t$   
и излучательной способности  $\epsilon_b$  объекта**

Тип пирометра	$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_b = 0,8$		$\epsilon_b = 0,6$		$\epsilon_b = 0,4$	
		$(t - t_b)$	$(t - t_{b'})$	$(t - t_b)$	$(t - t_{b'})$	$(t - t_b)$	$(t - t_{b'})$
Пирометр с термоэлектрическим приемником излучения и линзой из кварца; $\lambda_{ch}, m = 2,28$ мкм при $1000^\circ\text{C}$	600	31	26	68	65	—	—
	800	42	39	94	88	157	145
	1000	55	55	119	119	200	198
	1300	75	83	161	178	261	276
Пирометр с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой; $\lambda_{ch}, m = 1,72$ мкм при $1300^\circ\text{C}$	800	34	30	75	66	132	113
	1000	46	42	101	92	173	156
	1300	61	63	138	138	238	231
	1500	76	80	167	173	283	288
	1750	96	104	212	223	350	367
Пирометр с кремниевым фотозлемснтом; $\lambda_{ch}, m = 0,89$ мкм при $1300^\circ\text{C}$	900	19	19	44	44	78	73
	1000	22	22	51	51	90	88
	1300	32	33	74	74	131	128
	1500	40	42	90	90	160	162
	1750	50	55	114	121	198	209
Оптический яркостной пирометр		$\epsilon_s = 0,6,$ $(t - t_s)$ при 1,93 мкм			$\epsilon_s = 0,6,$ $(t - t_s)$ при 0,65 мкм		
	800	74			26		
	1000	102			37		
	1500	192			70		
	1750	247			90		

\*  $(t - t_b)$  — занижение показаний от  $\epsilon_b$ ;  $(t - t_{b'})$  — занижение показаний, рассчитанное по характеристической длине волны  $\lambda_{ch}, m$ ;  $(t - t_s)$  — занижение показаний оптического яркостного пирометра.

при температуре  $t$  получим условную температуру частичного излучения  $t_b$ . Если в уравнение (9.19) подставить вместо  $T_s$  измеренные  $T$  и  $T_b$ , то при  $\epsilon = 0,6$  получим характеристическую для данного пирометра длину волны  $\lambda_{ch}$ . В зависимости от типа пирометра величина  $\lambda_{ch}$ , как и  $\lambda_e$ , зависит от температуры (рис. 9.11). Влияние температуры у пирометров 4—8 настолько незначительно, что по всему диапазону измерения их можно с достаточной точностью характеризовать некоторой средней величиной характеристической длины волны  $\lambda_{ch, m}$ .

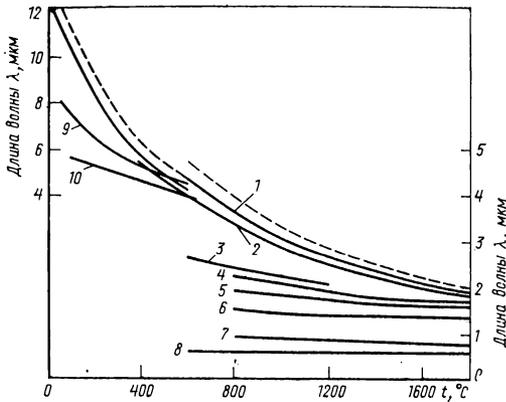


Рис. 9.11. Температурная зависимость эффективной длины волны  $\lambda_e$  пирометра полного излучения (штриховая кривая) и характеристической длины волны  $\lambda_{ch}$  ( $\epsilon = 0,6$ ) различных пирометров излучения:

1 — пирометр полного излучения; 2 — термопарный пирометр с линзой из флюорита; 3 — то же, с линзой из плавленного кварца; 4 — пирометр с фото-сопротивлением из сернистого свинца; 5 — термопарный пирометр со стеклянной линзой; 6 — пирометр с германиевым фотоэлементом; 7 — пирометр с кремниевым фотоэлементом; 8 — пирометр с исчезающей нитью ( $\lambda = 0,65$  мкм); 9 — пирометр с зеркальной оптикой; 10 — пирометр с зеркальной оптикой и окошком из фтористого лития

В табл. 9.4 сопоставлены величины занижения показаний ( $t - t_b$ ) некоторых пирометров частичного излучения в зависимости от  $\epsilon_b$  с величинами занижения значений, которые можно определить при помощи средней характеристической длины волны  $\lambda_{ch, m}$  по уравнению (9.19).

Как и для оптических яркостных пирометров, разность температур ( $t - t_b$ ) или ( $t - t_{b'}$ ) для одинаковых температур  $t$  уменьшается с уменьшением длины волны  $\lambda_{ch, m}$ . При измерении температур пирометрами, чувствительными в очень узких ультрафиолетовых участках спектра, погрешность измерения при не слишком малых излучательных способностях объекта может быть пренебрежимо малой.

## 9.5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМПЕРАТУРА — ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ПИРОМЕТРА

### 9.5.1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА

Излучение объекта измерения, взаимодействуя с линзами, зеркалами или фильтрами пирометра, частично отражается и частично ослабляется. Остаточное излучение измеряемого поля объекта измерения, падающее на приемник излучения, находится с ним в состоянии лучистого теплообмена и преобразуется в нем в выходной сигнал пирометра. Таким образом, с одной стороны, сигнал определяется измеряемым излучением, а с другой — излучением, испускаемым приемником излучения или просто корпусом пирометра. Интегрированием уравнения (9.28) этот сигнал можно рассчитать как для температуры  $T_1$  черного излучателя, так и для температуры  $T_3$  корпуса пирометра [9.5]. С помощью функции  $B(v)$  получаем общее уравнение для характеристики пирометра:

$$S = E_2(1 - \rho) [B(v)_1 T_1^4 - B(v)_3 T_3^4]. \quad (9.31)$$

Для любых объектов с излучательной способностью  $\epsilon \ll 1$  сигнал  $S_A$  равен  $\epsilon S$ . Сигнал  $S_A$  соответствует по характеристике пирометра измеряемой им условной температуре  $t_A < t_1$ . Для таких излучателей справедливо выражение

$$S_A = \epsilon S = E (1 - \rho) [B(v)_A T_A^4 - B(v)_3 T_3^4]. \quad (9.31a)$$

Здесь  $E$  является мерой чувствительности приемника излучения, которая по уравнению (9.35) зависит также от теплообмена излучением и теплопроводностью между приемником излучения с температурой  $T_2$  и корпусом пирометра с температурой  $T_3$ . Ослабление излучения в результате отражающего действия поверхностей линз, зеркал и окошек пирометра равно  $(1 - \rho)$ .

В черных приемниках излучения  $(1 - \rho) B(v) = 1$ , если в пирометре отсутствуют детали, ослабляющие излучение. В этом случае для пирометра полного излучения будет справедливо выражение

$$S = E (T_1^4 - T_3^4) \quad \text{или} \quad S_A = E (T_A^4 - T_3^4). \quad (9.32)$$

Как правило, пирометры градуируют при температуре корпуса пирометра  $t_3 = 20^\circ \text{C}$ . В этом случае выходной сигнал пирометра при измерении температуры любого излучателя определяется из выражения

$$S_A = E (1 - \rho) [B(v)_A T_A^4 - S_{20}], \quad (9.33)$$

где  $S_{20} = E (1 - \rho) B(v)_3 T_{(293)}^4$ .

При высоких температурах объекта измерения  $T_1$  или  $T_A$  температура корпуса пирометра практически не влияет на уровень выходного сигнала пирометра, вследствие чего величиной  $S_{20}$  можно пренебречь.

Доля излучения измерительного поля объекта, пропущенная элементами пирометра, ослабляющими излучение, от всего теплового излучения измерительного поля объекта определяется (без учета потерь на отражение) коэффициентом пропускания  $\tau$ , который рассчитывается по спектральному коэффициенту пропускания  $\tau(\lambda)$ . Для последовательно расположенных участков длин волн от  $\lambda_a$  до  $\lambda_x$  спектрального диапазона пирометра можно определить величины  $\tau(\lambda) \Delta\lambda$ . Для отдельных длин волн можно в зависимости от температуры  $T$  объекта измерения или корпуса пирометра определить по приращениям  $\Delta\lambda T/c_2$  приращения функций  $\Delta B(v)$ . Сложением отдельных значений произведений  $\tau(\lambda) \Delta\lambda \Delta B(v)$  для длин волн от  $\lambda_a$  до  $\lambda_x$  получаем характерные для данного пирометра соответствующие значения  $B(v)_1$  или  $B(v)_3$ .

Если в интервале длин волн от  $\lambda_a$  до  $\lambda_x$  приемник излучения имеет зависящую от длины волны спектральную чувствительность, т. е. если применяются селективные приемники излучения, то рассчитанные значения  $B(v)_1$  и  $B(v)_3$  надо еще умножить на величину, определяемую суммой спектральных чувствительностей приемника  $S(\lambda)$  для отдельных участков длин волн.

## 9.5.2. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ ПИРОМЕТРА $\lambda_{Gr}$

Из расчетного или известного значения  $B(v)_1$  можно найти предельную длину волны  $\lambda_{Gr}$  данного пирометра, взяв из табл. 9.2 соответствующее значению  $B(v)_1$  значение  $\lambda T/c_2$ , откуда получаем предельную длину волны  $\lambda_{Gr}$  как функцию температуры  $T$ . При этой длине волны величина  $B(v)_1$  излучения, прошедшего через элементы пирометра, ослабляющие излучение, имеет такое же значение, какое получилось бы, если бы между  $\lambda_0$  и  $\lambda_{Gr}$  пропускалось все излучение, а при более длинных волнах — полностью не пропускалось. Для превращения излучения измерительного поля объекта в сигнал необходимо в случае применения селективных приемников излучения учитывать фактор, определяемый из спектральной чувствительности приемника.

Для некоторых пирометров частичного излучения в табл. 9.5 приведены значения функции  $B(v)_1$  и предельные длины волн. Поскольку пирометры, в которых

Т а б л и ц а 9.5

Значения функции  $B(\nu)_1$  (%) и предельные длины волн  $\lambda_{Gr}$  (мкм) пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения

$t, ^\circ\text{C}$	Флюоритовая линза		Кварцевая линза		Стеклоанная линза		Линза из фтористого лития		Вогнутое зеркало и окошко из полиэтиленовой пленки	
	$B(\nu)_1, \%$	$\lambda_{Gr}, \text{мкм}$	$B(\nu)_1, \%$	$\lambda_{Gr}, \text{мкм}$	$B(\nu)_1, \%$	$\lambda_{Gr}, \text{мкм}$	$B(\nu)_1, \%$	$\lambda_{Gr}, \text{мкм}$	$B(\nu)_1, \%$	$\lambda_{Gr}, \text{мкм}$
1750	98,3	9,40	83	3,77	65	2,54	—	—	—	—
1500	97,7	9,41	78	3,72	58	2,57	—	—	—	—
1000	94,5	9,44	61	3,76	37	2,66	88,5	6,95	—	—
800	91,9	9,45	49	3,78	25	2,70	84	7,05	65	5,4
600	86,6	9,48	34,5	3,81	14	2,74	76	7,22	65	5,9
400	77,1	9,53	18,1	3,84	5,3	2,79	63	7,38	63,5	7,46
200	57,1	9,60	4,5	3,90	—	—	40	7,56	54	9,2
100	40,4	9,68	—	—	—	—	26	7,86	51	11
50	30,7	9,72	—	—	—	—	17,5	7,92	45	12
20	20,3	9,80	0,08	4,0	0,012	3,10	12,5	7,95	41	12,4

измеряемое излучение при температуре  $t$  ослабляется максимум до 90%, могут рассматриваться как пирометры полного излучения, неудивительно, что пирометры с термоэлектрическими приемниками и линзами из флюорита при температурах выше  $800^\circ\text{C}$  ведут себя именно как пирометры полного излучения. Точно так же ведет себя при температурах выше  $300^\circ\text{C}$  и пирометр с термоэлектрическим приемником, вогнутым зеркалом и окошечком из полиэтиленовой пленки. Это объясняется тем, что этот пирометр при температурах выше  $300^\circ\text{C}$  ослабляет излучение черного тела во всей области спектра до одинакового значения (65%), так что при температурах, соответствующих  $B(\nu)_1 = 65 \cdot 0,9$ , он ведет себя как пирометр, на который падает серое излучение.

### 9.5.3. ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ПИРОМЕТРА

По уравнению (9.31) создаваемый пирометром выходной сигнал зависит от температуры  $t_1$  объекта измерения и от температуры  $t_2$  корпуса пирометра. Если изменяется температура корпуса, то в результате влияния величины  $B(\nu)_2 T_2^3$  сигнал будет уменьшаться с повышением температуры  $t_2$ . Таким образом, если приемник излучения имеет ту же температуру, что и корпус пирометра (как у фотоэлектрических приемников), то на каждый градус изменения температуры корпуса пирометра  $t_2$  происходит одинаковое изменение сигнала по всему диапазону измерения (параллельное смещение характеристики пирометра). Если же в результате облучения температура  $t_2$  приемника излучения будет отличаться (обычно она несколько выше) от температуры  $t_2$  корпуса пирометра, как, например, в случае термоэлектрического или болометрического приемника излучения, то необходимо дополнительно учитывать также влияние теплообмена излучением и теплопроводностью между приемником излучения и корпусом пирометра. Вследствие этого при повышении температуры  $t_2$  корпуса пирометра уровень выходного сигнала пирометра снижается с увеличением температуры  $t_1$  объекта измерения (изменение наклона характеристики пирометра). Эта погрешность проявляется в температурной зависимости величины  $E$  в уравнении (9.31).

Таким образом, создаваемый приемником излучения сигнал  $S$  при измерении температуры черного излучателя зависит также от разности температур между приемником излучения и корпусом пирометра ( $T_2 - T_3$ ). В условиях установившегося теплообмена воспринимаемая приемником излучения энергия должна соответствовать отдаваемой им энергии, причем эта энергия отдается как путем лучистого теплообмена между приемником излучения и корпусом пирометра, так и за счет теплопроводности. Часть энергии, отдаваемой приемником излучения корпусу пирометра за счет теплопроводности, равна  $C(T_2 - T_3)$ , где  $C$  — постоянная теплоотвода.

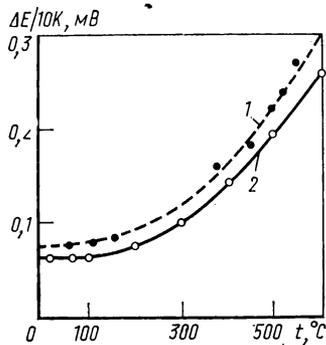


Рис. 9.12. Экспериментально найденные (1) и расчетные (2) погрешности измерения температуры  $\Delta E/10$  К для пирометра с термоэлектрическим приемником излучения, зеркальной оптикой и окошком из полиэтиленовой пленки (Ардонокс фирмы «Siemens») в зависимости от температуры объекта измерения

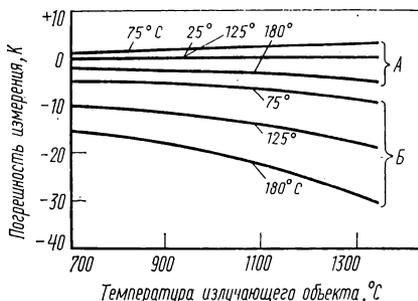


Рис. 9.13. Погрешность измерения пирометра с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой (Ардометр) для области измерений 700—1350° С при температуре корпуса пирометра 25—180° С с использованием (А) и без использования (Б) автоматической компенсации

Если активную площадь поверхности приемника излучения обозначить через  $A$ , то уравнение теплового баланса приемника излучения можно записать в следующем виде:

$$(1 - \rho) A \sigma [B(v)_1 T_1^4 - B(v)_3 T_3^4] \sin^2 \theta = (1 + \epsilon_r) A \sigma (T_2^4 - T_3^4) + (T_2 - T_3) C, \quad (9.34)$$

где величина  $(1 + \epsilon_r)$  характеризует излучение энергии приемником излучения в обе стороны (излучательная способность тыльной стороны приемника излучения  $\epsilon_r$  должна быть минимальной);  $\theta$  — половина плоского угла, определяемого диаметром входной диафрагмы пирометра и ее расстоянием от приемника излучения. Из уравнения (9.34) находим разность температур ( $T_2 - T_3$ ), пропорциональную выходному сигналу пирометра, т. е.  $S = P(T_2 - T_3)$ . Из этого выражения и уравнений (9.31) и (9.34) после некоторых преобразований получим<sup>1</sup>

$$E = \frac{P \sin^2 \theta}{(1 + \epsilon_r) (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2) + C/A \sigma}, \quad (9.35)$$

<sup>1</sup> Величину  $(T_2^4 - T_3^4)$  из (9.34) можно представить в следующем виде  $(T_2^4 - T_3^4) = (T_2^2 - T_3^2)(T_2^2 + T_3^2) = (T_2 - T_3) \times (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2)$ . Тогда уравнение (9.34) примет следующий вид

$$(1 - \rho) A \sigma [B(v)_1 T_1^4 - B(v)_3 T_3^4] \sin^2 \theta = (T_2 - T_3) [(1 + \epsilon_r) A \sigma (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2) + C]$$

или

$$(1 - \rho) [B(v)_1 T_1^4 - B(v)_3 T_3^4] = (T_2 - T_3) \frac{1}{\sin^2 \theta} \times \left[ (1 + \epsilon_r) (T_2 + T_3) (T_2^2 + T_3^2) + \frac{C}{A \sigma} \right] \quad (\text{Прим. ред.}).$$

где  $P$  — среднее значение т. э. д. с. термоэлектрического приемника излучения в диапазоне температур от  $T_2$  до  $T_3$ .

Как следует из формулы (9.35), величина  $E$  зависит от  $T_3$ , определяющей величину знаменателя как непосредственно, так и вследствие зависимости  $T_2$  от температуры  $T_3$  [9.5].

Чтобы влияние изменения температуры корпуса пирометра на наклон характеристики было минимальным, величина  $C/A\sigma$ , выражающая долю потерь тепла приемником излучения вследствие теплопроводности, должна быть по возможности больше доли потерь тепла за счет излучения. Для этого надо обеспечить хороший тепловой контакт между приемником излучения и корпусом пирометра. При этом, однако, несколько снижается чувствительность приемника излучения, но зато становится достаточно низкой обусловленная влиянием излучения объекта погрешность устройств, корректирующих показания пирометра при изменении температуры окружающей среды (корпуса пирометра).

Как видно из рис. 9.12, погрешность измерения пирометра с вогнутым зеркалом и термоэлектрическим приемником излучения, рассчитанная по уравнениям (9.31) и (9.35), хорошо совпадает с найденной экспериментально погрешностью измерения при изменении температуры корпуса пирометра [9.13]. При параллельном смещении характеристики пирометра погрешность измерения, вызванная изменением наклона характеристики, сильно возрастает с повышением температуры объекта измерения. На рис. 9.13 показана погрешность измерения, вызванная влиянием изменения наклона характеристики пирометра при высоких температурах объекта измерения [9.14].

## 9.5.4. КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ПИРОМЕТРА НА ЕГО ПОКАЗАНИЯ

Наряду с влиянием изменения наклона характеристики пирометра при изменении температуры его корпуса можно также пренебречь влиянием ее параллельного смещения при температурах

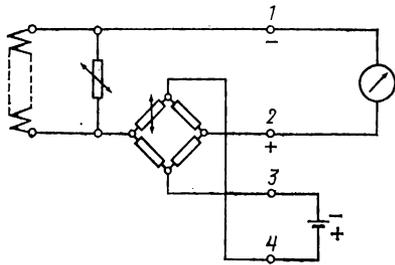


Рис. 9.14. Схема автоматической компенсации погрешности измерения температуры, измеряемой пирометром излучением с термоэлектрическим приемником излучения. Чувствительный к температуре шунт служит для компенсации изменения наклона, а мостовая схема с чувствительным к температуре сопротивлением — для компенсации параллельного смещения характеристики пирометра

объекта измерения выше  $600^\circ\text{C}$ . Для компенсации влияния изменения наклона характеристики на показания пирометра можно, например, соединить параллельно с термобатареей приемника излучения пирометра чувствительный к температуре никелевый шунт (рис. 9.14). Для этого отношение сопротивления термобатареи к сопротивлению шунта надо выбрать таким, чтобы величина  $E$  в уравнении (9.31) оставалась постоянной. Эта компенсация при тщательном выполнении настолько эффективна, что остаточная погрешность, вызванная изменением температуры корпуса пирометра в пределах от  $0$  до  $180^\circ\text{C}$  во всех диапазонах измерения выше  $600^\circ\text{C}$ , незначительна (см. рис. 9.13).

Для компенсации влияния изменения температуры корпуса пирометра при измерении температур ниже  $600^\circ\text{C}$  необходимо наряду со ставшим относительно

слабым изменением наклона характеристики пирометра в первую очередь учитывать тепловое излучение корпуса, вызывающее параллельное смещение характеристики пирометра. Для компенсации возникающей в этом случае погрешности измерения к выходному сигналу пирометра прибавляют компенсирующее напря-

жение, величина которого растет с повышением температуры корпуса пирометра (рис. 9.14).

Изменение наклона характеристики пирометра, вызываемое нагревом приемника излучения до более высокой температуры  $T_2$  по сравнению с температурой  $T_3$  корпуса пирометра (см. уравнение 9.35), можно также исключить путем модулирования излучения, падающего на приемник излучения пирометра. Этот способ применяют в основном при измерении температур, не очень высоких по сравнению с окружающей. Так как возникающий в результате нагрева приемника излучения и повышения его температуры от  $t_3$  до  $t_2$  лучистый поток от приемника излучения к корпусу пирометра не модулируется, он и не влияет на выходной сигнал пирометра.

Если имеет место лишь одно параллельное смещение характеристики пирометра, как например при применении фотоэлектрических приемников излучения, а также при измерении температуры методом модулирования потока излучения, то применительно к пирометрам полного излучения, используя уравнение (9.32), получим для изменения температуры корпуса пирометра с  $t_3$  до  $(t_3 + \Delta t_3)$ , например с  $t_3 = 20^\circ \text{C}$  до  $(20 + \Delta t_3)^\circ \text{C}$ , соответствующее изменение выходного сигнала пирометра:

$$\begin{aligned} S_{A(20 \pm \Delta t_3)} &= E [T_A^4 - T_{(20 \pm \Delta t_3)}^4] = \\ &= E [(T_A^4 - T_{20}^4) - T_{(20 \pm \Delta t_3)}^4 + T_{20}^4]. \end{aligned} \quad (9.32a)$$

Если пирометр был градуирован при  $20^\circ \text{C}$  и если изменяется температура его корпуса, то выходной сигнал  $S$  или  $S_A$  при измерении температур примерно до  $600^\circ \text{C}$  изменяется на одинаковую величину независимо от измеряемой температуры при изменении  $t_3$  на  $\Delta t_3$  (рис. 9.15). То же самое можно сказать и о влиянии изменения температуры корпуса для пирометров частичного излучения. При неизменной величине излучательной способности  $\epsilon$  изменение выходного сигнала  $S$  с понижением температуры объекта измерения уменьшается.

Таким образом, для компенсации влияния на выходной сигнал пирометра изменения температуры его корпуса при измерении относительно низких температур есть три возможности:

1. Температура корпуса пирометра автоматически поддерживается на постоянном уровне  $t_c$ , например  $60^\circ \text{C}$ , при котором производится и градуировка пирометра. В этом случае, согласно уравнению (9.32), выходной сигнал пирометра  $S_D$  равен

$$S_D = E(T_A^4 - T_c^4) = ET_A^4 - ET_c^4 = ET_A^4 - k_c \quad \text{или} \quad S_A = S_D + k_c = ET_A^4. \quad (9.32b)$$

Здесь  $k_c$  зависит только от температуры  $t_c$  и учитывается при градуировке пирометра. Погрешности измерения возникают лишь при отклонении температуры корпуса пирометра от заданного значения  $t_c$ .

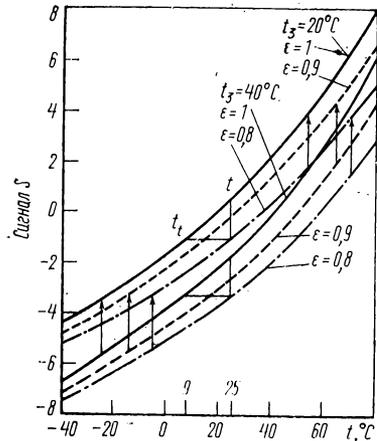


Рис. 9.15. Характеристика пирометра полного излучения при измерении низких температур в зависимости от температуры корпуса пирометра  $t_3$  и излучательной способности объекта измерения  $\epsilon_t$  ( $t_3 = 20$  и  $40^\circ \text{C}$ ;  $\epsilon_t = 1$ ; 0,9 и 0,8). Кривые для  $t_3 = 40^\circ \text{C}$  совпадают с кривыми для  $20^\circ \text{C}$ , если сигналы смещают на одинаковую величину (см. стрелки). Из кривых температура — выходной сигнал пирометра по измеряемой условной температуре  $t_A = t_t$  и излучательной способности  $\epsilon_t$  определяется действительная температура объекта измерения  $t$

2. Температура  $t_3$  корпуса пирометра и приемника излучения может быть любой. Температура корпуса и приемника излучения при градуировке равна  $t_c$  (например,  $20^\circ\text{C}$ ). В этом случае выходной сигнал пирометра  $S_D$  при температуре корпуса пирометра  $t_3 = t_c \pm \Delta t$  будет равен

$$S_D = E [T_A^4 - (T_c \pm \Delta t)^4] \quad \text{или} \quad S_A = S_D + (T_{(c \pm \Delta t)})^4 = ET_A^4. \quad (9.32\text{в})$$

Поскольку температура корпуса пирометра  $t_c$  учтена при его градуировке, необходимо при помощи термометра, измеряющего температуру корпуса пирометра, ввести в выходной сигнал пирометра некоторое корректирующее напряжение, получаемое из разности между  $E(T_{c \pm \Delta t})^4$  и  $k_c = ET_c^4$  [см. уравнение (9.32 б)].

3. При высоких требованиях к точности измерения применяют дифференциальный метод измерения, позволяющий практически полностью исключить влияние излучения корпуса пирометра. При этом периодически сравнивают энергетические яркости объекта измерения и эталонного черного излучателя при помощи обтюратора и фотоэлектрического приемника излучения. Амплитуда переменного напряжения на выходе приемника излучения зависит от разности этих энергетических яркостей.

Если температура эталонного излучателя  $t'_c$  автоматически поддерживается на заданном значении, например на  $60^\circ\text{C}$ , то выходной сигнал пирометра будет лишь функцией температуры объекта измерения (подобно п. 1), но при этом не будет независимым от температуры корпуса пирометра  $t_3$ :

$$S_A - S'_c = E(T_A^4 - T_3^4) - E(T_c'^4 - T_3^4) = E(T_A^4 - T_c'^4) = ET_A^4 - k_{c'}. \quad (9.32\text{г})$$

4. Если температура эталонного излучателя не поддерживается постоянной, т. е. если она может независимо от температуры корпуса пирометра  $t_3$  изменяться, например в пределах между  $0$  и  $60^\circ\text{C}$ , то для эталонного излучателя можно принять некоторую эталонную температуру  $t_{c'}$ , например  $20^\circ\text{C}$ , аналогично п. 2. Если изменения температуры этого излучателя составляют  $t_{c' \pm \Delta t}$ , то выходной сигнал пирометра будет равен

$$S_A - S'_c = E(T_A^4 - T_3^4) - E[(T'_{(c \pm \Delta t)})^4 - T_3^4] = E[T_A^4 - (T'_{(c \pm \Delta t)})^4]. \quad (9.32\text{д})$$

Чтобы получить  $S_A$  или  $T_A$ , необходимо, как и в п. 2, добавить в измерительный контур напряжение, получаемое из разности между  $E(T'_{c \pm \Delta t})^4$  и  $k_{c'}$ .

При дифференциальном измерении возможны, однако, незначительные погрешности вследствие отражения излучения корпуса пирометра от обратной стороны линзы объектива. Этот влияющий фактор необходимо по возможности тоже исключить.

Пирометры частичного излучения, используемые при измерении низких температур, требуют применения таких же мер по устранению влияния температуры корпуса пирометра на его выходной сигнал. Однако в отличие от приведенных выше данных для пирометров полного излучения здесь следует отметить, что в зависимости от значения эффективной длины волны и ширины рабочего участка спектра выходной сигнал пирометра пропорционален более высоким степеням температуры объекта измерения, корпуса пирометра или эталонного излучателя.

Конструкция пирометров излучения для измерения низких температур и схемы регистрации их выходных сигналов после соответствующего усиления и компенсации влияния температуры корпуса пирометра или эталонного излучателя приведены в разделе 9.7.3.3.

Поскольку при низких температурах выходной сигнал пирометра зависит не только от величины  $\epsilon T^4$ , но, согласно уравнению (9.32а), и от температуры корпуса пирометра  $t_3$ , то при известном значении  $\epsilon$  нельзя, как в случае измерения высоких температур, определить условные температуры  $t_t$  или  $t_b$  только по значению  $\epsilon$  и величине сигнала из формулы (9.31а). Поэтому влияние излучательной способности объекта измерения на измеряемую пирометром температуру целесо-

образно установить при помощи нейтрального ослабления черного излучателя при различных температурах.

Для пирометров спектрального отношения их характеристику температура — сигнал определяют также путем градуировки по черному излучателю. Характеристику таких пирометров, как и в случае характеристик яркостных пирометров, можно получить расчетным путем по превращенным в сигнал энергетическим яркостям для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  или для эффективных и характеристических длин волн. Если пренебречь влиянием температуры корпуса пирометра  $t_3$ , что допустимо вплоть до условных температур порядка  $200^\circ\text{C}$ , то при излучательных способностях  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  объекта измерения получим при помощи уравнения (9.31) и функции  $B'(v)$  закона Планка следующее выражение для выходного сигнала пирометра спектрального отношения:

$$S_{rA} = \frac{\varepsilon_1 S_{\lambda_1}}{\varepsilon_2 S_{\lambda_2}} = \frac{E(1-\rho) B'(v)_{A1} T_{A1}^4}{E(1-\rho) B'(v)_{A2} T_{A2}^4} = \frac{B'(v)_{A1} T_{A1}^4}{B'(v)_{A2} T_{A2}^4}. \quad (9.36)$$

## 9.6. ДРУГИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОКАЗАНИЯ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

### 9.6.1. ВЛИЯНИЕ СТОРОННИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ [9.15а—9.16]

Показываемая пирометром излучения условная температура зависит не только от действительной температуры объекта измерения и его излучательной способности, но и от излучения других тел, если это излучение падает на объект измерения или, как например солнечные лучи, попадает непосредственно в измерительное поле пирометра. Приведенные в разделе 9.3 погрешности измерения, вызванные неопределенностью величины излучательной способности объекта измерения, действительны лишь в том случае, если можно пренебречь влиянием температуры окружающей среды, например температурой стен ( $T \gg T_u$ ). Чем меньше различие между температурами объекта измерения и окружающей среды, тем больше проявляется (в зависимости от излучательной способности объекта измерения) влияние стороннего излучения. Такое влияние следует учитывать прежде всего при измерении низких температур, а также при измерении температуры нагреваемых в печах материалов.

#### 9.6.1.1. ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУР, МАЛО ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭТОЙ СРЕДЫ

При температуре  $t$  объекта измерения его энергетическая яркость равна  $L$ , если объектом является черное тело. Для объекта измерения с излучательной способностью  $\varepsilon$  она равна  $\varepsilon L$ . Излучение окружающей среды, в частности стен с температурой  $t_u$ , характеризуется энергетической яркостью  $L_u$ , так как стены можно рассматривать практически как черные излучатели. Тогда отраженную объектом измерения энергетическую яркость можно обозначить как  $\rho L_u$ , а пропущенную им энергетическую яркость — как  $\tau L_u$ . По закону Кирхгофа получим при помощи равенств (9.1) и (9.5) воспринимаемую пирометром энергетическую яркость  $L_A$ :

$$L_A = \varepsilon L + (1 - \varepsilon) L_u. \quad (9.36a)$$

Если известна относительная спектральная чувствительность  $s\lambda_{rel}$  пирометра, определяемая оптикой и измерительными свойствами приемника излучения (см. разделы 9.7.3.1 и 9.7.3.2), то при помощи уравнения (9.36a) можно по закону из-

лучения Планка (см. уравнение 9.8) по энергетическим яркостям  $L$  и  $L_u$  определить температуры  $T$  и  $T_u$ . В этом случае получим выражение для  $L_A$ , по которому в свою очередь можно определить температуру  $t_A$ , измеряемую пирометром [9.16]:

$$L_A = \int_0^{\infty} \frac{c_1 s(\lambda) d\lambda}{\Omega_0 \pi \lambda^5 (e^{c_2/\lambda T_A} - 1)}. \quad (9.36б)$$

Для яркостного пирометра зависимость между температурами действительной  $T$  и измеряемой (условной)  $T_A$ , с одной стороны, и температурой окружающей среды  $T_u$ , с другой, имеет следующий вид:

$$\frac{1}{T} = -\frac{\lambda}{c_2} \ln [e^{-c_2/\lambda T_A} - (1 - \epsilon) e^{-c_2/\lambda T_u}] + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon. \quad (9.36в)$$

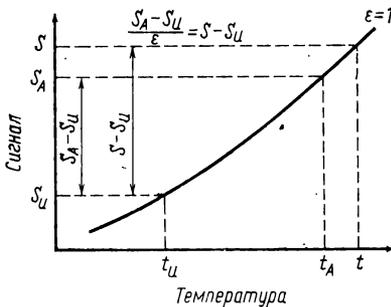


Рис. 9.16. Определение действительной температуры объекта  $t$  при известном значении излучательной способности  $\epsilon$  по измеренной пирометром условной температуре  $t_A$

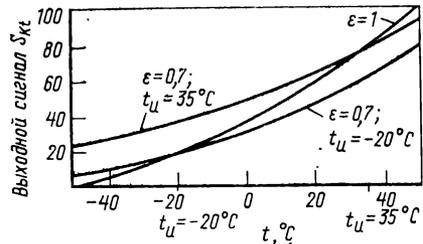


Рис. 9.17. Влияние температуры окружающей среды на погрешность измерения: диапазон измеряемых температур  $(-50) - (+50)^\circ\text{C}$ ; окружающая температура  $t_u = 35$  и  $-20^\circ\text{C}$ ; излучательная способность объекта измерения  $\epsilon = 1$  и  $0,7$

Это уравнение справедливо также и для пирометров частичного и полного излучения в узких областях длин волн  $\Delta\lambda$ , в которых относительная чувствительность пирометра  $s(\lambda)_{rel}$  остается постоянной. Тогда при помощи функций  $B(v)$  путем сложения отдельных членов аналогично уравнению (9.24) можно определить среднее значение излучательной способности  $\epsilon$  для  $T_A$  и действительную температуру  $T$ .

Для пирометров полного излучения, если учитывать влияние излучения окружающей среды, в частности стен, получим на основании (9.36а) следующее выражение (поскольку величина  $L_t$  пропорциональна  $T_t^4$ ):

$$T_A^4 = \epsilon T^4 + (1 - \epsilon) T_u^4, \quad (9.36г)$$

откуда

$$T = (T_A / \sqrt[4]{\epsilon t})^4 \sqrt[4]{1 - (1 - \epsilon) (T_u / T_A)^4}. \quad (9.36д)$$

Так как выходной сигнал пирометра излучения пропорционален энергетической яркости, то, по аналогии с уравнением (9.36а), получим

$$S_A = \epsilon S + (1 - \epsilon) S_u; \quad S = \frac{1}{\epsilon} (S_A - S_u) + S_u \quad \text{и} \quad S - S_u = \frac{S_A - S_u}{\epsilon}. \quad (9.36е)$$

При известной градуировочной характеристике пирометра можно из рис. 9.16 по показываемой им температуре  $t_A$  определить величину выходного сигнала  $S_A$ , а по измеренной тем или иным способом действительной температуре стен  $t_u$  — величину сигнала  $S_u$ . Если  $S_A - S_u$  разделить на  $\epsilon$ , то получим разность  $S - S_u$  и тем самым по градуировочной характеристике по величине  $S$  определим действительную температуру объекта  $t$ .

На рис. 9.17 показано, что при измерении температуры объекта, мало отличающейся от температуры окружающей среды ( $t_u$ ), влияние ее теплового излучения может вызвать значительную погрешность измерения, если излучательная способность объекта измерения будет меньше единицы [9.16].

### 9.6.1.2. ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СТЕН ПРИ НАГРЕВЕ ИЗДЕЛИЙ В ПЕЧАХ [9.15а, 6]

При измерении температур в промышленных условиях объектами измерения, как правило, являются изделия, находящиеся в печах для нагрева, отжига или нормализации или движущиеся внутри методических и проходных печей, стенки которых чаще всего имеют более высокую температуру, чем изделия. Излучение стен печи отражается нагреваемым изделием и попадает таким образом в объектив пирометра. Это дополнительное излучение тем больше, чем меньше излучательная способность объекта измерения. Лишь в случае черного излучения объекта такое стороннее излучение не влияет на показания пирометра излучения. При температуре стен печи, например  $t_u = 1100^\circ\text{C}$ , пирометр, согласно рис. 9.18, покажет сильно завышенную температуру, если нагреваемое изделие помещают в печь холодным. Даже при высоком значении излучательной способности поверхности нагреваемого изделия ( $\epsilon = 0,95$ ) пирометр с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой покажет сразу же  $550^\circ\text{C}$  при действительной температуре помещаемого в печь изделия  $20^\circ\text{C}$ .

У пирометров с меньшими характеристическими длинами волн, например у пирометра с кремниевым фотоэлементом, такого рода погрешность измерения из-за более крутой характеристики пирометра значительно больше, чем у линзовых пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения. С повышением температуры изделия эта погрешность уменьшается и исчезает полностью при достижении изделием температуры стен печи, значение  $\epsilon_u$  которых обычно близко к единице. Если температура нагреваемого изделия выше температуры стен печи, как, например, в случае медленного охлаждения изделия вместе с печью, погрешность измерения при небольших различиях в температуре будет значительно меньше, чем если бы изделие охлаждалось на открытом воздухе (при  $20^\circ\text{C}$ ). Корректировка показаний пирометра на излучательную способность при измерении температуры изделий в печи практически вряд ли целесообразна.

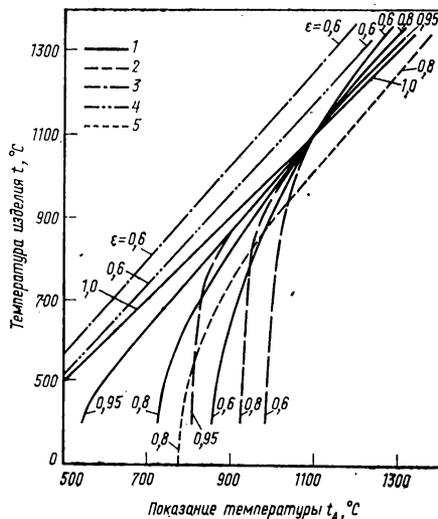


Рис. 9.18. Измерение температуры изделия в печи при помощи пирометров частичного излучения, в частности пирометра с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой (Ардометр) и пирометра с кремниевым фотоэлементом (Ардофот):

1, 2 — температура стен печи  $1100^\circ\text{C}$  (1 — Ардофот; 2 — Ардометр); 3, 4 — то же,  $20^\circ\text{C}$  (3 — Ардофот, 4 — Ардометр); 5 — Ардометр при корректировке на  $\epsilon = 0,8$

Для определения влияния излучения стен печи на результаты измерения температуры нагреваемого изделия действительны те же зависимости, что и для определения влияния температуры окружающей среды при измерении низких температур. Пользоваться здесь следует прежде всего уравнениями (9.36а) и (9.36б). Из рис. 9.16а видно, что температуру  $t_d$  при различных температурах стен печи  $t_u$  определяют в зависимости от  $\epsilon$ .

Для пирометров спектрального отношения выходной сигнал пирометра  $S_{rA}$  также определяют из отношения энергетических яркостей при двух использованных участках длин волн:

$$S_{rA} = \frac{L_{A1}}{L_{A2}} = \frac{\epsilon_1 L_{11} + (1 - \epsilon_1) L_{u1}}{\epsilon_2 L_{22} + (1 - \epsilon_2) L_{u2}} \quad (9.36ж)$$

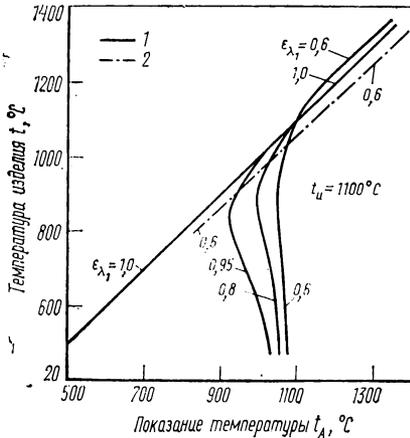


Рис. 9.19. Измерение температуры изделия в печи при помощи пирометра спектрального отношения с кремниевыми фотозлементом (Ардокол):

1 — при температуре стен печи 1100°С;  
 2 — то же, 20°С;  $t_u$  — температура стен печи

энергетических яркостей нагреваемого изделия и отраженного им излучения стен путем образования частного от деления значений обеих энергетических яркостей для двух длин волн. Вначале пирометр воспринимает практически лишь отраженное поверхностью изделия излучение стен печи, т. е. измеряет температуру стен. С увеличением степени нагрева изделия доля излучения стен печи в сумме обоих излучений уменьшается, поскольку энергетическая яркость изделия непрерывно возрастает. Наконец, после достижения какого-то минимума показания температуры снова возрастают. Отсюда следует, что для обоих типов пирометров погрешности измерения при разности температур между стенками печи и изделием более 150 К могут быть значительными и трудно корректируемыми. В этом случае надо исключить влияние излучения стен путем, например, визирования пирометра на изделие через вставляемые в печь визирные трубы, которые должны быть подведены непосредственно к самому изделию. При большой разности температур визирные трубы необходимо нагревать примерно до температуры изделия при помощи автоматического регулятора, измеряющего разность между температурой изделия и температурой визирной трубы.

## 9.6.2. ВЛИЯНИЕ ОКАЛИНЫ НА ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ И ПРОКАТА

Когда объект измерения, например раскаленные слитки или листы в прокатных цехах, покрыты окалиной не полностью, то открытые места охлаждаются значительно быстрее, чем закрытые. Поэтому регистрируемая яркостным пиро-

метром температура будет тем меньше, чем больше различие между температурами самого изделия и окалины и чем больше окалины покрывает поверхность изделия. При измерении температуры пирометрами спектрального отношения наблюдаемая погрешность измерения меньше. При очень толстом слое окалины пирометр спектрального отношения покажет даже правильную температуру, поскольку в этом случае энергетическая яркость более холодной окалины весьма незначительно влияет на результат измерения.

Например, если 75% поверхности объекта имеет температуру  $t_1$ , а 25% — из-за наличия окалины — соответственно  $t_2$ , то смешанные энергетические яркости для различных температур  $t_1$  объекта составят  $L_{t_1} \cdot 0,75 + L_{t_2} \cdot 0,25$ , откуда затем уже можно определить показываемую пирометром температуру (рис. 9.20).

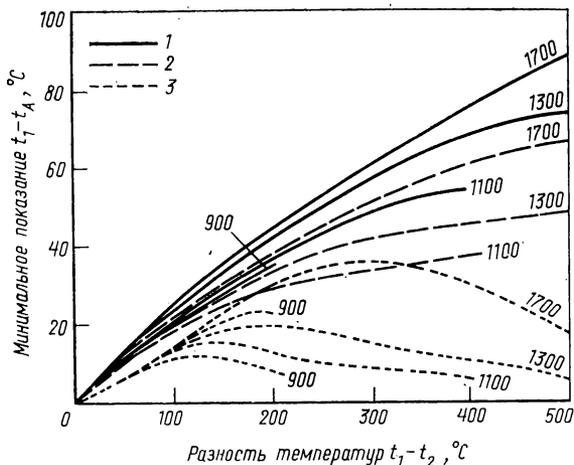


Рис. 9.20. Влияние неравномерной температуры поверхности изделия на измеряемые условные температуры  $t_A$  различных пирометров. Примерно 75% площади поверхности изделия имеет повышенную температуру  $t_1$ , 25% — пониженную температуру  $t_2$ . Типы пирометров те же, что на рис. 9.16 -- 9.19:

1 — Ардометр; 2 — Ардофот; 3 — Ардокол

У яркостных пирометров занижение показаний ( $t_1 - t_A$ ) непрерывно возрастает с увеличением разности температур ( $t_1 - t_2$ ) между свободной от окалины и покрытой окалиной частями поверхности изделия. Занижение показаний у пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения больше, чем у пирометров с кремниевыми фотоэлементами. У пирометров спектрального отношения, например с кремниевыми фотоэлементами, погрешность измерения наименьшая. Как и следовало ожидать, с увеличением разности температур ( $t_1 - t_2$ ) эта погрешность вначале возрастает, а по достижении максимума затем непрерывно уменьшается. С увеличением площади окалины, покрывающей поверхность изделия, величина занижения показаний увеличивается. Отсюда становится понятным, почему при измерении яркостным пирометром (с исчезающей нитью) температуры покрытых окалиной слитков на подводящем ролланге блюминга были получены значительно более низкие, чем измеренные пирометром спектрального отношения с кремниевыми фотоэлементами. В свою очередь температура, измеренная пирометром спектрального отношения, была несколько ниже температуры, измеренной контактным пирометром. Таким образом, при непрерывном измерении температуры поверхности блюмов и слябов наиболее точную максимальную температуру показывает пирометр спектрального отношения при несплошности слоя окалины [9.15 а, б].

### 9.6.3. ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СРЕДЫ

Если в среде между объектом измерения и пирометром содержатся пыль, пары воды или капельная влага, поглощающие излучение в рабочей области спектра пирометра, то все энергетические пирометры покажут заниженную температуру. В отличие от этого показания пирометра спектрального отношения не будут искажены, если коэффициент пропускания такой промежуточной среды в рабочих областях спектра пирометра не зависит от длины волны [9.15а, 9.15б]. Пыль искажает показания пирометра в тех случаях, когда размеры пылинки меньше эффективных длин волн пирометра (например, дым сигареты). Поскольку частицы с крупностью менее 0,75 мкм в цементной пыли содержится всего около 1%, она не оказывает влияния на показания пирометра [9.17]. Твердые частицы, например окисляющиеся брызги металла, образующиеся при продувке стали кислородом, или размягчение кирпичной футеровки в мартеновских печах, ведущее к образованию настывей, частично перекрывающих отверстие визирной трубы пирометра спектрального отношения, не влияют на результаты измерения.

При конденсации водяных паров, как и в случае пыли, могут возникнуть погрешности измерения из-за зависящего от длины волны рассеяния излучения. В случае применения кремниевых фотоэлементов в качестве приемников излучения сильные колебания размеров указанных частиц вызывают разброс показаний, который для яркостных пирометров лежит в пределах от 0 до 25 К и для пирометров спектрального отношения — от 0 до 10 К.

Если в среде между изделием и пирометром содержатся пары воды или двуокись углерода, то на результаты измерения могут оказать влияние их полосы поглощения. Пары воды имеют слабые полосы поглощения при длине волны 0,9 и 1,15 мкм, несколько более сильные при 1,4 и 1,8 мкм и ярко выраженные при длинах волн выше 2,2 мкм с максимумом при 2,7 мкм. Полосы поглощения двуокиси углерода при длине волны 1,4 и 1,6 мкм довольно слабы и усиливаются при 2,4—3 мкм. Поэтому в случае пирометров полного и частичного излучения с термоэлектрическими приемниками излучения надо учитывать возможные погрешности измерения. Часто, однако, при измерениях температуры в промышленных печах влияние содержания в печной атмосфере паров воды переоценивают. Поскольку температура печных газов отличается от температуры изделия лишь на несколько сот градусов, погрешность измерения при использовании пирометров полного излучения, как правило, незначительна (слой чистого перегретого пара толщиной 1 м соответствует примерно десятиметровому слою газа или воздуха с содержанием 10% паров воды. Даже в этом случае излучательная способность  $\epsilon$  составляет еще 0,71). Содержащие двуокись углерода печные газы почти не влияют на показания пирометра с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой. На показания пирометра с кремниевым фотоэлементом не влияет ни содержание двуокиси углерода, ни содержание водяных паров.

Погрешности измерения возрастают, если между объектом и пирометром находятся слои или капли воды. Слой воды толщиной в 1 мм уменьшает показания пирометра с термоэлектрическим приемником излучения и стеклянной линзой при температуре объекта 1150° С примерно на 300 К, в то время как пирометр с кремниевым фотоэлементом изменяет показания лишь примерно на 10 К. Капли воды вследствие рассеяния излучения оказывают несколько другое воздействие. Показания пирометра частичного излучения с кремниевым фотоэлементом были на 76 К ниже действительной температуры объекта, а показания пирометра спектрального отношения были правильными. В полном соответствии со сказанным различие в показаниях пирометра частичного излучения и пирометра спектрального отношения, установленных на прокатном стане, достигает из-за брызг воды между клетями 50 К.

Если необходимо определить температуру газов, твердых частиц или частично прозрачных синтетических материалов, надо использовать пирометры, чувствительные для таких диапазонов длин волн, в которых объект измерения имеет сильно излучающие полосы (см. 9.9.7).

## 9.7. КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

При помощи энергетических пирометров излучения температуру определяют непосредственно по спектральной, частичной или общей энергетической яркости объекта измерения или сравнением энергетических яркостей объекта измерения и эталонного излучателя. Сравнение энергетических яркостей может осуществляться автоматически при помощи приемников излучения или, если измерение проводится в видимой области спектра, субъективно, т. е. при помощи глаза наблюдателя.

### 9.7.1. СУБЪЕКТИВНЫЕ (ОПТИЧЕСКИЕ) ПИРОМЕТРЫ СРАВНЕНИЯ

При помощи обычных пирометров с субъективным сравнением энергетических яркостей яркость объекта измерения определяют в такой узкой области спектра, что подобные пирометры можно назвать квазимонохроматическими пирометрами [9.1—9.4; 9.18].

#### 9.7.1.1. КОНСТРУКЦИЯ

Полутенеовой пирометр Ваннера [9.19] представляет собой видоизмененный поляризационный спектрофотометр Кенига—Мартенса, приспособленный для измерения температуры. Излучения объекта измерения и эталонной лампы с поддерживаемой при постоянной температуре нитью накаливания разлагаются в спектр призмой. При помощи линз, призмы и диафрагм в плоскости щели окуляра создаются два расположенных рядом и поляризованных под прямым углом друг к другу изображения красной линии водорода ( $\lambda = 0,656$  мкм). Фотометрическое выравнивание обеих энергетических яркостей осуществляют при помощи призмы Волластона и Николя таким образом, чтобы обе половины поля зрения были приведены к одной яркости. По углу поворота  $\alpha$  призмы Николя и известной температуре  $t_2$  эталонного излучателя определяют яркостную температуру  $t_s$  объекта измерения:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_2} - \frac{2}{c_2} \ln \operatorname{tg} \alpha. \quad (9.37)$$

Температурная шкала этого пирометра в области высоких температур сильно сжата.

При измерении температур металлов под углом больше  $20^\circ$  к нормали поляризационные пирометры нельзя применять, так как с увеличением этого угла поляризации излучения металлов сильно возрастает.

#### 9.7.1.1.1. Яркостной оптический пирометр с исчезающей нитью

Наиболее распространенным и простым в обслуживании яркостным пирометром, используемым в промышленности и лабораториях, является яркостной оптический пирометр. В пирометре Гольборна—Курльбаума (1901) изображение объекта измерения создается в плоскости нити накаливания эталонной лампы (рис. 9.21) путем вращения тубуса объектива. Вначале окуляром получают резкое изображение нити, а затем протекающий через лампу ток изменяют до тех пор, пока середина нити накаливания не исчезнет на фоне изображения объекта измерения. В этом случае обе энергетические яркости становятся равными между собой в области спектра, определяемой спектральной характеристикой чувствительности глаза наблюдателя и характеристикой пропускания светофильтра, расположенного между окуляром и лампой. Таким образом, ток, протекающий через нить накаливания эталонной лампы, является мерой яркостной температуры  $t_s$  объекта

измерения. Зависимость между током лампы и яркостной температурой, соответствующей середине нити накаливания, определяют путем градуировки пирометра по черному телу. Шкала такого пирометра имеет экспоненциальный характер.

Поскольку еще до начала накаливания нити протекающий через лампу ток достаточно велик, обычно для измерения тока лампы применяют амперметры с подавленным нулем. При таком способе измерения переходные сопротивления в цепи эталонной лампы не влияют на результаты измерения, в то время как при измерении падения напряжения на нити накаливания переходное сопротивление, равное 0,10 Ом, влечет за собой погрешность в 10К. При измерении сопротивления нити накаливания или падения напряжения на нити накаливания шкала пирометра получается более близкой к линейной. При измерении сопротивления, например с помощью мостовой схемы, необходимо изменения сопротивления нити накаливания,

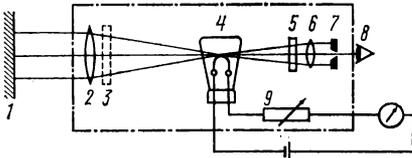


Рис. 9.21. Пирометр с исчезающей нитью: 1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — серое стекло (используется при измерении повышенных температур); 4 — лампа с нитью накаливания; 5 — цветной фильтр; 6 — окуляр; 7 — диафрагма; 8 — наблюдатель; 9 — переменное сопротивление (для изменения тока лампы)

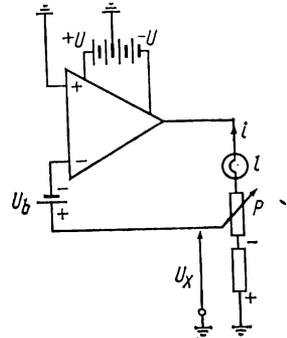


Рис. 9.22. Потенциометрическое измерение тока с операционным усилителем в дифференциальной схеме (мера температуры — положение скользящего контакта потенциометра  $P$ ):  $L$  — лампа с нитью накаливания;  $U_b$  — опорное напряжение;  $U_x$  — напряжение между нижним концом потенциометра  $P$  и землей

вызванные изменением температуры окружающей среды, компенсировать путем использования в мостовой схеме чувствительного к температуре сопротивления. Для точных измерений лучше всего использовать измерение тока потенциометрическим методом [9.22]. С этой целью используют операционный усилитель с дифференциальным входом в схеме с отрицательной обратной связью (рис. 9.22). При любом значении тока нити накаливания разность потенциалов на входе усилителя практически равна нулю, так как при перемещении движка потенциометра  $P$  выходной ток усилителя изменяется и падение напряжения  $U_x$  становится равным напряжению  $U_b$  источника эталонного напряжения. Вследствие этого положение движка потенциометра  $P$  служит мерой яркостной температуры объекта измерения. В качестве источника эталонного напряжения служит нормальный элемент Вестона ( $U = 1,019В \pm 0,1\%$ ) или электронный стабилизатор напряжения.

### 9.7.1.1.2. Пирометры с нейтральным клином

В пирометре с нейтральным клином [9.23] нить накаливания эталонной лампы имеет постоянную температуру. Для выравнивания яркостей служит нейтральный клин, проницаемость которого можно непрерывно изменять вращением независимо от длины волны (рис. 9.23). Положение нейтрального клина служит мерой измеряемой яркостной температуры  $t_s$ . Измерительный ток должен точно соответствовать заданной величине. Для практического применения эти пирометры выпускают в портативном исполнении. С этой целью все необходимые

детали, включая источник тока (обычно батарея сухих гальванических элементов или аккумулятор), размещают в одном корпусе. Показывающий стрелочный прибор носится отдельно от пирометра и снабжен лямкой для подвешивания с целью уменьшения веса пирометра и тем самым облегчения его визирования на объект измерения.

### 9.7.1.1.3. Эталонные лампы, оптика, светофильтры и редуцирующие элементы

Колба эталонной лампы выполняется конической, чтобы вследствие явления отражения не двоялось изображение ее нити накаливания. С этой целью лампу оснащают двумя слегка наклонными в направлении наблюдения торцовыми окошками. Вместо непосредственного визирования нити накаливания можно визировать освещаемую эталонной лампой полосу из матового стекла.

Для полного исчезновения нити накаливания на фоне изображения объекта измерения необходимо соблюдать определенные условия. Виньетирование излучения объекта измерения на нити приводит к тому, что ее края кажутся затемненными, а поляризация отраженного боковой поверхностью нити излучения объекта несколько повышает его яркость. Вследствие этого у краев нити наблюдаются светлые и темные полосы (эффект Фейрчайльда—Гувера) [9.24]. Для создания условий точного выравнивания яркости нити накаливания с яркостью объекта измерения угол раствора пирометра не может быть сколько-угодно большим. Оптимальные условия обеспечиваются при диаметре нити 0,05 мм и относительном отверстии окуляра пирометра 1 : 25. Тем самым при фокусном расстоянии окуляра около 50 мм диаметр выходного зрачка составит 2 мм. В этом случае, чтобы при отчетливой видимости глазом обеспечить еще удовлетворительную разрешающую способность (около 0,1 мм), увеличение должно быть примерно шестикратным.

При больших расстояниях до объекта измерения относительное отверстие 1 : 12,5 объектива обеспечивается еще очковыми стеклами. Общее увеличение пирометра в этом случае определяется соотношением фокусных расстояний объектива и окуляра. Если не требуется подробная картина распределения температуры объекта измерения, то условия компенсации можно соблюдать лишь приблизительно. В этом случае можно работать с большими диаметрами выходного зрачка, причем хорошие результаты измерения обеспечиваются даже при температурах 700—800° С. Компенсация может быть улучшена, если нить накаливания расширить в визируемой средней части или если ее излучение направить через стеклянный куб, частично покрытый серебром. В этом случае объект измерения предстает в виде освещенной поверхности, например в виде стрелки. Чтобы исключить влияние перепада температуры вследствие отвода тепла к местам крепления нити накаливания, ее необходимо выполнять достаточно длинной.

Окуляр прецизионного пирометра с нитью накаливания выполняется по Гюйгенсу. Окуляр состоит из двух плосковыпуклых линз с промежуточной диафрагмой для регулирования поля зрения. Кроме того, в тубусе окуляра имеется выходная диафрагма и обратная линза для поворота изображения объекта измерения в нормальное положение в целях облегчения визирования.

Цветной светофильтр (см. рис. 9.21 и 9.23) между линзой  $f$  и лампой  $d$  обеспечивает достаточно узкую для оптического яркостного пирометра спектральную область. Обычно применяют йенское красное стекло RG2, спектральная характеристика пропускания  $\tau(\lambda)$  которого при совмещении со спектральной характери-

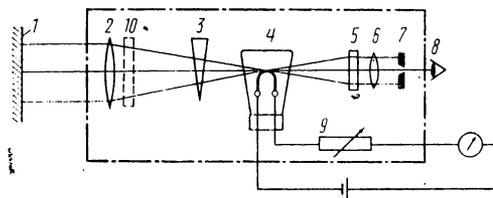


Рис. 9.23. Пирометр с нейтральным клином: 1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — нейтральный клин (для ослабления энергетической яркости вплоть до исчезновения изображения нити накаливания); 4 — лампа с нитью накаливания; 5 — цветной фильтр; 6 — окуляр; 7 — диафрагма; 8 — наблюдатель; 9 — переменное сопротивление (для установки заданного тока лампы); 10 — серое (нейтральное) стекло (для использования при измерении повышенных температур)

стикой чувствительности глаза  $V(\lambda)$  с максимумом около 0,555 мкм (рис. 9.24, а) ограничивает воспринимаемое глазом (пропускаемое) излучение. Эффективная длина волны такого пирометра составляет около  $0,655 \pm 0,01$  мкм. В соответствии с законом смещения Вина [см. уравнение (9.11)], эффективная длина волны с увеличением температуры смещается в область более коротких волн (рис. 9.24, б). Для наблюдателей, хорошо различающих цвет, это вызывает лишь весьма незначительную точность при измерении температуры нечерных излучателей, если пирометр проградуирован по черному телу [9.2, 9.4].

Несмотря на то что энергетические яркости при максимальной спектральной чувствительности глаза  $V(\lambda)$  расположены в зеленой области спектра, с использованием зеленых светофильтров можно измерить лишь температуры до  $1000^\circ\text{C}$ .

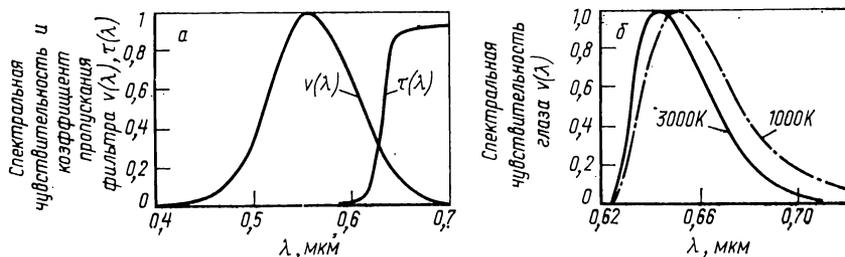


Рис. 9.24. Спектральная чувствительность человеческого глаза:

а —  $V(\lambda)$  вместе со спектральным коэффициентом пропускания  $\tau(\lambda)$  красного фильтра Шотта RG2 толщиной 4 мм; б —  $V(\lambda)$  за красным светофильтром RG2 толщиной 4 мм при энергетической яркости  $L_{\lambda S}$  черного тела, соответствующей 1000 и 3000 К

Это объясняется тем, что спектральные энергетические яркости в зеленой области видимой части спектра значительно меньше, чем в красной. Но температуры  $600\text{--}800^\circ\text{C}$  можно еще измерить без применения цветных светофильтров, поскольку при этих температурах излучение практически полностью приходится на краевую область видимой части спектра. С увеличением температуры воспринимаемая глазом яркость резко возрастает. Чтобы обеспечить возможность измерения повышенных температур, применяют редуцирование излучения, как, например, при помощи нейтральных поглощающих стекол или перемещаемых нейтральных поглощающих клиньев. Для более точных лабораторных измерений применяют также вращающиеся секторы с переменной скважностью (регулируемые обтюраторы). Таким способом измерение высокой температуры  $t'$  сводится к измерению более низкой, эквивалентной ей температуры  $t$ . Подобный метод измерения необходим также по той причине, что при измерении температуры на основе использования токоизмерительной аппаратуры температура нити накаливания не должна превышать  $1500^\circ\text{C}$ , поскольку в противном случае может измениться взаимосвязь температура — ток. Кроме того, ошибки возможны также вследствие сильного изменения коэффициента пропускания нейтральных стекол в красной области видимой части спектра.

#### 9.7.1.1.4. Пирометрическое редуцирование

Значение ослабления энергетической яркости источника излучения, т. е. коэффициент пропускания  $\tau(\lambda)$  поглотителя, можно определить из уравнения (9.14) по двум значениям температуры черного излучателя, измеренным при помощи оптического яркостного пирометра без поглотителя ( $T_1$ ) и с поглотителем ( $T_2$ ):

$$-\ln \frac{L_2}{L_1} = -\ln \tau(\lambda) = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad \text{или} \quad -\frac{\lambda}{c_2} \ln \tau(\lambda) = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = A. \quad (9.38)$$

Величина  $A$  характеризует пирометрическое редуцирование (ослабление) данного нейтрального стекла [9.25].

Для данного нейтрального стекла шкалу пирометра определяют из соотношения  $1/T' = 1/T = A$ , где  $T'$  — значения температур, которые следует отнести к температурам  $T$  шкалы пирометра без нейтрального стекла. Требуемую толщину нейтрального стекла для заданного расширения области измерения определяют из этого же соотношения и линейной зависимости величины  $A$  от толщины стекла.

Значение величины  $A$  необходимо определять очень точно, поскольку иначе могут возникнуть значительные погрешности измерения, которые возрастают с увеличением толщины нейтрального стекла. Точно так же необходимо учитывать влияние смещения эффективной длины волны на общий коэффициент пропускания  $\tau(\lambda)$ , который складывается из  $\tau(\lambda)$  дымчатого и красного стекла и относительной чувствительности глаза  $V(\lambda)$ . В области очень высоких температур необходимо также рассчитанную с помощью  $A$  температуру  $T'$  откорректировать на величину  $\Delta T$  из-за различия между формулой Вина и уравнением Планка. При 3600, 4400, 5000 и 6000°С поправка составляет —5, —10, —20 и —55 К соответственно. В принципе пирометры сравнения можно использовать с теми цветными светофильтрами и нейтральными стеклами, с которыми они совместно градуировались.

#### 9.7.1.1.5. Микропирометр и пирометр с телеобъективом

Для измерения температуры очень малых объектов, например нитей накаливания, применяют микропирометры с оптикой примерно 20-кратного увеличения [9.21, 9.24]. При расстоянии между объектом измерения и объективом пирометра, равном 100 мм, поле наблюдения еще заполняется объектом измерения с площадью 3 мм<sup>2</sup>, что позволяет измерять температуру объектов, имеющих диаметр 0,03 мм. В случае, если малые объекты можно визировать лишь издали, то применяют пирометры с телеобъективами. При этом минимальное расстояние между излучателем и пирометром составляет около 3 м. Если объект измерения нельзя визировать непосредственно, то излучение отклоняют на 90° при помощи полностью отражающей призмы. В этом случае надо учитывать погрешности, возникающие вследствие абсорбции излучения в призме.

При помощи обычных яркостных пирометров и пирометров с нейтральным клином можно измерять температуру объекта диаметром 3 мм или полосы шириной 1 мм на расстоянии около 400 мм.

Для яркостных пирометров без нейтральных стекол диапазон измеряемых температур находится в пределах 800—1500°С, для пирометров с нейтральным клином — в пределах 800—1800°С. Промышленные яркостные пирометры с нейтральными стеклами выпускают для измерения температур в пределах 200—3200°С. Диапазон измерения таких пирометров можно расширить до 6000°С.

#### 9.7.1.2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ, ПОГРЕШНОСТИ И ПРЕДЕЛЫ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ

При проверке визуальных пирометров — пирометров с исчезающей нитью и пирометров с серым клином — следует иметь в виду, что предельные погрешности обусловлены прежде всего пределами допустимой погрешности измерительных приборов. Кроме того, необходимо учитывать погрешности, вызванные достоверностью определения точки затвердевания золота, порогом контрастной чувствительности человеческого глаза, свойствами применяемой при градуировке эталонной лампы или температурной лампы с плоской нитью, а также смещением длины волны излучения. Исходя из этих данных, можно рассчитать погрешность измерения и статистический предел допустимой погрешности этих пирометров (табл. 9.6) [9.4; 9.26—9.28].

Предельная погрешность  $U$ , максимальная погрешность  $\sum f$  и статистический предел допустимой погрешности  $\sqrt{\sum f^2}$   
 визуальных ярких пирометров, К

Температура, °С	А. Предельная погрешность восприятия точки зорота 0,5 К			Б. Порог контрастной чувствительности глаза: а — для прецизионных пирометров; б — для технических пирометров с исчезающей нитью; в — для пирометров с нейтральным клином (900° С)			В. Предел допустимой погрешности измерения тока для пирометров с исчезающей нитью: а — класс 0,05; б — класс 0,2; в — класс 0,5; г — класс 0,2 (при 900° С)			Г. Погрешность градуировки: а — для прецизионных пирометров; б — для технических пирометров с исчезающей нитью; в — для пирометров с нейтральным клином			Д. Отклонение эффективной длины волны лампы свольфрамовой лентой $\lambda_e = 0,655$ мкм на 0,01 мкм
	а	б	в	а	б	в	г	а	б	в			
800	0,5	1,4	0,9	1,7	6,7	16,7	2,7	3,3	3,3	б	в	1,0	
1000	0,5	0,7	1,0	0,8	3,3	8,3	3,3	1,8	4,7	б	в	1,2	
1200	0,6	0,4	1,4	0,5	2,1	5,2	4,4	1,3	4,6	а	б	1,3	
1400	0,7	0,5	1,7	0,4	1,6	4,0	5,5	1,4	4,6	а	б	1,5	
1600	0,8	0,7	2,2	0,9	3,6	9,1	7,0	1,9	6,2	а	б	2,0	
1800	1,0	0,8	2,7	0,8	3,1	7,7	8,6	2,1	6,6	а	б	3,0	
2000	1,1	1,2	3,3	0,7	2,6	6,6	10,3	2,8	6,6	а	б	3,9	

Е. Погрешности яркостных оптических пирометров $\sum f$ и $\sqrt{\sum f^2}$											
а. Прецизионные пирометры — вторичные эталоны		б. Технические пирометры с исчезающей нитью				в. Пирометры с нейтральным клином					
$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	класс 0,05	класс 0,2	класс 0,05	класс 0,2	класс 0,5	$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	
800	6,5	2,8	7,2	11,2	3,7	14,4	9,3	24,4	12,1	6,9 (при 900° С)	
1000	3,8	1,6	3,6	6,5	2,1	8,7	5,8	13,7	11,0	6,6	
1200	2,8	1,2	2,3	5,3	1,8	8,7	5,2	10,8	13,4	7,2	
1400	3,2	1,3	2,0	6,0	2,0	7,5	5,1	9,9	14,8	8,0	
1600	4,5	1,9	3,9	8,5	2,8	11,4	7,4	16,9	18,4	10,1	
1800	5,0	2,1	3,5	9,5	3,3	11,7	7,6	14,3	20,9	11,6	
2000	6,9	2,7	3,6	11,9	4,0	11,6	7,5	15,6	23,2	13,0	

### 9.7.1.2.1. Предельная погрешность определения температуры затвердевания золота

Первичные эталонные пирометры градуируют в таких институтах, как Федеральный физико-технический институт в Брауншвейге (РТВ) в соответствии с международной температурной шкалой на основании известного отношения энергетических яркостей излучения при различных температурах к энергетической яркости при температуре затвердевания золота [уравнение (9.14)].

Для этого яркость эталонной температурной лампы, соответствующая яркости черного тела с температурой  $T_s$ , ослабляется с помощью вращающегося секторного диска, расположенного перед пирометром, до яркости черного тела с температурой, равной температуре затвердевания золота  $T_{Au}$ .

Зная коэффициент пропускания  $\tau$  вращающегося секторного диска, значение  $T_s$  вычисляют из соотношения

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_{Au}} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \tau (\lambda). \quad (9.38a)$$

Таким образом получают характеристику *температура — ток* эталонного пирометра (см. раздел 9.8).

Температура затвердевания золота определяется с недостоверностью 0,3—0,5К. При использовании фотоэлектрических пирометров эту недостоверность можно снизить до 0,1К. Такая недостоверность определения температуры затвердевания золота приводит к большей недостоверности при более высоких температурах. Если при 1000°С она равна 0,5К, то при 2000°С возрастает до 1,1К (табл. 9.6, столбец А).

### 9.7.1.2.2. Свойства и пределы допустимой погрешности пирометрических ламп с вольфрамовой лентой

Для градуировки яркостных пирометров при  $\lambda = 0,655$  мкм с помощью пирометрических (температурных) ламп с вольфрамовыми лентами необходимо точно знать свойства последних. Эти лампы могут быть использованы или в качестве эталонных излучателей, или в качестве рабочих излучателей для сравнительных испытаний [9.26 и 9.29].

Требование постоянства энергетической яркости такого рабочего излучателя, т. е. тока накала лампы, должно точно выполняться только в течение времени между измерением с помощью эталонного пирометра и измерением поверяемым пирометром. Визирование необходимо осуществлять в одном и том же направлении, в одно и то же место ленты. Для газонаполненных температурных ламп имеет значение не только направление визирования, но и положение лампы — горизонтальное или вертикальное. При использовании ламп в качестве поверочных эталонов температуры на лампах с вольфрамовой лентой может быть достигнута высокая точность воспроизведения, если отсутствуют погрешности, связанные с многократным поглощением излучения в промежуточных элементах. При этом необходимо учитывать следующие особенности температурных ламп:

А. Температура снижается как вдоль, так и поперек оси вольфрамовой ленты вследствие отвода тепла через держатели, искажения температурного поля из-за наличия кромок ленты и влияния конвекции.

Если снижение температуры не должно превышать  $\pm 1$ К, то область визирования при горизонтальном расположении ленты вакуумной лампы должна иметь размеры 1,6—3,8 мм в продольном направлении и около 1,1 мм в поперечном. При вертикальном расположении ленты в газонаполненной лампе соответствующие значения равны 2—3 и 0,8—1 мм. При прецизионных измерениях и сравнительных измерениях с ленточными температурными лампами погрешность, вызванную указанными причинами, можно считать равной  $\pm 0,8$ К; при измерениях с температурными лампами, используемыми в промышленных лабораториях в качестве вторичных эталонов,  $\pm 1,2$ К.

Б. В вакуумных лампах при температурах выше 1500°С наблюдаются временные колебания температуры около 0,5 К.

В. Погрешность возникает, если изменяется эффективная длина волны пирометра сравнения или температурной лампы вследствие различия эмиссионных свойств на поверхности ленты. По яркостным температурам  $t_{s_1}$  и  $t_{s_2}$ , измеренным при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , можно определить цветовую температуру  $T_v$  вольфрамовой нити или ленты:

$$\frac{1}{T_{s_2}} = \frac{1}{T_{s_1}} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \left( \frac{1}{T_{s_1}} - \frac{1}{T_v} \right). \quad (9.39)$$

При  $\lambda = 0,655$  мкм цветовая температура  $T_v$  изменяется от  $T_v = 1373$  К при  $T_s = 1300$  К до  $T_v = 2561$  К при  $T_s = 2300$  К. Отсюда можно определить погрешность измерения при изменении эффективной длины волны  $(\lambda_2 - \lambda_1)$  (табл. 9.6, Е, при  $\Delta\lambda = 0,01$  мкм) [9.30а].

Г. Газонаполненные температурные лампы вследствие влияния конвекции чувствительны к углу наклона. При горизонтальном расположении ленты и температуре 1600°С изменение яркостной температуры можно считать равным 4К на каждый градус отклонения от горизонтали; при вертикальном — не более 0,3 К на градус наклона. С повышением температуры чувствительность к наклону уменьшается.

Д. Дополнительная погрешность измерения возникает из-за влияния направления визирования ленты лампы через пирометр. Она обусловлена отражением или поляризационными эффектами. Поэтому рекомендуется обозначать направление визирования с помощью стрелки на задней стенке колбы температурной лампы.

Е. Изменение направления тока через нить или ленту лампы может вызывать погрешность измерения из-за смещения положения максимума температуры у вакуумных ламп при 850°С до 1,2 К, у газонаполненных ламп — до 3 К. Выше 1100 или 1400°С эта погрешность не возникает.

Ж. При измерении с помощью температурных ламп с нитью или лентой необходимо учитывать влияние изменения температуры окружающей среды. Это влияние возрастает с понижением температуры измеряемого объекта. Для газонаполненных ламп при температуре излучателя 1000°С оно вызывает погрешность до 0,3 К, а при 800°С — до 1 К на каждый 1К изменения температуры окружающей среды; для вакуумных ламп эта погрешность при 800°С составляет всего 0,15 К.

У прецизионных или технических пирометров с исчезающей нитью и измерением силы тока эта погрешность не превышает соответственно 0,02 и 0,35К при 1000°С на 1К изменения температуры окружающей среды и 0,08 и 0,9 К при 800°С. Поэтому при измерении низких температур с помощью газонаполненных температурных ламп необходимо обращать внимание на поддержание предписанной температуры окружающей среды и на вертикальное в большинстве случаев положение ленты лампы; влияние окружающей температуры необходимо учитывать и при измерении тока визуального пирометра.

При измерении сопротивления нити лампы или падения напряжения на ней влиянием температуры окружающей среды можно пренебречь.

Исходя из этих свойств температурных ламп с вольфрамовой лентой в диапазоне температур 650—1500°С, а при невысоких требованиях к точности и до 1750°С, следует использовать вакуумные лампы с горизонтальным расположением ленты. Газонаполненные лампы с вертикальным расположением ленты следует применять в диапазоне температур 1500—2100°С; при невысоких требованиях к точности их можно применять при более низких температурах (до 800°С). Вольфрамовые трубчатые лампы с почти черным излучающим отверстием диаметром 1 мм можно применять при очень высоких требованиях к точности. Вакуумные лампы с трубчатым телом накала могут быть использованы для температур до 1800°С, газонаполненные — до 2750°С [9.30; 9.30а, 9.30б].

Если ток температурной лампы устанавливается с помощью амперметра класса 0,2, то при точности установки 0,1% погрешность градуировки поверяемого пирометра равна 4,3—1,6 К в зависимости от температуры ленты. При более

точном измерении тока эта погрешность может быть уменьшена. Погрешность от установления тока вместе с погрешностью измерения, обусловленной описанными выше свойствами температурных ламп, составляет погрешность градуировки, значения которой приведены в табл. 9.6 (Г).

### 9.7.1.2.3. Погрешности, связанные с измерением силы тока и порогом контрастной чувствительности человеческого глаза. Погрешности градуировки и отклонения $\lambda_e$

Погрешности, которые могут возникать в связи с измерением тока в оптическом пирометре с исчезающей нитью, приведены в табл. 9.6 (В). Для поверки пирометров необходимо использовать измерительные приборы возможно более высокого класса точности.

Необходимо также учитывать погрешность, обусловленную контрастной чувствительностью человеческого глаза. Погрешность уравнивания яркостей при температуре  $800^\circ\text{C}$  составляет примерно 1,5—2,5% от яркости излучения, при  $1000^\circ\text{C}$  — 0,5—1%. Связанная с этим погрешность определения температуры может быть получена дифференцированием выражения (9.14)

$$dT = \frac{\lambda}{c_2} T^2 \frac{\Delta L \lambda}{L \lambda}. \quad (9.40)$$

Если при измерении высоких температур используется поглощающий фильтр, то вносимая при этом погрешность может быть вычислена по уравнению (9.38).

Первичный эталонный пирометр, входящий в состав государственного первичного эталона температуры, является средством воспроизведения действующей международной температурной шкалы в государственных метрологических службах, таких как Федеральный физико-технический институт (РТВ), где этот пирометр используется в первую очередь как первичный пирометр для градуировки и поверки вторичных эталонов. В качестве последних используются яркостные пирометры, главным образом оптические пирометры с исчезающей нитью, и температурные лампы с вольфрамовой лентой. Вторичные эталоны используются изготовителями пирометров для градуировки и поверки третичных эталонов, которые затем используются для градуировки изготавливаемых технических пирометров и для периодической их поверки на местах применения, где к измерению температуры предъявляются повышенные требования. Вторичные эталоны подлежат периодической поверке в РТВ или его территориальных отделениях, а третичные эталоны — в лабораториях изготовителей технических пирометров.

Если для поверки третичных эталонов используются вторичные эталоны (оптические пирометры или температурные лампы), не аттестованные службами РТВ, то погрешность измерения будет несколько больше вследствие погрешности изменения тока температурной лампы или переноса погрешности, связанной с порогом контрастной чувствительности глаза. В этом случае целесообразно для поверки технических пирометров использовать имеющиеся поверенные технические пирометры, отградуированные с помощью амперметров класса 0,05 в соответствии с табл. 9.6, Е (б). Из этой же таблицы видно влияние ослабляющих фильтров на значения погрешности измерения при температурах выше  $1500^\circ\text{C}$ .

В табл. 9.6, А—Г приведены погрешности измерения, обусловленные неопределенностью определения точки затвердевания золота, погрешностью порога контрастной чувствительности глаза, погрешностью градуировки температурных ламп с вольфрамовой лентой и пределом допустимой погрешности токоизмерительных приборов, если градуировка проводится путем сличения с эталонным пирометром и эталонной температурной лампой. На основании этих значений для пирометров с исчезающей нитью и с нейтральным клином дана максимальная ожидаемая погрешность  $\Sigma f$  и статистический предел допустимой погрешности  $\sqrt{\Sigma f^2}$ . Кроме того, приведены значения погрешности, возникающей из-за небольших различий в эффективной длине волны  $\lambda_{e1}$  эталонного пирометра или температурной лампы и поверяемого пирометра  $\lambda_{e2}$ .

При расчете погрешностей пирометров с нейтральным клином следует учитывать порог яркостной чувствительности глаза, составляющий не менее 1% от яркости нити накала с температурой 800 или 900° С. В отличие от пирометров с исчезающей нитью с повышением температуры объекта увеличивается погрешность, связанная с температурой нити накала и с классом прибора для измерения тока лампы. При более низкой температуре объекта погрешность несколько меньше.

#### 9.7.1.2.4. Допустимая погрешность яркостных оптических пирометров по OIML

По рекомендациям международной метрологической организации (OIML) [9.25] относительная погрешность пирометров с исчезающей нитью в различных диапазонах измерения при температуре окружающей среды  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  не должна превышать значений в процентах от диапазона измерения, указанных в табл. 9.7. Собственная (основная) погрешность измерительного прибора определяется как разность между измеренным значением и средним арифметическим ряда измерений, выполненных при соблюдении необходимых условий. Величина разброса показаний (дисперсия) определяется как разность между максимальным и минимальным показаниями прибора в серии измерений одного и того же образца с одной и той же температурой. Максимально допустимой погрешностью отдельного измерения считают погрешность, при которой вероятностью превышения этой погрешности 1— $P$  можно пренебречь (см. 1.2). Собственная погрешность эталонного пирометра должна быть не более  $\pm 4 \text{ K}$  в диапазоне  $700\text{—}1400^\circ \text{C}$  и не более  $\pm 8 \text{ K}$  в диапазоне  $1400\text{—}2000^\circ \text{C}$ .

Т а б л и ц а 9.7

Собственная погрешность и разброс показаний яркостных оптических пирометров с исчезающей нитью в зависимости от диапазона измерения \*

Диапазон измерения, °С	Максимально допустимая погрешность		Разброс показаний		Диапазон измерения, °С	Максимально допустимая погрешность		Разброс показаний	
	± %	К	± %	К		± %	К	± %	К
<i>Технические пирометры обычного типа</i>					<i>Пирометры повышенной точности</i>				
800—1400	1,5	21	1	14	800—1400	0,6	8,4	0,25	3,5
1400—2000	1,5	30	1	20	1400—2000	0,6	12	0,25	5
2000—3200	2,5	80	2	64	2000—3200	1,2	38	0,5	16
3200—6000	4,0	240	3	180	3200—6000	2,0	120	1,0	60

\* В % к верхнему пределу или в К.

Приведенные в табл. 9.7 значения собственных погрешностей больше указанных в табл. 9.6 статистических пределов допустимой погрешности  $\sqrt{\Sigma f^2}$ . Эти собственные погрешности примерно соответствуют гарантированным пределам допустимой погрешности  $G$  (см. 1.2) яркостных пирометров, указываемых изготовителями.

## 9.7.2. СУБЪЕКТИВНЫЕ ПИРОМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ЦВЕТОВЫЕ ПИРОМЕТРЫ)

Для определения условной температуры спектрального распределения (цветовой температуры)  $t_v$  можно использовать субъективные пирометры спектрального распределения. Для этого с помощью визуального яркостного пирометра (с исчезающей нитью) можно определить отношение яркостей в двух различных областях спектра, например в красной и зеленой, или сопоставить цветовое ощущение, которое возникает при смешении красного и зеленого цветов (цветовой пирометр сравнения).

С помощью визуальных пирометров определяют яркостную температуру  $t_{s_1}$  в красной и  $t_{s_2}$  в зеленой областях спектра. Исходя из этих величин можно рассчитать или определить по кривым или номограммам условную температуру спектрального отношения (цветовую температуру)  $t_r$  [9.4]. Погрешность измерения

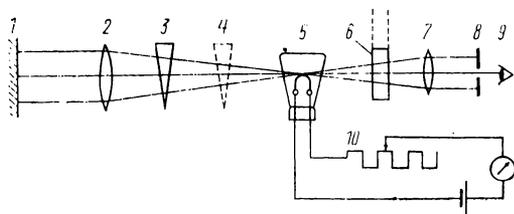


Рис. 9.25. Пирометр спектрального отношения с исчезающей нитью:

1 — излучатель; 2 — объектив; 3 — нейтральный клин для измерения яркостной температуры; 4 — переключаемый серый или красный оптический клин; 5 — пирометрическая лампа; 6 — переключаемый красно-зеленый фильтр — окуляр; 7 — окуляр; 8 — диафрагма; 9 — наблюдатель; 10 — реостат для изменения тока накала лампы

при  $1600^\circ\text{C}$  равна 3,6 К при измерении прецизионным пирометром и может достигать 10 К при измерении техническим пирометром. Температуру  $t_r$  можно определить непосредственно с помощью визуального пирометра спектрального отношения Крова [9.31; ср. 9.32; DRP 741 510]. Используя спектроскоп с одной закрепленной призмой Никольса, уравнивают монохроматические яркости при длине волны  $\lambda_1$  путем изменения яркости образцового излучателя, а затем при помощи подвижной призмы Никольса уравнивают яркость при длине волны  $\lambda_2$ . Положение этой подвижной призмы и является мерой температуры спектрального отношения  $t_r$ . С помощью пирометра спектрального отношения с исчезающей нитью наряду с температурой  $t_r$  можно определить яркостную температуру  $t_s$  при одной из двух длин волн, если, в соответствии с рис. 9.25, при неизменной силе тока температурной лампы 5 предварительно с помощью серого клина 3 уравнивать монохроматическую яркость при длине волны  $\lambda_1$ . При постоянной яркости  $k_1$  температурной лампы 5 устанавливают положение  $\alpha_1$  серого клина так, что  $\alpha_1 = k_1/L(\lambda_1, T)$ .

Яркость излучения при длине волны  $\lambda_2$  после ослабления клином 3 будет равна  $L'(\lambda_2 T) = \alpha_1 L(\lambda_2, T)$ . Если теперь при помощи второго серого клина 4 произвести уравнивание монохроматической яркости при длине волны  $\lambda_2$  с яркостью температурной лампы  $k_2$ , то клин займет положение  $\alpha_2 = k_2/L'(\lambda_2, T)$  и из трех уравниваний получится  $\alpha_2 = KL(\lambda_1, T)/L(\lambda_2, T)$ .

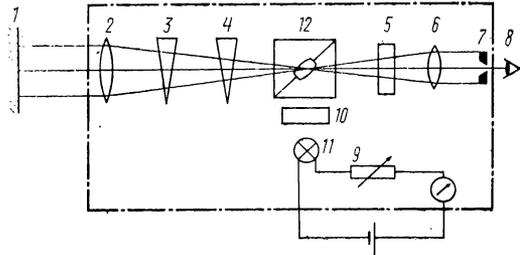
Тем самым положение клина  $\alpha_2$  является мерой температуры спектрального отношения  $t_r$ , в то время как положение клина  $\alpha_1$  дает яркостную температуру  $t_s$ . Конструкция пирометра позволяет переходить с одной длины волны на другую, не прерывая визуирования измеряемого объекта [9.32, 9.33].

Погрешность, связанная с излучательной способностью тела, может быть устранена путем смещения температурной шкалы излучения абсолютно черного тела пропорционально разности излучательных способностей измеряемого тела при двух длинах волн. Для этого серый клин для уравнивания яркостей при длине волны  $\lambda_2$  должен иметь логарифмическую характеристику пропускания. Измерения можно проводить также с цветными светофильтрами [9.34]. В визуальном цветовом пирометре Нэзера [9.35] (рис. 9.26) объект 1 и нить пирометриче-

ской лампы 11, нагретая до постоянной температуры, проецируются в фотометрическом кубе 12 и их можно одновременно наблюдать через окуляр 6. Перед пирометрической лампой находится красный светофильтр 10. Бихроматический фильтр 5 пропускает только красную и зеленую составляющие. При наблюдении обоих цветных изображений бихроматического фильтра  $e$  можно изменить цвет излучения объекта путем сдвига красного клина 3 так, что он станет таким же, как цвет излучения пирометрической лампы. При этом положение красного клина 3 служит мерой цветовой температуры или температуры спектрального распределения ( $t_v = t_f$ ). Для того чтобы глаз наблюдателя мог правильно сравнивать цвета измеряемого объекта и пирометрической лампы, их яркость должна быть примерно одинаковой. Для этого производится уравнивание яркостей сравниваемых цветов с помощью серого клина 4. Положение серого клина 4 при этом является мерой яркостной температуры  $t_s$  смешанного цвета.

Рис. 9.26. Цветовой пирометр (по Нэзеру):

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — красный клин (положение которого является мерой цветовой температуры); 4 — серый клин (положение которого является мерой яркостной температуры); 5 — бихроматический фильтр; 6 — окуляр; 7 — диафрагма; 8 — наблюдатель; 9 — реостат; 10 — красный фильтр; 11 — эталонная лампа; 12 — фотометрический кубик



Для того чтобы можно было непосредственно определять истинную температуру тел с не серым излучением, например температуру расплавов в металлургии, серый клин 4 окрашивают так, чтобы получить необходимый сдвиг показаний температуры  $t_v$ . Интенсивность окраски подбирают в зависимости от излучательных свойств объекта.

Поскольку при измерении этим методом необходимо оценивать цветовой контраст, дальтоники с нарушением цветоразличительной способности (например, красно-зеленой чувствительности) или не могут работать с этими пирометрами, или при незначительных дефектах зрения могут проводить измерения только при выполнении специальных мероприятий. Нарушения относительной цветовой чувствительности глаза не приводят к погрешности [9.36]. У наблюдателя с нормальным цветовым восприятием предел допустимой погрешности составляет  $(\pm 10) - (\pm 130)$  К в диапазоне измерения яркостной температуры  $t_s$  между  $1200$  и  $1800^\circ\text{C}$  (возможно, до  $2000^\circ\text{C}$ ). На расстоянии  $100$  см может быть измерена температура излучающего тела диаметром  $3$  мм [9.4, 9.37].

### 9.7.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ С ПРИЕМНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

При определении температуры яркостной пирометр фокусируется на измеряемый объект. Величина поля наблюдения, температурное излучение которого воздействует на приемник, зависит от размеров оптической системы пирометра и эффективной поверхности приемника излучения.

Спектральное распределение излучения тела может быть изменено селективными фильтрами. Аналогичным образом на излучение могут воздействовать линзы, зеркала и т. п. детали оптики. Электрический сигнал, создаваемый приемником излучения, зависит не только от мощности и спектрального состава падающего на него излучения, но и от селективности самого приемника. Если пирометр снабжен селективным фильтром или селективным приемником излучения, то он является пирометром частичного излучения. У пирометров полного излучения спектральная характеристика приемника излучения приближается к характеристике черного или серого тела.

### 9.7.3.1. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

#### 9.7.3.1.1. Показатель визирования $d = a/D$ диафрагменных, рефракторных и рефлекторных пиromетров

Для оптического отображения измерительного поля объекта на плоскость приемника излучения применяют диафрагмы, линзы и вогнутые зеркала. У пиromетров с диафрагмой на расстоянии  $a'$  от приемника излучения расположена диафрагма с отверстием диаметром  $L$  или площадью  $F$ .

Необходимый минимальный диаметр измерительного поля объекта  $D$ , излучение которого попадает на приемник излучения, ограничен двумя углами с вершинами на концах диаметра  $B$  приемника излучения, опирающихся на диаметр отверстия диафрагмы  $L$ , как показано на рис. 9.27,  $a$ .

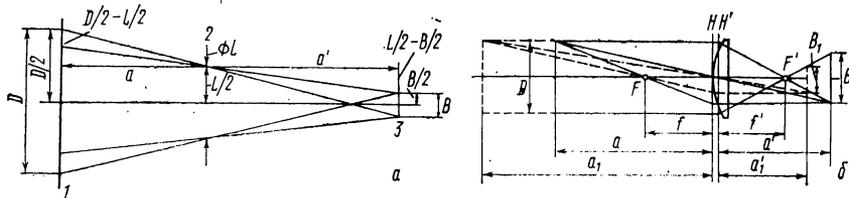


Рис. 9.27. Определение показателя визирования  $a/D$  ( $a$  — расстояние от плоскости объекта до входного отверстия пиromетра,  $D$  — диаметр измерительного поля);  $a$  — для диафрагменных пиromетров из раскрытия диафрагмы и поверхности приемника (1 — измеряемый объект; 2 — диафрагма диаметром  $L$ ; 3 — приемник);  $b$  — из размеров изображения в плоскости приемника при двух различных расстояниях до объекта  $a$  и  $a_i$

Следовательно:

$$\frac{D - L}{L + B} = \frac{a}{a'} \quad \text{или} \quad D = \frac{a}{a'} (L + B) + L,$$

где  $a$  — расстояние между объектом измерения и диафрагмой. Поэтому с увеличением расстояния  $a$  диаметр измерительного поля  $D$  и показатель визирования  $d = a/D$  становятся больше.

Если излучающий объект, удаленный от пиromетра на расстояние  $a$ , имеет диаметр меньше, чем минимальный диаметр измерительного поля  $D$ , то показания пиromетра занижаются. Показания пиromетра не зависят от расстояния до объекта, если диаметр последнего больше диаметра измерительного поля  $D$  или равен ему. Рассеянное излучение не оказывает заметного влияния на показания.

У рефракторных (с линзами) и рефлекторных (с вогнутыми зеркалами) пиromетров [9.38] можно добиться такого хода лучей, чтобы на приемник попал возможно больший поток излучения (мощность излучения). В этом случае можно измерять температуру небольших объектов на большом удалении. Из рис. 9.27, б видно, что диаметр полезной поверхности приемника излучения  $B$  и расстояние  $a'$  между входным отверстием пиromетра (главная оптическая плоскость линзы или вершина вогнутого зеркала) и поверхностью приемника излучения  $B$  определяют размер изображения и вместе с тем показатель визирования  $d$  пиromетра. Одновременно с этим устанавливается соотношение между удалением измерительного поля от входного отверстия  $a$  (у рефракторных пиromетров оно примерно равно удалению излучающего объекта от передней поверхности  $H$  объектива) и его наибольшим линейным размером  $D$ . Для короткофокусных объективов справедливо

$$d = \frac{a}{D} = \frac{a'}{B} \approx \frac{f'}{B}. \quad (9.41)$$

Для вогнутых зеркал фокусное расстояние независимо от длины волны  $\lambda$  определяется радиусом кривизны зеркала. Поэтому во всем ИК-диапазоне достигается очень хорошее изображение. Фокусное расстояние линз зависит не только от гео-

метрических размеров, но и от коэффициентов преломления материала линзы. Так как с увеличением  $\lambda$  коэффициент преломления всех веществ, применяемых для изготовления линз, уменьшается, одновременно с этим происходит увеличение фокусного расстояния, размеров изображения и расстояния от линзы до изображения. Поэтому все рассчитанные с помощью уравнений геометрической оптики величины измерительного поля и размеров изображения справедливы только для определенной длины волны. Линзы из KRS5, твердого раствора TiBr и TlI, а также из  $As_2S_3$  (Сервофракс), у которых в интервале длин волн от 2 до 10 мкм наблюдается лишь малое изменение коэффициента преломления, почти не имеют в определенном диапазоне длин волн (например, от 2 до 5 мкм) хроматической аберрации.

Из эффективной длины волны пирометра определяется главное фокусное расстояние  $f'$  и при заданном приемнике излучения и характерном для пирометра показателе визирования  $d_k$  — расстояние до изображения  $a'$ . Путем визирования пирометра на абсолютно черное тело можно проверить, соответствует ли показатель визирования  $d_k$  заданному значению. Если поле наблюдения существенно больше, чем измерительное поле, то погрешность технического пирометра должна составлять не более 10%. Чем меньше фокусное расстояние объектива  $f'$  и чем

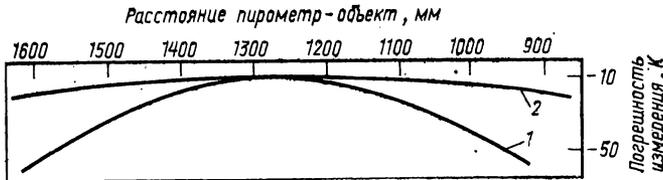


Рис. 9.28. Погрешность измерения пирометра излучения в зависимости от расстояния до объекта  $a$  при диаметре измерительного поля объекта  $D = 8$  мм. Показатель визирования  $d_k = 150$  при расстоянии  $a = 1200$  мм:

1 — без диафрагмы; 2 — с диафрагмой

меньше полезный диаметр приемника излучения, тем меньше может быть измеряемый объект. Тогда и показатель визирования  $d_k$  начиная с определенного расстояния остается почти неизменным.

В случае технических пирометров излучения часто отказываются от объективов с установкой на резкость. Поэтому нормальный показатель визирования  $d_k$  действителен только для определенного расстояния от излучателя или для ограниченного диапазона расстояний, который может быть расширен за счет диафрагмирования (глубины резкости). Поэтому, если пирометр настроен на разные диапазоны измерения с помощью диафрагм с калиброванными отверстиями, то при смене диапазона измерения может изменяться и показатель визирования  $d$ , а вместе с ним и минимально допустимый диаметр излучателя  $D$  при расстоянии  $a$ . Кроме того, с изменением расстояния до объекта изображение последнего становится более или менее резким (рис. 9.27, б). Если таким пирометром измерять температуру излучателя, диаметр которого меньше диаметра линзы, то, в соответствии с рис. 9.28, его показания будут занижаться при отклонении от некоторого основного расстояния до объекта  $a$ , соответствующего минимально допустимому диаметру излучателя. Однако если, как это бывает при большинстве технических измерений, диаметр излучателя больше диаметра линзы объектива, то показания быстро снижаются с увеличением расстояния в тех случаях, когда пирометр настроен на визирование минимально допустимого для данного показателя визирования  $d_k$  объекта на расстоянии  $a$ , так как в этом случае приемник излучения облучается не полностью. При меньшем расстоянии показания, несмотря на плохое качество изображения, могут быть завышены, так как при этом энергетическая освещенность приемника излучения увеличивается за счет рассеянного излучения (рис. 9.29).

Показания пирометра можно считать независимыми от расстояния в диапазоне, в котором погрешность измерения укладывается в  $\pm 5\%$ .

Если пирометр снабжен объективом с наводкой на резкость, то погрешность из-за размытости изображения измеряемого объекта практически исключена. Некоторая погрешность может быть внесена за счет рассеянного излучения. Такие пирометры используются для измерения температуры малых объектов. Поскольку



Рис. 9.29. Погрешность измерения пирометра излучения в зависимости от расстояния до объекта при диаметре измерительного поля объекта  $D = 60$  мм. Показатель визирования  $d_k = 20$  при расстоянии  $a = 1200$  мм

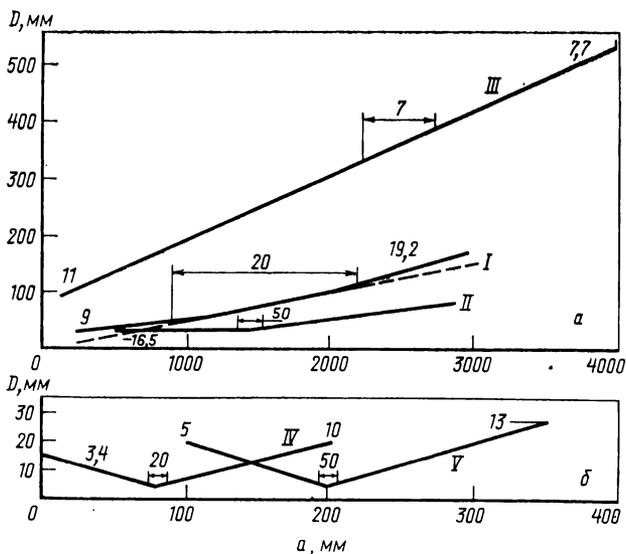


Рис. 9.30. Диаметр измерительного поля объекта  $D$  в зависимости от расстояния  $a$  между объектом и пирометром. Цифры на рисунке указывают значения показателя визирования  $d$ . Диапазоны расстояний, в которых показатель визирования  $d_k$  пирометра выдерживается с допуском  $\pm 2,5\%$ , ограничены стрелками с указанием значений  $d_k$ :

$a$  — диаметр объекта измерения больше диаметра линзы или сферического зеркала объектива (I — рефракторный пирометр:  $d_k = 20$ ; зависимость аппроксимируется в соответствии с рис. 9.27 тремя отрезками прямых; II — рефракторный пирометр:  $d_k = 50$ ; III — рефлекторный пирометр:  $d_k = 7$ ); б — диаметр объекта измерения меньше диаметра линзы (IV — рефракторный пирометр:  $d_k = 20$  при  $D = 4$  мм; V — рефракторный пирометр:  $d_k = 50$  при  $D = 4$  мм)

показатель визирования  $d$  слабо зависит от расстояния до предмета, нет необходимости в применении диафрагм (см. рис. 9.28), уменьшающих мощность излучения. Показатель визирования возрастает пропорционально  $a'$ .

Характерный для пирометра нормальный показатель визирования  $d_k$  может служить простым критерием для определения области применения пирометра. При измерениях температуры через смотровые окна печей диаметром 50—100 мм

оптимальное расстояние от смотрового окна для пирометра с  $d_k = 15-20$  примерно равно  $1-1,5$  м. Если требуется большее измерительное поле, то используют линзы с коротким фокусным расстоянием, тогда получается пирометр с меньшим показателем визирования, примерно  $d_k = 7$ . Чем меньше объект измерения, тем больше должно быть фокусное расстояние объектива. Расстояние  $a'$  между объективом и приемником излучения должно быть соответственно увеличено, например с помощью удлинительных трубок, привинчиваемых к корпусу пирометра. Такие пирометры имеют большой показатель визирования — от 50 до 150. Тогда в зависимости от размеров объектива при расстояниях до объекта  $1-1,5$  м удается получить меньший диаметр измерительного поля, чем это позволяют сделать пирометры с  $d_k = 20$ . С помощью короткофокусных объективов на малом удалении можно измерять температуру излучателей диаметром от 1,5 мм и меньше.

Из-за того, что значение показателя визирования не остается постоянным при изменении расстояния  $a$ , по величине  $d_k$  при большом расстоянии до объекта нельзя надежно определить размер измерительного поля.

Обычно связь между минимальным диаметром излучателя  $D$  и удалением  $a$  определяют по таблицам или из графиков, построенных на основании опытных данных. Так как требуемый диаметр излучателя  $D$  ограничен пучком лучей, возможность использования линейной зависимости между  $D$  и  $a$  для пирометров с различными оптическими системами представлена на рис. 9.30.

### 9.7.3.1.2. Световоды

Температура малых объектов может быть определена на большом расстоянии без оптического проецирования через линзу, а с помощью кристаллических стержней из сапфира ( $Al_2O_3$ ) или с помощью световодов, состоящих из пучка стекловолокон.

Каждое отдельное волокно содержит в середине стеклянную нить для прохождения излучения, покрытую стеклом с другим коэффициентом преломления. Благодаря полному внутреннему отражению в этой оболочке излучение передается почти без потерь. Лучи выходят из световода под теми же углами, под которыми они входили. Поэтому если один конец световода расположить вблизи объекта измерения, то излучение, выходящее из другого конца, может быть подведено непосредственно к приемнику излучения пирометра. Благодаря гибкости стекловолоконной оптики ее используют преимущественно для измерения температуры движущихся и труднодоступных объектов. Форма входного и выходного сечений может быть произвольной. Если входное сечение световода имеет прямоугольную форму, то, например, при определении температуры узкой полосы или тонкой проволоки поток излучения, испускаемого такими объектами, может быть использован более полно за счет расположения длинной стороны прямоугольника входного сечения в направлении полосы [9.39, 9.40].

### 9.7.3.1.3. Поглощение излучения линзами и окошками

Линзы пирометров для измерений температур выше  $800^\circ C$  обычно изготавливают из стекла, пропускающего излучение с длиной волны до 3 мкм. Линзы из кварца могут быть использованы для измерений температуры примерно до  $400^\circ C$ , линзы из флюорита — до  $50^\circ C$ . С помощью линз, пропускающих еще более длинноволновое излучение, а также с помощью вогнутых зеркал можно измерять еще более низкие температуры — вплоть до  $-40^\circ C$ . Чем шире полоса пропускания линзы, тем больше выходной сигнал приемника излучения пирометра при одной и той же температуре излучателя. Однако с увеличением длины волны при заданном значении излучательной способности погрешность измерения температуры возрастает.

На рис. 9.31 даны коэффициенты пропускания  $\tau$  некоторых материалов в зависимости от длины волны  $\lambda$  [9.41]. С помощью специального напыленного просветляющего слоя можно уменьшить отражение от линз и тем самым повысить

их пропускание. У рефлекторных пирометров на поверхность зеркал напыляют слой серебра или алюминия и затем покрывают их прозрачным слоем, например кварцем, для защиты от коррозии. Для измерений в далекой инфракрасной области используют зеркала, напыленные золотом, без защитного слоя.

Чтобы предохранить линзы или зеркала от загрязнения и химического воздействия и исключить погрешность измерения рефлекторных пирометров из-за

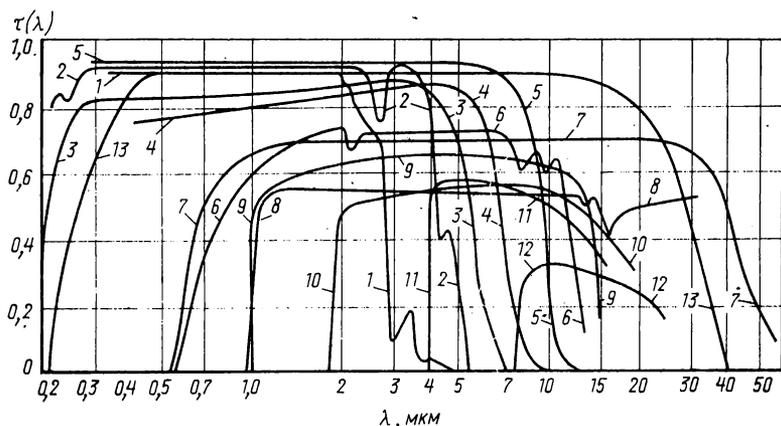


Рис. 9.31. Зависимость коэффициента пропускания  $\tau(\lambda)$  различных материалов для линз, окошек и фильтров от длины волны  $\lambda$  (мкм):

1 — оптическое стекло толщиной 2 мм;  $\lambda = 0,35-2,9$ ; 2 — плавленый кварц ( $\text{SiO}_2$ ) толщиной 1 мм;  $\lambda = 0,3-4,5$ ; 3 — сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) толщиной 2,5 мм;  $\lambda = 0,25-5,5$ ; 4 — фтористый литий ( $\text{LiF}$ ) толщиной 2,5 мм;  $\lambda = 0,3-7$ ; 5 — флюорит ( $\text{CaF}_2$ ) толщиной 2 мм;  $\lambda = 0,3-10$ ; 6 — сервофракс ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) толщиной 2 мм;  $\lambda = 0,6-12$ ; 7 — KRS5 (TlBr или TlI, твердый раствор);  $\lambda = 0,6-40$ ; 8 — кремний толщиной 2,5 мм;  $\lambda = 1-15$ ; 9 — фосфид индия (InP);  $\lambda = 1-14$ ; 10 — германий толщиной 2 мм;  $\lambda = 2-20$ ; 11 — арсенид индия (InAs);  $\lambda = 4-15$ ; 12 — антимонид индия (InSb);  $\lambda = 8-25$ ; 13 — бромистый калий (KBr) толщиной 10 мм;  $\lambda = 0,25-40$ . Кроме того:

Антимонид—сульфид индия	8—13
Иртран-1 ( $\text{MgF}_2$ )	1—8
Иртран-2 ( $\text{ZnS}$ )	2—14

воздействия на приемник излучения потоков воздуха, входные отверстия пирометров закрывают прозрачными окошками. Для изготовления окошек могут быть использованы вещества, приведенные на рис. 9.31. Кроме того, для измерения низких температур с помощью инфракрасных пирометров применяют полимерные пленки, имеющие широкую полосу пропускания, например полиэтиленовую пленку.

#### 9.7.3.1.4. Селекторы излучения

Та часть излучения, которая теряется при его прохождении через линзы, фильтры и окошки, в основном поглощается их веществом и преобразуется в тепло; лишь очень небольшую часть составляют потери на отражение. В отличие от этого в селекторах излучения большую часть потерь составляют потери на отражение. Селекторы излучения особенно пригодны для разделения излучения на два диапазона с различной длиной волн, например для цветных пирометров спектрального отношения.

В качестве селекторов излучения могут быть использованы фильтры из полупроводников и прежде всего такие элементы IV группы периодической системы, как кремний и германий, а также твердые растворы элементов III и V групп. Кроме того, могут быть многослойные селективные фильтры, составленные из непоглощающих диэлектрических слоев.

Полированные полупроводниковые селекторы излучения преимущественно отражают излучение с длиной волны меньше критической  $\lambda_{tr}$  и свободно пропускают излучение более длинноволнового диапазона. Пропускающая способность материала хорошо воспроизводится и практически не зависит от толщины фильтра. Благодаря этому осуществляется стабильное разделение падающего на фильтр излучения. Неполаризованное излучение при углах падения, близких к  $90^\circ$ , остается неполяризованным. Таким образом, результат измерения практически не зависит от способа визирования объекта и от положения пирометра по отношению к фильтру [9.42].

Критическая длина волны  $\lambda_{tr}$  равна 0,55 мкм для GaP, 0,91 мкм для GaAs, 1,0 мкм для InP, 1,2 мкм для Si, 1,7 мкм для Ge и 2,5 мкм для In (As, Sb) [9.43].

Многослойные фильтры состоят из множества напыленных на стекло непоглощающих диэлектрических слоев кварца, криолита, флюорида кальция и т. д. Коэффициент пропускания интерференционных зеркал в инфракрасном диапазоне составляет примерно 0,8, коэффициент отражения в видимой области спектра — около 0,9. Покрытые зеркала нечувствительны к механическому воздействию, устойчивы к воздействию воды и температуры (рис. 9.32, кривая 1). Теплоотражающие фильтры почти полностью пропускают излучение в видимом диапазоне и могут отражать в зависимости от числа слоев до 95% инфракрасного излучения (рис. 9.32, кривая 2). Эти фильтры также не дают погрешности из-за поляризации, если излучение падает перпендикулярно к селектору (изготовители: «Schott u. Genz», Майнц; «Balzers», Лихтенштейн).

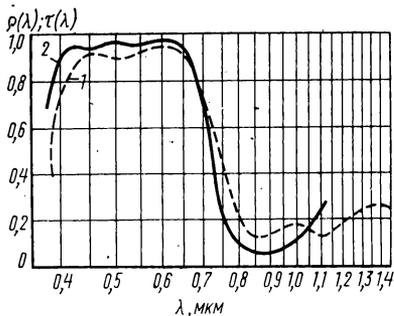


Рис. 9.32. Зависимость коэффициента отражения  $\rho(\lambda)$  зеркального отражателя (1) и коэффициента пропускания  $\tau(\lambda)$  теплоотражающего фильтра (2) от длины волны  $\lambda$

### 9.7.3.1.5. Интерференционные фильтры

Интерференционные фильтры [9.4; 9.6; 9.41] отличаются узкой полосой пропускания, которая может располагаться по желанию практически в любом диапазоне спектра — от видимого до инфракрасного. Интерференционный фильтр представляет собой последовательно напыленные на стеклянную полированную поверхность металлический полупрозрачный слой, прозрачный промежуточный слой из неметалла (кварц, криолит, флюорид кальция) и второй металлический слой. Вместо металлического слоя могут быть использованы слои из вещества с большим коэффициентом преломления, таких как двуокись титана или сульфид мышьяка.

Поверх всего наклеивают второе защитное стекло. При склеивании двух одинаковых одинарных фильтров получается двойной фильтр. Такие фильтры обладают почти постоянным коэффициентом пропускания в очень узкой полосе длин волн (рис. 9.33, кривые 1 и 2).

Принцип действия описанных фильтров основан на интерференции электромагнитных волн, которая зависит от соотношения между длиной волны пропускаемого излучения, толщиной слоя и коэффициентом преломления промежуточного слоя. Нежелательные подосы пропускания более высоких порядков могут быть по-

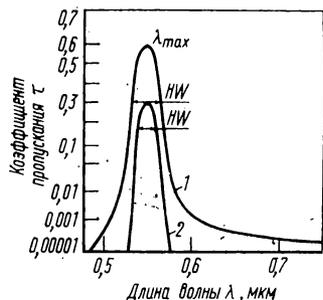


Рис. 9.33. Коэффициент пропускания интерференционного полосового фильтра (1) и двойного полосового фильтра (2).  $\lambda_{max} = 0,55$  мкм;  $HW$  — полуширина полосы пропускания фильтра

давлены с помощью дополнительных фильтров. Основными характеристиками интерференционных фильтров являются длина волны максимума пропускания  $\lambda_{\max}$ , максимальный коэффициент пропускания  $\tau_{\max}$  и полуширина полосы про-

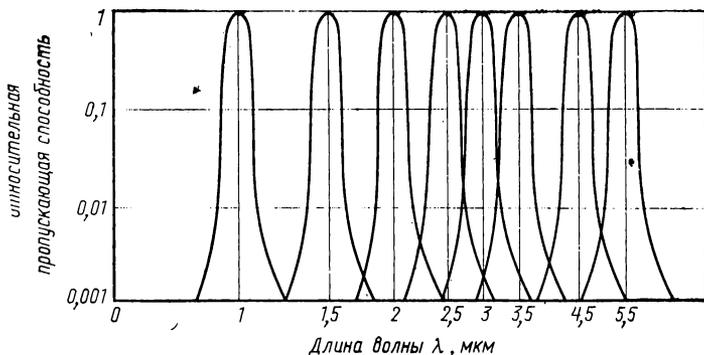


Рис. 9.34. Относительная пропускательная способность серии инфракрасных интерференционных фильтров:

пускания фильтра  $HW$ , при которой коэффициент пропускания  $\tau_{HW} = \tau_{\max}/2$ . Эта величина является мерой спектральной ширины полосы пропускания фильтра. Кроме того, чем меньше отношение ширины пика пропускания при  $\tau = 0,001\tau_{\max}$  к полуширине  $HW$ , тем больше крутизна пика пропускания.

Т а б л и ц а 9.8

**Спектральные характеристики интерференционных фильтров \***

Полоса пропускания, мкм	Максимальный коэффициент пропускания $\tau_{\max}$	Полуширина $HW$ , % от $\lambda_{\max}$
0,25—0,39	0,3	3
0,40—0,8	0,3—0,6	2—0,3
0,8—2	0,3	5
2—12	0,3—0,5	5—2

\* Изготовители: «Schott u. Genz», Майнц, ФРГ; «Ballzers», Лихтенштейн; «Barnes Eng. Comp.», Самфорд, Коннектикут, США; «Grubb Parsons Walkergate», Ньюкасл, Англия.

Эти характеристики получаются из кривых пропускания (рис. 9.33 и 9.34).

С увеличением угла падения излучения положение полосы пропускания смещается к более коротким длинам волн; кроме того, при этом неполяризованное излучение расщепляется на две составляющие, и тем самым уменьшается коэффициент пропускания. Поэтому излучение вводится в интерференционный фильтр параллельным пучком. Угол падения должен составлять не более  $10^\circ$ . Температура фильтра при длительной эксплуатации не должна превышать  $40^\circ\text{C}$ . Так как при перпендикулярном облучении большая часть потока отражается, эти

Данные о максимальной коэффициенте пропускания  $\tau_{\max}$  и полуширине  $HW$  в процентах от длины волны максимума  $\lambda_{\max}$  интерференционных фильтров в различных спектральных диапазонах приведены в табл. 9.8.

**9.7.3.2. ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Термическими приемниками излучения служат термобатареи, болометры или элементы Голэя, температура которых повышается при поглощении излучения. Их преимущество состоит в том, что они достаточно чувствительны во всем ин-

фракрасном диапазоне длин волн от 0,75 до 1000 мкм независимо от длины волны излучения. Недостатком их является относительно большая инерционность.

В фотоэлектрических приемниках излучения (квантовых детекторах) поглощенная фотоэлементом энергия излучения вследствие внешнего фотоэлектрического эффекта выбивает электроны в окружающее пространство. У фоторезисторов, фотодиодов и фототранзисторов благодаря внутреннему фотоэффекту связанные в кристаллической решетке электроны переходят на более высокий энергетический уровень. При этом изменяется проводимость всего элемента или переходного слоя без какого-либо изменения температуры приемника излучения.

### 9.7.3.2.1. Основные характеристики приемников излучения

#### 9.7.3.2.1.1. Чувствительность к излучению

Чувствительность приемника излучения  $s$  характеризуется отношением эффективных значений выходного  $S$  и входного сигналов  $X$ , т. е.  $s = S/X$ . Выходной сигнал  $S$  термических приемников излучения представляет собой измеряемое изменение температуры или напряжения сигнала  $U_s$ , у фотоэлектронных приемников излучения — напряжение сигнала  $U_{ph}$  или фототок  $I_{ph}$ . Величина  $X$  представляет собой отношение потока излучения  $\Phi$  (Вт) к площади чувствительной поверхности приемника излучения  $A$  или энергетическую освещенность  $E = \Phi/A$  (Вт/м<sup>2</sup>).

Отнеся чувствительность к бесконечно малой области спектра  $d\lambda$ , получаем спектральную чувствительность  $s(\lambda) = dS(\lambda)/dX(\lambda)$ . Только при линейной характеристике  $S = f(X)$  спектральная чувствительность для данной длины волны не зависит от величины входного и выходного сигнала [9.6, 9.44]. Для нормирования зависимости чувствительности приемника излучения от длины волны  $\lambda$  целесообразно относить  $s(\lambda)$  к спектральной чувствительности  $s(\lambda_0)$  для опорной длины волны  $\lambda_0$ . В качестве последней чаще всего выбирают длину волны  $\lambda_{max}$ , при которой  $s(\lambda)$  имеет максимальное значение.

Следовательно, относительная спектральная чувствительность равна  $s(\lambda)_{rel} = s(\lambda)/s(\lambda_{max})$ . Для  $\lambda_{max}$  относительная спектральная чувствительность  $s(\lambda)_{rel}$  равна 1 (рис. 9.35).

Относительная спектральная чувствительность не дает возможности сравнивать между собой приемники излучения различных типов. Поэтому необходимо также знать абсолютное значение максимальной спектральной чувствительности  $s(\lambda_{max})$  приемника, используя которую можно по значению  $s(\lambda)_{rel}$  рассчитать для диапазона линейности приемника излучения зависимость спектральной чувствительности  $s(\lambda)$  от длины волны  $\lambda$ . Может быть, что для какой-либо длины волны  $\lambda$  значение  $s(\lambda)_{rel}$  приемника  $a$  меньше, чем приемника  $b$ , тогда как абсолютное значение чувствительности приемника  $a$  существенно больше, чем приемника  $b$ .

#### 9.7.3.2.1.2. Добротность и избирательность приемников излучения

Если известна энергетическая освещенность приемника излучения, то, зная его чувствительность к излучению, можно определить величину выходного сигнала  $S$ , например напряжение  $U_s$ , и, исходя из него, рассчитать необходимое усиление, чтобы получить желательную величину выходного сигнала пирометра. Однако, зная только чувствительность, нельзя ничего сказать о минимальной величине сигнала  $U_s$  на выходе приемника излучения. Эта величина зависит в основном от статистических колебаний сигнала, вызванных колебаниями температуры как самого приемника излучения, так и главным образом электрических измерительных устройств, в электросопротивлениях которых возникают джонсоновские шумы (шумы Найквиста).

Термические колебания могут быть уменьшены путем охлаждения приемника излучения, порог чувствительности при этом более или менее повышается. Уро-

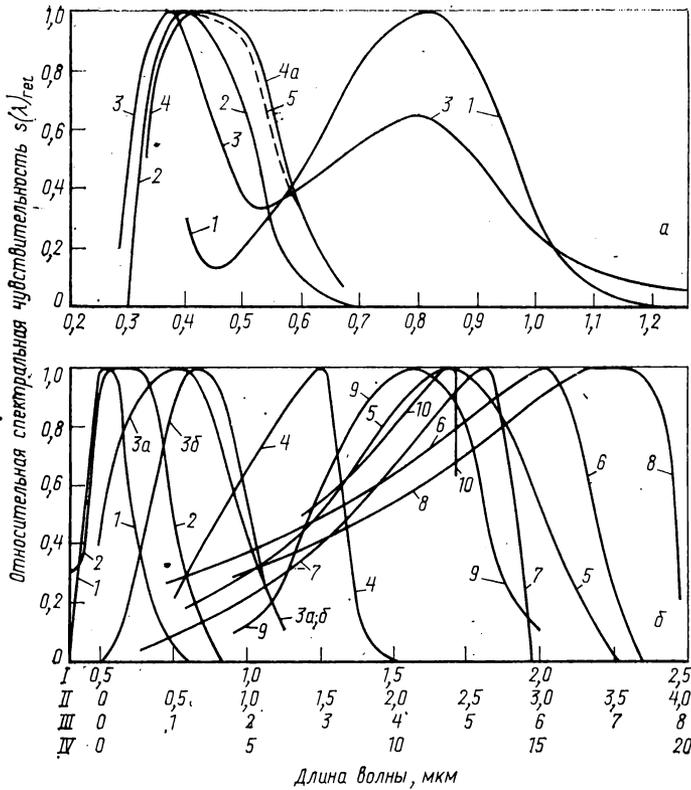


Рис. 9.35. Относительная спектральная чувствительность  $s(\lambda)_{rel} = s(\lambda)/s(\lambda)_{max}$  фотоэлектрических приемников излучения:  
 а — приемники излучения с внешним фотоэффектом (1 — фотоэлемент с катодом из окиси цезия S-1;  $\lambda_{max} = 0,7 - 0,9$  мкм; 2 — фотоэлемент с катодом из антимонида цезия S-4;  $\lambda_{max} = 0,35 - 0,45$ ; 3 — фотоумножитель при  $\lambda_{max} = 0,38$  и  $\lambda_{max} = 0,8$ ; 4 — фотоумножитель при  $22^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_{max} = 0,38 - 0,50$ ; 5 — фотоумножитель при  $-55^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_{max} = 0,38 - 0,47$  мкм); б — приемники излучения с внутренним фотоэффектом

№ кривой	Приемник излучения	№ абсциссы	$\lambda_{max}$ , мкм
1	Селеновый фотоэлемент	I	0,55—0,63
2	Фоторезистор CdS	I	0,51—0,64
3	Кремниевый фотоэлемент: меньший p-слой большой p-слой	I	0,5—1,0
		I	0,8—1,1
4	Германиевый фотоэлемент	II	1,4—1,55
5	Фоторезистор PbS	II	2,0—2,5
6	Фотоэлемент InSb ( $20^\circ\text{C}$ )	III	6,0—6,3
7	Фотоэлемент InSb ( $77\text{ K}$ )	III	5,3
8	Фотоэлемент InAs ( $20^\circ\text{C}$ )	II	3,2—3,6
9	Фоторезистор из германия, легированного ртутью (<math>40\text{ K}</math>)	IV	10—12
10	Фоторезистор PbSn—Te ( $77\text{ K}$ )	IV	9—12

вень шумов сопротивлений зависит от ширины полосы частот  $\Delta f$ , но не от абсолютного значения самой частоты  $f$ . Поскольку напряжение шумов  $U_R$  примерно пропорционально корню квадратному из ширины полосы частот  $\Delta f$  ( $U_R \approx \sqrt{\Delta f}$ ), то отношение выходного сигнала, например напряжения  $U_S$ , к напряжению шумов  $U_R$  увеличивается с уменьшением ширины полосы частот  $\Delta f$ . Благодаря этому уменьшается влияние помех и снижается наименьший возможный уровень напряжения сигнала. Поэтому добротность приемника излучения зависит от отношения величины  $U_S/U_R$  к энергетической освещенности  $E$ . Напряжение шумов  $U_R$  изменяется пропорционально  $\sqrt{\Delta f}$  и примерно пропорционально  $1/\sqrt{A}$ , где  $A$  — чувствительная к излучению поверхность приемника. Поэтому произведение  $U_R \sqrt{A/\Delta f}$  не зависит от поверхности приемника излучения и от ширины полосы частот. При этом удельная избирательность  $D^*$

$$D^* = \frac{U_S}{U_R} \frac{1}{E} \sqrt{\frac{\Delta f}{A}} \quad (\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}) \quad (9.42)$$

приемника излучения является показателем добротности, независимым от ширины полосы пропускания частот и эффективной поверхности приемника излучения [9.45].

В табл. 9.9 представлены некоторые характеристики термических и фотоэлектронных приемников излучения.

Для конкретных приборов указанные характеристики, как и относительная чувствительность (рис. 9.35), могут отличаться от приведенных в таблице.

Избирательность, как и спектральная чувствительность, даны для длины волны  $\lambda_{\text{max}}$ , для которой  $s(\lambda)_{\text{rel}} = 1$ . У термических приемников  $D^*$  относится обычно к температуре черного излучателя.

Если излучение модулировано, то избирательность имеет максимум при какой-то определенной частоте модуляции; с понижением частоты избирательность становится меньше из-за уменьшения  $s_{\text{rel}}$ . При слишком малом времени облучения выходной сигнал не достигает того значения, которое устанавливается при непрерывном облучении. Поэтому для передачи измеренной величины без потерь необходима достаточно большая инерционность усилителя модулированного напряжения, ширина полосы усиления которого должна быть не менее  $\Delta f = \frac{1}{2} \tau$ ,

где  $\tau$  — время накопления (запоминания) сигнала. При увеличении времени облучения или при уменьшении ширины полосы частот точность измерения улучшается. Избирательность  $D^*$  может зависеть от темнового тока и от температуры приемника излучения. Обычно чем ниже температура приемника излучения, тем ниже уровень шумов и тем выше избирательность. Таким образом, избирательность зависит от условий испытания, среди которых наиболее важными являются  $\lambda_{\text{max}}$  или температура черного тела  $t$ , частота  $f$  и ширина полосы  $\Delta f$ , т. е.  $D^* = D^*(\text{мкм}, f, \Delta f)$  или  $D^* = D^*(K, f, \Delta f)$  [9.41; 9.46—9.48].

Для характеристики добротности приемника излучения используется эквивалентная мощность рассеянного излучения  $N$ . Е. Р. Она определяется как величина потока (мощность) синусоидально модулированного излучения, которая вызывает на выходе приемника напряжение шумов, эквивалентное напряжению сигнала. Величина  $N$ . Е. Р. (эквивалентная мощность шумов) равна  $\sqrt{A/D^*}$ , т. е. зависит от облучаемой поверхности приемника.

Другим критерием добротности приемника излучения является коэффициент Мерита. Для терморпар и болометров он равен

$$M = 0,47s \sqrt{A}/\sqrt{R\tau} \quad (\text{см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2}), \quad (9.43)$$

где  $s$  — чувствительность при непрерывном облучении;  $A$  — поверхность приемника;  $R$  — внутреннее сопротивление источника питания;  $\tau$  — постоянная времени.

При сравнении таких приемников излучения по чувствительности и добротности необходимо принимать во внимание внутреннее сопротивление  $R$  источника питания. Оно должно быть как можно меньше [9.49; 9.50].

Таблица 9.9

## Характеристики приемников излучения

№ п/п	Приемник излучения	Фотоэлектрический (Ф) или термический (Т)	Площадь приемника, мм <sup>2</sup>	Рабочая температура, °С [К]	Максимально допустимая энергетическая освещенность, мВт/мм <sup>2</sup>
1	Вакуумная точечная термопара	Т	0,5	Комн.	—
2	Рт-ленточный болометр	Т	2,1	»	—
3	Термисторный болометр	Т	0,25	»	2,5
4	Висмутовый болометр	Т	2,7	(-20) ÷ 40	—
5	Триглицинсульфат	Т	1,0	(-20) ÷ 40	—
6	Элемент Голья	Т	7,0	Комн.	—
7	Селеновый фотоэлемент	Ф	1200	»	—
8	Кремниевый фотоэлемент	Ф	78	0—100 [200]	1 · 10 <sup>-3</sup>
9	Кремниевый фотодиод	Ф	56	0—100 [200]	75 · 10 <sup>-3</sup>
10	Фоторезистор CdS	Ф	150	Комн.	80 · 10 <sup>-3</sup>
11	» PbS	Ф	36	0—60	—
12	» InSb (20° С)	Ф	3; 54	Комн.	—
13	» InSb (77 К)	Ф	16	77 К	—
14	InSb-РЕМ-приемник	Ф	—	20	—
15	InSb-NiSb-фотоболометр	Т	2,2	Комн.	—
16	InSb-NiSb-ОЕН-приемник	Т	0,25—7	(-20)—55	—
17	Фоторезистор Ge : Cu	Ф	16	4,2 К	—
18	» Pb—Sn—Te	Ф	20	77 К	—
19	Фотоэлемент (рис. 9.35, а, кривая 2)	Ф	300	Комн.	6,3 · 10 <sup>-3</sup>
20	Фотоумножитель (рис. 9.35, а, кривая 4)	Ф	250	»	4,3 · 10 <sup>-9</sup>

*Порог чувствительности приемника излучения по температуре.* При известной избирательности приемника излучения и заданной температуре можно оценить минимальное регистрируемое изменение температуры — порог чувствительности по температуре  $\Delta T_{\min}$ . Из условия, что вызываемое изменением температуры  $\Delta T$  изменение сигнала  $\Delta U_S$  должно быть больше, чем напряжение шумов  $U_R$ , получаем [9.51]

$$\Delta T_{\min} = \frac{1}{D^*} \frac{1}{T^3 B^*(v)} \cdot \frac{\sqrt{\Delta f}}{\sqrt{A} \varepsilon G 4 \sigma}, \quad (9.44)$$

где  $T$  — температура объекта измерения;  $B^*(v)$  — производная функции  $B(v)$  по температуре; при  $B(v)$  и  $B'(v)$  по уравнениям 9.15 и 9.16 и при  $v = \lambda T/c_2$  эта величина равна  $B^*(v) = B(v) + B'(v)(v/4)$ ;  $\Delta f$  — ширина полосы частот (оптимальная величина  $\Delta f = 1/2\pi\tau$ , где  $\tau$  — время запоминания);  $\varepsilon$  — излучательная способность, усредненная от  $\lambda_0$  до  $\lambda_{Gr}$  — длинноволновой границы диапазона приемника излучения при заданной температуре  $t$ . При необходимости следует учитывать ослабляющее действие фильтра;  $G = (x - 1)^2 / (1 + 4B^2x^2)$  —

Сопротивление, Ом	Избирательность $D^*$ , см·Гц <sup>1/2</sup> ·Вт <sup>-1</sup> ( $K; f; \Delta f$ или мкм, $f, \Delta f$ )	Чувствительность $s$ , В/Вт или А/Вт ( $K; f$ или мкм)	Постоянная времени $\tau$ , с
5—20	$2 \cdot 10^8$ (500 К; 12,5; 1)	4 В/Вт (500 К; 12,5)	0,02
40	$1,5 \cdot 10^8$ (500 К; 12,5; 1)	4 В/Вт (500 К; 12,5)	0,016
$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$ (500 К; 12,5; 1)	$1,3 \cdot 10^3$ (500 К; 12,5)	0,016
300—900	$1 \cdot 10^8$ (500 К; 12,5; 1)	5 В/Вт (500 К; 12,5)	Наполнен Xe 0,01, наполнен He 0,001
$10 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^8$ (500 К; 12,5; 1)	$2,3 \cdot 10^3$ В/Вт (500 К; 12,5)	$2 \cdot 10^{-4}$
—	$1,7 \cdot 10^9$ (500 К; 10; 1)	$2,5 \cdot 10^5$ В/Вт (500 К; 10)	0,015
$0,5 \cdot 10^3$	Низкая (0,57 мкм)	0,015 А/Вт (0,57 мкм)	$0,1 \cdot 10^{-3}$
$0,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{11}$ (0,9 мкм)	$7 \cdot 10^4$ В/Вт (0,9 мкм)	$5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{10}$ (0,9 мкм)	0,45 А/Вт (0,9 мкм)	$2 \cdot 10^{-9}$
$(3-200) \cdot 10^6$	Низкая (0,6 мкм)	$3 \cdot 10^4$ А/Вт (0,6 мкм)	0,1
$2,5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{10}$ (2; 2; 800; 1)	$1 \cdot 10^5$ В/Вт (2; 2; 800)	$0,1 \cdot 10^{-3}$
2—500	$(8,5-30) \cdot 10^7$ (6; 800; 1)	0,4—1,5 В/Вт (6; 800)	$0,1 \cdot 10^{-6}$
$(1-600) \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{10}$ (5,3; 800; 1)	$2,6 \cdot 10^3$ В/Вт (5,3; 800)	$< 5 \cdot 10^{-6}$
20	$5,8 \cdot 10^7$ (500 К; 900; 1)	0,38 В/Вт (500 К; 90)	$0,2 \cdot 10^{-6}$
100	$1,4 \cdot 10^8$ (500 К; 13; 1)	40 В/Вт (500 К; 13)	0,33
3,5—95	$(8,5-12) \cdot 10^6$ (500 К; 13; 1)	$\sim 0,06$ В/Вт (500 К)	При 5 мкм $10 \cdot 10^{-6}$ ; при 9,5 мкм $100 \cdot 10^{-6}$
$(2,5-40) \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{10}$ (15 мкм)	500 В/Вт (15 мкм)	$0,5 \cdot 10^{-6}$
1—100	$8 \cdot 10^9$ (11; 900; 1)	150 В/Вт (500 К; 900)	$50 \cdot 10^{-9}$
$40 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$ (0,42 мкм)	0,08 А/Вт (0,42 мкм)	$0,7 \cdot 10^{-9}$
$5 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^{14}$ (0,42 мкм)	0,12 А/Вт (0,42 мкм)	$1 \cdot 10^{-9}$

геометрическая функция оптического изображения, где  $x = g/f$  — расстояние до объекта, отнесенное к фокусному расстоянию, а величина  $B = f/d$  — отношение фокусного расстояния к диаметру объектива; величина  $D^*$  для длин волн ниже граничной длины волны  $\lambda_{Gr}$  принимается постоянной;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана.

На рис. 9.36 приведена рассчитанная по уравнению (9.44) номограмма. С ее помощью можно определить  $\Delta T_{\min}$  в зависимости от температуры объекта, зная граничную длину волны  $\lambda_{Gr}$  и избирательность приемника излучения. Номограмма построена для  $\Delta f = 100$  Гц,  $A = 0,1$  см<sup>2</sup>,  $\epsilon = 0,95$ . Значение  $G$  получается из масштаба изображения  $x = g : f = 1 : \downarrow$  при значении величины  $B = f/d = 1,9$ .

С повышением температуры объекта измерения  $T$  граничная длина волны приемника может уменьшаться. При дальнейшем уменьшении  $\lambda_{Gr}$  разрешающая способность приемника очень быстро ухудшается. Для охлаждаемого азотом приемника излучения из InSb с  $\lambda_{Gr} = 5,5$  мкм при температуре излучателя 30°С порог чувствительности по температуре  $\Delta T_{\min} \approx 2 \cdot 10^{-3}$  К. При быстрой смене изображения, как у камеры фирмы AGA с частотой 16 кадров в секунду и  $10^4$  точек изображения, ширина полосы частот  $\Delta f \approx 10^6$  Гц. При этом  $\Delta T_{\min}$  увеличивается в  $\sqrt{10^4}$  раз, т. е. равна примерно 0,2К при 30°С. У термического прием-

ника излучения с  $\lambda_{Gr} \approx 30$  мкм и  $D^* = 10^7$  при  $30^\circ\text{C}$  порог чувствительности по температуре  $\Delta T_{min} \approx 0,5$  К.

Приемник излучения из InSb ( $20^\circ\text{C}$ ) с граничной длиной волны  $\lambda_{Gr} = 7$  мкм и  $\lambda_{max} = 6,1$  мкм (рис. 9.35, б) пригоден для измерения температур от  $0^\circ\text{C}$  и выше. С помощью болометрического приемника излучения, находящегося при комнатной температуре, можно измерять температуры до  $-50^\circ\text{C}$ . У приемников излучения,  $\lambda_{Gr}$  и  $\lambda_{max}$  которых лежат в ближней инфракрасной области, на-

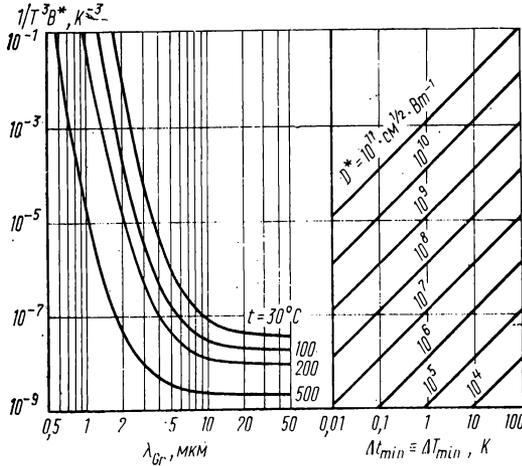


Рис. 9.36. Величина порога чувствительности по температуре  $\Delta t_{min}$  в зависимости от температуры излучателя  $t$ , граничной длины волны  $\lambda_{Gr}$  и избирательности  $D^*$  через сомножитель  $1/T^3 B^*$

пример у кремниевых фотоэлементов, показатель степени в формуле для выходного сигнала тем больше, чем ниже температура излучателя (при  $450^\circ\text{C}$  сигнал пропорционален  $T^{21}$ , при  $550^\circ\text{C}$  —  $T^{15}$ ). Вследствие этого с понижением температуры объекта выходной сигнал очень быстро уменьшается, и уже при  $400^\circ\text{C}$  его величина не превышает уровня шумов.

Для термических приемников излучения  $\Delta T_{min}$  также может быть рассчитана с помощью фактора Мерита [уравнение (9.43)] [9.52].

### 9.7.3.2.2. Термические приемники излучения

#### 9.7.3.2.2.1. Термоэлектрические приемники излучения

Для промышленных измерений чаще всего применяют термоэлектрические и болометрические приемники излучения. Для возможно более полного поглощения излучения облучаемая поверхность приемника чернится электролитическим или путем напыления сажи, окислов металлов или аморфной металлической пленки.

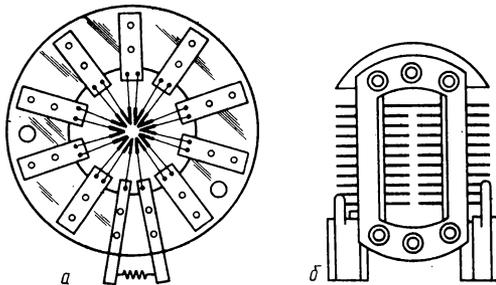
Термоэлектрический приемник должен развивать возможно большую т. э. д. с., его сопротивление должно быть как можно меньше, чтобы его можно было подключать непосредственно к показывающему или самопишущему компенсационному вторичному прибору. Чаще всего применяют NiCr — константановые термопары с термоэлектродами в виде проволоки, ленты с точечными или плоскими рабочими спаями. Рабочий спай проволоочной термопары приваривают или припаяивают к зачерненному приемному диску. У ленточной термопары лучеприемной поверхностью служит плоский зачерненный рабочий спай. Термопары могут быть выполнены в виде тонкой узкой ленты из никеля, покрытой частично медью, частично хромом. В результате термодиффузии получается NiCr-константановая термопара. Торцовые термопары состоят из двух заостренных на концах проволоочных термоэлектродов разного диаметра; точечные термопары образованы двумя термо-

электродами, дающими высокую т. э. д. с., например из полупроводников *p*- и *n*-типов проводимости. Рабочие концы и тех, и других термоэлектродов прикрепляют раздельно к металлической зачерненной фольге, тогда как их свободные концы находятся в хорошем тепловом контакте с массивным держателем. Такие термопары, выполненные в виде вакуумных термоприемников, обладают очень хорошим быстродействием — всего в несколько миллисекунд (табл. 9.9, № 1), тогда как время установления показаний у пирометров с обычными NiCr-константановыми термопарами составляет 1—5 с.

Чаще всего приемники излучения выполняют в виде термобатарей, рабочие спаи которых располагаются в облучаемой зоне. Благодаря большой площади облучения мощность такого приемника излучения возрастает. Она может быть еще больше увеличена путем помещения приемника излучения в вакуумированный сосуд. Благодаря этому потери тепла уменьшаются настолько, что полезная мощность возрастает в пять-десять раз. Инерционность приемника излучения при этом увеличивается (до 25 с). При использовании торцовых термопар можно изго-

Рис. 9.37. Термоэлектрические приемники излучения (термобатареи):

*a* — пирометра «Радиама-тик» фирмы «Honeywell»;  
*б* — пирометров «Ардонокс» и «Ардометр» фирмы «Siemens»



товить нечувствительный к механическим воздействиям приемник излучения с постоянной времени 0,02 с (табл. 9.9, № 1). Так как тепло от приемника отводится только излучением, показания вакуумированного приемника излучения сильно зависят от температуры окружающего пространства, а небольшое ухудшение вакуума значительно снижает его чувствительность.

Чувствительность приемника можно повысить при помещении термопары в газ с малой теплопроводностью, например ксенон [9.53]. При этом уменьшается влияние температуры окружающего пространства, однако время установления показаний увеличивается примерно в три раза. Наоборот, если термопара помещена в газ с хорошей теплопроводностью, например в водород или гелий, то, хотя т. э. д. с. существенно снижается, время установления показаний становится меньше (в три-четыре раза). Высокочувствительные и механически прочные термобатареи получают при применении различных технологических методов микроэлектроники, таких как вакуумное напыление, микрофотография и фототравление. Например, с помощью термобатареи из 448 элементов при сопротивлении 15 кОм достигается чувствительность в вакууме 1,65 В/Вт и постоянная времени 0,085 с [9.54].

Мощность излучения, попадающего в приемник, может быть использована полнее, если сзади термобатареи расположить небольшое вогнутое зеркало. С его помощью часть лучей, не попавших непосредственно на переднюю приемную поверхность приемника, возвращается на его обратную сторону. Если со стороны падающего потока излучения расположить зеркало с центральным отверстием, то оно будет возвращать на приемник большую часть отраженного последним излучения. Благодаря этому повысится коэффициент поглощения приемника.

На рис. 9.37 показаны часто используемые технические термоэлектрические приемники излучения. У первого из них рабочие спаи термобатареи расположены симметрично относительно центра поверхности приемника [9.5]; у другого они расположены в два ряда [9.13; 9.14]. Спаи сравнения (свободные концы) термопар, изолированные друг от друга тонкой пленкой, зажаты между металлическими шайбами с высокой теплопроводностью,

В другом исполнении приемника [9.54a] термобатарея из 30 соединенных последовательно термопар размещена на тонкой пленке диаметром 25 мм с центральным отверстием диаметром 2 мм. На краю внутреннего отверстия находятся рабочие спаи термобатареи, а на внешнем краю диска — свободные концы, поддерживаемые при постоянной температуре путем прижатия к охлаждаемой водой пластине.

*Измерение чувствительности при подключении к измерительному прибору.* По Иогансену [9.55], для оптимального измерения чувствительности термоэлектрического приемника излучения потери тепла излучением его поверхности и конвекцией должны быть равны потерям через теплопроводность вдоль термоэлектродов. Если пренебречь конвективными потерями, то потери за счет излучения  $K_{St,r}$  должны быть равны потерям через теплопроводность термоэлектродов  $K_{tm}$  (Вт/К). Однако, стремясь получить малую термическую инерционность, термоэлектроды технических приемников излучения делают как можно короче, и тем самым увеличивают потери через теплопроводность. Таким образом, одновременно уменьшается и отрицательное влияние колебаний температуры корпуса пирометра [см. уравнение (9.35)].

В общем у оптимально рассчитанного термического приемника излучения чувствительность возрастает с уменьшением площади приемной поверхности приемника излучения. Для единичных и параллельно включенных термопар чувствительность при непрерывном облучении обратно пропорциональна площади поверхности приемника [9.50 a]. Только у термобатарей с последовательно включенными термопарами чувствительность не зависит от площади поверхности приемника излучения.

Допустимые временные изменения энергетической яркости излучения измеряемого объекта определяются инерционностью или постоянной времени приемника излучения. При медленных изменениях температуры и непрерывном облучении приемника его постоянная времени не имеет значения. Если, однако, нужно измерять малый сигнал излучения по методу модулированного облучения, то для получения правильных результатов измерения необходимо, чтобы постоянная времени приемника излучения была достаточно мала по сравнению с шириной полосы частот  $\Delta f$  периодических импульсов усилителя.

#### 9.7.3.2.2.2. Болومترические приемники излучения

В болومترических приемниках излучение от измеряемого объекта нагревает температурно чувствительный резистор, изменение сопротивления которого и служит мерой температуры излучателя. Для измерения сопротивления применяются чаще всего мостовые схемы (см. 4.1.2). Чувствительность болметра может быть удвоена, если два болметра включить в противоположные плечи измерительного моста. Для обеспечения высокой точности измерения необходимо поддерживать постоянным ток моста.

Помехи, возникающие из-за колебаний температуры окружающей среды или из-за конвективных воздушных потоков, у болметра обычно больше, чем у термоэлектрического приемника, так как болметр может более или менее нагреваться измерительным током и при отсутствии облучения. Эти помехи можно достаточно полно подавить, если использовать метод модуляции падающего излучения.

При измерениях методом непрерывного облучения влияние таких колебаний может быть компенсировано путем помещения приемника излучения в термостатируемый объем или путем размещения в одном объеме одного или двух необлучаемых болметров. Излучение попадает на приемник через окошко, отвечающее требованиям спектрального пропускания (рис. 9.38, I). Чувствительность приемника может быть существенно (до 3,5 раза) улучшена, если вместо окошка использовать толстую сферическую линзу (рис. 9.38, II). Для повышения чувствительности или уменьшения времени установления показания можно, так же как у термоэлектрических приемников, пространство между окошком и приемником заполнять водородом, гелием или ксеноном и криптоном.

В качестве материала для болметров используют металлы с высоким температурным коэффициентом электросопротивления, например никель, но чаще

висмут, сурьму или германий, а также термисторы (см. 3.2.2.1). Там, где это возможно, вещество резистора наносят тонким слоем на тонкую изолирующую фольгу, например анодированную алюминиевую. Благодаря этому получают малое время установления показаний. Оно может быть еще меньше, если тонкослойный приемник излучения укреплен на массивном держателе, так как благодаря этому он очень быстро принимает температуру поверхности держателя (см. 7.3.1, термометры поверхностного действия). Такие болометры обладают высокой механической прочностью и временем установления показаний от 5 мс до 1 с.

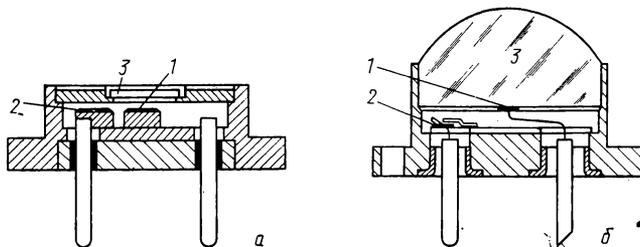


Рис. 9.38. Лучевой болометр на термисторах (Barnes):

*а* — с входным окошком; *б* — с входной линзой; 1 — термистор-приемник; 2 — компенсационный термистор; 3 — окошко или линза

Термическим приемником излучения, поглощающим инфракрасное излучение независимо от длины волны в диапазоне до 30 мкм, является двухфазный анизотропный эвтектический полупроводник смешанного типа  $\text{InSb}-\text{NiSb}$ . В этом материале фаза  $\text{NiSb}$  с почти металлической проводимостью в виде тонких параллельных игл заключена в полупроводниковой матрице  $\text{InSb}$ . Для измерения теплового излучения используют температурно зависимую электропроводность в направлении, перпендикулярном к направлению игл [9.51; 9.57]. С помощью такого приемника излучения при комнатной температуре можно заметить изменение температуры в  $1/3$  К. Поскольку при длине волн менее 7 мкм еще действует квантовый эффект — фотопроводимость, эти приемники излучения называют фотоболометрами.

### 9.7.3.2.3. Пирозлектрические TGS-приемники излучения

К термическим приемникам излучения относятся и пирозлектрические TGS-приемники, основным элементом которых являются ферроэлектрические кристаллические пластины из триглицинсульфата (TGS) [9.47, гл. 6]. Такие кристаллы обладают спонтанной температурно зависимой поляризацией. Изменения температуры вызывают появление электрических зарядов на двух металлических электродах, расположенных перпендикулярно к оси поляризации кристалла. Напряжение, возникающее на электродах при облучении кристаллической пластины, является мерой падающего на приемник потока излучения. Чувствительность таких детекторов постоянна от ультрафиолетового (0,3 мкм) до длинноволнового инфракрасного (300 мкм) излучения. Пределы спектральной чувствительности определяются в основном пропускной способностью материала окошка. Относительная чувствительность максимальна при комнатной температуре; при  $50^\circ\text{C}$  она очень быстро снижается до нуля в результате деполяризации. Так как детектор действует как емкостный источник напряжения, напряжение начального смещения не требуется. Избирательность  $D^*$  мало изменяется до частоты 1000 Гц, вследствие чего по этому параметру TGS-приемники при высокой частоте модуляции превосходят все другие термические приемники излучения. Однако чувствительность их снижается с 2300 В/Вт при 12,5 Гц до 400 В/Вт при 90 Гц.

Благодаря тому, что чувствительная поверхность болометров может быть очень малой, с их помощью можно измерять очень малые объекты, даже имеющие

температуру, близкую к комнатной. Кроме того, геометрические размеры болометров могут быть выбраны в зависимости от решаемой задачи. Например, для определения температуры тонкой проволоки приемник излучения может иметь большую длину при малой ширине. Необходимо также отметить, что тонкие металлические слои приемника излучения можно не чернить, так как тонкие пленки хорошо поглощают инфракрасное излучение.

#### 9.7.3.2.4. Биметаллические и пневматические приемники излучения

В пирометрии излучения можно использовать и тепловое расширение металлов. При не очень высоких требованиях к точности измерения в качестве приемника излучения могут быть применены биметаллическая спираль или расширяющаяся при нагревании тонкая металлическая лента, закрепленная с одной стороны.

*Пневматические приемники излучения.* У пневматических приемников излучения измеряемое излучение нагревает замкнутый газонаполненный объем. Если в облучаемой плоскости установить металлизированную пластмассовую мембрану, то изменение давления, вызванное повышением температуры, приведет к изменению положения мембраны, являющейся одним из электродов конденсатора. Мощность излучения может быть тогда определена как изменение емкости конденсатора [9.58]. В элементах Голэя [9.59] перемещение зеркальной мембраны при изменении давления отклоняет световой луч, падающий на фотозэлемент. Этот метод измерения температуры по излучению с использованием принципа фотоэлектрического усилителя отличается высокой чувствительностью при времени установления показаний в несколько миллисекунд.

Термические приемники излучения отличаются независимостью от длины волны вплоть до длинноволнового ИК-излучения. При промышленных измерениях температур выше  $900^{\circ}\text{C}$  с помощью пирометров излучения с термоэлектрическими приемниками энергетическая яркость излучения обычно определяется методом непрерывного облучения с непосредственным подключением к приемнику излучения измерительных приборов. Если измерительный прибор подключен к пирометру через измерительный преобразователь, то с помощью болометрического пирометра можно очень точно измерять температуры вплоть до  $20^{\circ}\text{C}$ . Поскольку при измерениях методом переменного облучения на порог чувствительности пирометра оказывают влияние шумы усилителя, этот метод чаще всего применяют при не очень высоких требованиях к точности измерений, тем более что усилители переменного тока сравнительно недороги.

Для достижения наилучшей чувствительности по температуре пирометров излучения с термическими приемниками в любом случае необходимо, чтобы поверхность приемника излучения и оптическое увеличение были как можно меньше, а апертура оптической системы была как можно больше и чтобы приемник излучения развивал возможно большую мощность [9.52].

#### 9.7.3.2.3. Фотоэлектрические (квантовые) приемники излучения

Фотоэлектронные приемники излучения отличаются очень малой инерционностью, однако в отличие от термических приемников они чувствительны в ограниченном диапазоне длин волн инфракрасного излучения.

Каждый квант излучения ( $h\nu = 1$  фотон) может выбить или перевести в кристаллической решетке из валентной зоны в зону проводимости только один электрон. Достижимый квантовый выход, т. е. отношение числа освобожденных электронов к числу фотонов, почти всегда меньше единицы. Чувствительность приемника к излучению, которая определяется числом электронов, ставших свободными за счет энергии излучения, зависит от длины волны. Она быстро уменьшается от максимума с увеличением длины волны до граничной, так как энергия фотонов становится недостаточной, чтобы выбить электрон или перевести его в зону проводимости. С уменьшением длины волны чувствительность снижается медленнее. Это происходит потому, что при постоянной энергии излучения из-за увеличения

энергии отдельных фотонов их число уменьшается и уменьшается число свободных электронов (см. рис. 9.35). Поэтому квантовые приемники являются явно выраженными селективными приемниками излучения.

#### 9.7.3.2.3.1. Фотоэлементы и фотоумножители

В фотоэлементах, действие которых основано на внешнем фотоэлектрическом эффекте, измеряемое излучение через сеточный или кольцевой анод попадает на чувствительный к излучению слой—фотокатод. Электроды помещены в вакуумированный или наполненный газом с низким остаточным давлением стеклянный или кварцевый баллон. При напряжении между электродами 100 В электроны, выбитые излучением, движутся к аноду. Так как в газонаполненных фотоэлементах в результате столкновений выбитых излучением электронов с молекулами газа образуются вторичные свободные электроны, ток в этих элементах больше, чем в вакуумных. Благодаря этому они могут быть использованы для чувствительных индикаторов излучения, однако пропорциональность между энергетической яркостью излучения и выходным током у них хуже, чем у вакуумных элементов. Поскольку фотоэлементы имеют очень высокое внутреннее сопротивление, величину фототока  $I_{ph}$  определяют по падению напряжения на сопротивлении нагрузки компенсационным методом или с помощью усилителя с высокоомным входом [9.60].

В фотоумножителях, называемых также умножителями на вторичных электродах или фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) [9.61], между чувствительным к излучению катодом и анодом расположено большое число параллельных электродов — динодов. Выбитый из катода электрон, попадая на первый положительно заряженный динод, выбивает вторичные электроны. Эти электроны падают затем на следующие диноды, каждый из которых имеет постоянно повышающийся положительный потенциал. Благодаря этому ток  $I_{ph}$  возрастает в геометрической прогрессии. В зависимости от конструкции фотоумножители имеют от 5 до 12 динодов. Общее напряжение между анодом и катодом, составляющее от 1000 до 2000 В, разделено на несколько ступеней. Напряжение ступеней должно поддерживаться постоянным, чтобы нежелательные колебания напряжения в сети не оказывали влияния на работу прибора. Катодный фототок  $I_{kph}$  усиливается примерно в  $10^4$ — $10^6$  раз. Максимальный анодный фототок  $I_{ph}$  составляет около  $10^{-4}$  А. Ток в необлучаемом состоянии (темновой ток), возникающий из-за тепловой эмиссии электронов  $I_0$ , составляет от  $10^{-8}$  до  $10^{-12}$  А. Излучательный эквивалент темнового тока (частное от деления темнового тока  $I_0$  на чувствительность  $s$ ) равен  $10^{-8}$ — $10^{-12}$  Вт. Время установления показаний составляет  $10^{-4}$ — $10^{-9}$  с, допустимая температура окружающей среды при длительной эксплуатации равна  $50^\circ\text{C}$ . При охлаждении относительная чувствительность  $s(\lambda)_{rel}$  незначительно сдвигается в сторону более коротких волн (рис. 9.35, а, кривая 4); одновременно чувствительность  $s$  повышается до  $0,5\%/K$  [9.62].

У фотоумножителей д-ра Маурера (Нейффен, тип Vp11 и vAe, рис. 9.35, а, кривая 3) чувствительность  $s$  при длине волны 0,38 мкм равна приблизительно 4100 А/Вт, а при длине волны 0,80 мкм — около 2200 А/Вт. Излучательный эквивалент темнового тока при длине волны 0,38 мкм составляет примерно  $0,9 \cdot 10^{-9}$  Вт, а при длине волны 0,80 мкм  $1,6 \cdot 10^{-9}$  Вт. Из графика относительной чувствительности можно найти соответствующее значение для каждой длины волны. Фотоумножитель RCA 1 P 21 «Radio Corp. of America», Нью-Йорк, имеет почти неизменную максимальную чувствительность в диапазоне длин волн от 0,38 до 0,50 мкм (рис. 9.35, а, кривая 4).

Влияние темнового тока и световых помех может быть устранено применением компенсационных устройств. При использовании метода модулированного облучения эти помехи незаметны. В качестве высокочувствительных фотокатодов применяют полупроводники из окиси цезия с внедренными атомами серебра и цезия, нанесенные на серебряную подложку с адсорбированными поверхностью атомами цезия. Фотокатоды, состоящие из соединений цезия, рубидия или лития с элементами пятой группы периодической системы, преимущественно с сурьмой и висмутом, имеют очень высокий квантовый выход при максимальной спектральной чувствительности  $s(\lambda)_{max}$  и при минимальном темновом токе.

Вторичная эмиссия динодов зависит в основном от их состава, состояния поверхности, а также от угла падения излучения к поверхности. Диноды состоят из антимонида цезия ( $\text{SbCs}_3$ ) с адсорбированными на поверхности атомами цезия и из сплавов меди, алюминия и серебра с бериллием. Кроме того, диноды изготовляют из серебряномагниевого или алюминиевого сплавов с тонким слоем магния на поверхности.

#### 9.7.3.2.3.2. Приемники инфракрасного излучения

Фотоэлектрические инфракрасные приемники, использующие внутренний фотоэлектрический квантовый эффект, отличаются высокой чувствительностью в ограниченной инфракрасной области спектра. Их применяют преимущественно для измерений при низких температурах. Благодаря очень малой постоянной времени инфракрасные фотоэлектрические приемники позволяют регистрировать очень быстрые изменения температуры (см. табл. 9.9, рис. 9.35, б) [9.41; 9.46—9.48; 9.63—9.70].

##### 9.7.3.2.3.2.1. Нелегированные истинные полупроводники-фоторезисторы

Применение фоторезисторов в качестве приемников излучения основано на изменении электросопротивления полупроводников без запирающего слоя при их облучении. Такие высокочистые нелегированные полупроводники (истинные полупроводники) при низких температурах являются изоляторами. С повышением температуры в результате термической активации колебаний решетки их проводимость увеличивается. При наложении рабочего напряжения  $U_a$  их сопротивление покоя  $R_0$  становится меньше, ток покоя  $I_0$  возрастает. Для того чтобы электроны могли перейти из валентной зоны в зону проводимости, энергия поглощенных фотонов должна быть или равна ширине запрещенной зоны, или быть больше нее, т. е. разности энергий  $\Delta E$  между верхней границей валентной зоны и нижней границей зоны проводимости полупроводника. Поэтому максимальная чувствительность приемника достигается при длине волны, определяемой соотношением  $\Delta E = h\nu$ . Так как наименьшая ширина запрещенной зоны чистых полупроводников составляет около 0,10 эВ, наибольшая достижимая граничная длина волны  $\lambda_{Gr}$  для таких полупроводников равна примерно 10 мкм. При понижении температуры ток покоя и уровень шумов становятся меньше. Поэтому, охлаждая детектор, можно увеличить фототок и снизить величину наименьшего различимого сигнала. Естественные приемники излучения из сульфида кадмия  $\text{CdS}$  (соединение типа  $A^{IV}B^{VI}$ ) чувствительны к излучению в видимой области спектра. Фоторезисторы из соединений типа  $A^VB^{VI}$ , таких как  $\text{PbS}$  с граничной длиной волны  $\lambda_{Gr}$  до 5 мкм,  $\text{PbSe}$  с  $\lambda_{Gr}$  до 5,6 мкм,  $\text{PbTe}$  с  $\lambda_{Gr}$  до 6 мкм, имеют постоянную времени менее  $100 \cdot 10^{-6}$  с при комнатной температуре. Для их питания используют ток низкой частоты. Описанные детекторы отличаются от термопар и болометров более высокой чувствительностью и значительно меньшей постоянной времени. Влияние колебаний температуры окружающей среды исключается тем же способом, что и у болометрических приемников излучения.

Фоторезисторы из соединений типа  $A^{III}B^V$  таких, как  $\text{InSb}$  или  $\text{InAs}$ , при комнатной температуре чувствительны в глубокой инфракрасной области спектра до длины волны 7,5 мкм и имеют постоянную времени менее  $1 \cdot 10^{-6}$  с. Охлажденный до 77 К приемник из  $\text{InSb}$  имеет граничную длину волны  $\lambda_{Gr} = 5,8$  мкм. Благодаря оптимальному при этой температуре отношению шум—сигнал такие резисторы можно применять при частоте 20 Гц и выше. Можно последовательно соединить в батарею до 100 отдельных миниатюрных элементов.

##### 9.7.3.2.3.2.2. Приемники излучения из примесных полупроводников (фотодиоды, фототранзисторы, фотоэлементы)

Если в решетку полупроводникового кристалла внедрить посторонний атом, то получится примесный полупроводник. Примеси с более высокой валентностью, чем у чистого полупроводника, отдают избыточные электроны и называются донорами, а примесные полупроводники в этом случае являются полупроводниками

*n*-типа. Их проводимость возрастает благодаря наличию избыточных носителей отрицательных зарядов. Если же чистый полупроводник легирован примесью с более низкой валентностью, то примесные атомы являются акцепторами, запирающими валентные электроны полупроводника. При этом возникают дырки, которые можно рассматривать как носители положительных зарядов. Проводимость полупроводника с акцепторной примесью, называемого полупроводником *p*-типа, также выше, чем чистого полупроводника. Такие *n*- или *p*-полупроводники при комнатной температуре имеют повышенную собственную проводимость, которая может быть значительно уменьшена охлаждением до низкой температуры. Поскольку у них ширина запрещенной зоны значительно меньше, чем у чистых полупроводников, энергия излучения, необходимая для образования свободных носителей заряда, существенно уменьшается. Поэтому на приемниках излучения из полупроводников *n*- или *p*-типа можно получить достаточную чувствительность в диапазоне с граничной длиной волны до 130 мкм. Такие приемники имеют также очень малую постоянную времени (от 1 с до 70 мс).

Среди приемников излучения из примесных полупроводников кристаллы германия, легированного трех- или пятивалентными атомами, имеют граничную длину волны при комнатной температуре  $\lambda_{Gr} = 1,8$  мкм. Граничная длина волны  $\lambda_{Gr}$  германия, легированного золотом, при 77 К достигает 10 мкм. Легирование ртутью может сдвинуть  $\lambda_{Gr}$  при 35 К до 15 мкм, а легирование медью — до 30 мкм при 4,2 К.

Фоторезисторы из германия с добавкой индия чувствительны в диапазоне длин волн до 100 мкм. Постоянная времени таких приемников излучения равна  $1 \cdot 10^{-6}$  с или менее.

**Фотодиоды, фототранзисторы и фотозлемнты.** Фотодиоды представляют собой приемники излучения из примесных полупроводников. В монокристалле полупроводника путем легирования получают переходную зону между областями с *n*- и *p*-проводимостью. При приложении рабочего напряжения переходная зона в зависимости от полярности напряжения или пропускает ток, или служит запирающим слоем. Если *n*-область имеет положительный потенциал по отношению к *p*-области, то переходная зона обедняется носителями зарядов, возникает запирающий слой, проводимость кристалла падает. Небольшой ток в направлении запираения (обратный ток) вызван в основном термическими флуктуациями. Он возрастает с повышением температуры. При прямой полярности напряжения *pn*-переход имеет хорошую проводимость, ток в прямом направлении значительно больше, чем в обратном.

Если при приложенном обратном напряжении облучить *pn*-переход, то при достаточной энергии фотонов в переходном слое возникает пары носителей заряда (электрон—дырка). В результате ток возрастает пропорционально энергетической освещенности. Эффективная поверхность таких фотодиодов очень мала, так как приемник облучается параллельно переходному слою. Переходная емкость фотодиодов настолько мала, что их чувствительность выше 100 Гц не зависит от частоты, а постоянная времени составляет всего несколько наносекунд. Помимо германиевых фотодиодов, наиболее предпочтительны фотодиоды из кремния благодаря лучшей стабильности их свойств. Фотодиоды из сурьмы необходимо охлаждать до 77 К.

Более высокой чувствительностью в сочетании с очень малой постоянной времени и переходной емкостью и поэтому независимостью от частоты обладают плоскостные диоды, которые облучаются нормально к плоскому переходному слою. У таких фотодиодов переход образуется между прозрачным металлическим электродом и полупроводником, укрепленным на металлической подложке (торцовый элемент). При приложении напряжения в обратном направлении фототок возрастает линейно с увеличением энергетической освещенности приемника излучения.

Электроды фотодиодов чаще всего имеют низкое сопротивление, поэтому температуру определяют по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении, которое для учета небольшой температурной зависимости фототока состоит частично из терморезистора. Зависимость тока покоя от окружающей температуры можно компенсировать с помощью необлучаемого компенсационного диода или с помощью терморезистора. При измерении методом периодического облучения и усиления фототока это температурное влияние незаметно.

**Фототранзистор** представляет собой полупроводниковый кристалл с  $n-p-n$ -переходом. При приложении напряжения один из  $n-p$ -переходов открыт, другой заперт. При облучении облегчается прохождение электронов через  $p$ -зону, в результате чего дополнительно к первичному фототоку возникает экстраток и происходит усиление тока более чем на порядок. Фототок возрастает с увеличением интенсивности облучения более быстро, чем по линейному закону. Благодаря механизму усиления постоянная времени фототранзисторов меньше, чем фотодиодов, их емкость больше, а частотная независимость слабее.

**Фотоэлементы** представляют собой полупроводники с запирающим переходным слоем, у которых при облучении возникает фото-э. д. с. Они действуют как источники тока и не требуют приложения рабочего напряжения. Их преимуществом по сравнению с фотодиодами является отсутствие тока покоя. Однако постоянная времени фотоэлементов намного больше, чем фотодиодов (табл. 9.9, № 8 и 9).

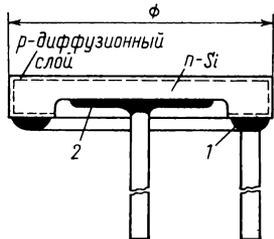


Рис. 9.39. Устройство кремниевого фотоэлемента: 1 — кольцевой контакт; 2 — контакт, наплавленный после удаления части диффузионного слоя

Необлучаемые фотоэлементы генерируют диффузионное напряжение  $U_d$ , вызванное диффузией электронов и дырок из переходного слоя в соседние зоны полупроводникового кристалла с  $n$ - и  $p$ -проводимостью и обратно. При облучении оно уменьшается, и в полупроводнике возникает фотонапряжение  $U_{ph}$ , которое может быть измерено на электродах как фото-э. д. с. или напряжение холостого хода  $U_d$ .

Благодаря тому, что можно получить монокристаллы кремния очень высокой чистоты, в кремневых фотоэлементах электроны и дырки могут диффундировать на большие расстояния перпендикулярно к переходному слою, поэтому такие элементы имеют более высокие диффузионное напряжение и фотонапряжение, чем германиевые. Из-за больших диффузионных расстояний кремневые фотоэлементы имеют большую эффективную поверхность. У них отсутствует явление усталости, благодаря чему они отличаются очень высокой стабильностью. Если сопротивление нагрузки велико, фототок  $I_{ph}$ , возрастающий с увеличением энергетической освещенности, проходит через  $p-n$ -переход. Напряжение холостого хода возрастает с повышением температуры до некоторого предельного значения, уменьшающегося пропорционально логарифму энергетической освещенности, тогда как ток короткого замыкания, не зависящий от температуры, увеличивается почти линейно с увеличением энергетической освещенности в широких пределах. Из-за относительно малого внутреннего сопротивления кремниевого фотоэлемента пропорциональность между энергетической освещенностью и фототоком сохраняется при достаточно большом сопротивлении нагрузки.

Кремниевый фотоэлемент (рис. 9.39) состоит из кремниевого диска с  $p-n$ -слоем на облучаемой поверхности (торцевой элемент). Такие элементы изготавливают следующим образом: на поверхности основного материала, например с  $n$ -проводимостью, методом диффузионного насыщения из газовой среды, содержащей пары легирующего компонента, создается слой толщиной около 2 мкм с  $p$ -проводимостью.

**Селеновые фотоэлементы** с металл-полупроводниковым контактным слоем применяются в основном для оптических измерительных приборов и измерителей освещенности. При большой облучаемой поверхности их сопротивление настолько мало, что их можно подключать непосредственно к измерительному прибору. Однако им присущи как обратимые, так и остаточные усталостные явления, снижающие их чувствительность. При малой энергетической освещенности фототок медленно возрастает до конечного значения. При питании переменным током фототок снижается с увеличением частоты. Предельная частота составляет около 10 кГц. Граничная длина волны  $\lambda_{Gf}$  может сдвигаться в пределах 0,75—0,95 мкм в зависимости от степени легирования. При применении фильтров можно получить спектральную чувствительность, аналогичную спектральной чувствительности глаза.

#### 9.7.3.2.3.3. Фотоэлектроманнитные и оптико-индукционные приемники излучения

В приемниках излучения, основанных на фотоэлектроманнитном эффекте (РЕМ-детекторы) и на эффекте оптической индукции Эттингаузена—Нернста (ОЕН-детекторы), используют полупроводники, помещенные в магнитное поле постоянного магнита, направленное перпендикулярно к излучению. В таком полупроводнике возникает напряжение в направлении, перпендикулярном к направлению падающего излучения и магнитного поля. Оба вида приемников излучения могут работать при комнатной температуре.

РЕМ (ФЭМ)-детектор, чаще всего полупроводниковое соединение InSb, основан на внутреннем фотоэлектрическом соединении InSb. Возникающие при облучении носители заряда (электроны и дырки) диффундируют в кристалле и отклоняются магнитным полем. В результате возникает фотоэлектроманнитное напряжение. Граничная длина волны  $\lambda_{G}$  для InSb ФЭМ-детекторов равна 7,2 мкм, максимальная чувствительность достигается при длине волны 6,2 мкм.

ОЕН-детектор [9.71] представляет собой термомагнитный инфракрасный приемник излучения, состоящий из уже описанного двухфазного анизотропного полупроводника смешанного типа InSb—NiSb. Кристалл толщиной около 100 мкм, укрепленный на подложке с хорошей теплопроводностью, расположен между полюсными наконечниками постоянного магнита. При облучении в кристалле в направлении, перпендикулярном к направлению излучения, возникает температурный градиент, который при наложении магнитного поля приводит к появлению напряжения Эттингаузена—Нернста. Такой приемник излучения чувствителен к инфракрасному излучению с длиной волны до 50 мкм и более. Постоянная времени составляет всего около 100 мкс, так как температурный градиент, используемый для измерений, простирается на длину всего 100 мкм.

При более коротких длинах волн (короче 7 мкм) становится заметным дополнительный РЕМ-эффект, величина которого может превосходить напряжения ОЕН-эффекта. Поэтому при длинах волн менее 7 мкм в результате наложения двух эффектов постоянная времени получается равной около 10 мкс, если излучение модулировано высокой частотой. При напылении на поверхность детектора SiO возрастает чувствительность в длинноволновой части спектра с максимумом между 8,5 и 11 мкм, тогда как без напыления высокая чувствительность достигается в области ниже граничной длины волны InSb (7 мкм). Для измерений излучения в диапазоне длин волн менее 7 мкм ОЕН-детекторы менее чувствительны, чем РЕМ-детекторы. С понижением температуры объекта чувствительность РЕМ, детекторов снижается, и при температурах от 20°С до —20°С ОЕН-детекторы имеют меньший порог чувствительности по температуре ( $T_{\min}$ ), чем РЕМ-детекторы.

#### 9.7.3.3. КОНСТРУКЦИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Обычными энергетическими пирометрами излучения можно измерять как высокие температуры, выше 5000°С, так и низкие, до —100°С. Для измерения температур выше 1000°С чаще всего используют энергетические пирометры излучения, к выходу которых могут быть подключены показывающие приборы, самописцы или регуляторы — магнитоэлектрические или компенсационные приборы. В качестве приемников излучения служат терморпары (термобатареи), а также кремниевые или германиевые фотоэлементы.

Пирометры этого типа, предназначенные для измерений в интервале температур 400—600°С, снабжены промежуточными усилителями постоянного тока; при измерениях более высоких температур к ним могут быть подключены измерительные или регулирующие приборы с нормированным выходным сигналом 0—20 мА.

Для измерения более низких температур используют пирометры с высокочувствительными термическими приемниками излучения, такими как термобата-

Т а б л и ц а 9.10

## Характеристики энергетических пирометров и пирометров спектрального отноше

Фирма-изготовитель	Фирменное обозначение	Приемник излучения	Оптика	Рабочий диапазон длин волн или $\lambda_e$ , мкм
1	2	3	4	5
Siemens AG, Карлсруэ	Ардометр 20	Термобатарея	Кварцевая линза Стеклоанная линза	0,3—4 0,4—2,7
	Ардометр 50	Термобатарея	Кварцевая линза Стеклоанная линза	0,3—4 0,4—2,7
	Ардометр 50N	Термобатарея	Кварцевая линза Стеклоанная линза	0,3—4 0,4—2,7
	Ардометр G1	Термобатарея	LiF-линза InAs-фильтр	3,8—8
	Ардонокс		Вогнутое зеркало Пленочное окно	0,3—20
	Ардонокс G1		Вогнутое зеркало LiF-окно InAs-фильтр	3,8—8
	Ардофот 20	Si-фотоэлемент	Стеклоанная линза	0,5—1,1
	Ардофот 50	Si-фотоэлемент	То же	0,5—1,1
	Ардофот 50N	Si-фотоэлемент	То же	0,5—1,1
	Ардокол (пирометр спектрального отношения)	2Si-фотоэлемента	То же	0,888—1,034
Dr. Maurer GmbH Нойфен	TMS-1B	SEV Тип Vp11Ad	Стеклоанный ахроматический объектив	0,7—1,0
	TM-3 (стандарт)	SEV Vp11Ad	То же	0,7—1,0

ния, изготавливаемых различными фирмами

Диапазон измерения, °С		Время установления показаний (98%), с	Расстояние/диаметр излучателя $a/D$ , мм/мм	Показатель вибро-вания $d$	Допустимая температура корпуса, °С
нижний	высший				
6	7	8	9	10	11
400—840 600—1200	500—1000 1000—2000	2,1/ 2,1	300/33 300/33; 1400/28	9 9; 20	0—100 0—180
500—1000 600—1200	600—1200 1000—1200	2,1 2,1	500/30; 1400/28	17; 50	0—100 0—180
500—1000 700—1350	600—1200 1000—1200	2,1 2,1	100/20; 400/36	5; 11	0—100 0—180
500—1500		2,1	300/33; 2500/125	9; 20	0—100
(-40)— (+20) 0—60	— 100—600	2,1 2,1	100/90; 2500/250	1,1; 7	(-10)— (+30) 20—50
200—600	400—800	2,1	100/90; 2500/350	1,1; 7	20—50
500—700	1200—1750	0,001	300/33; 1000/50	9; 20	10—80
600—850	1200—1750	0,001	500/30; 1400/28	17; 50	10—80
600—850	1200—1750	0,001	100/20; 200/4	5; 50	10—80
а) 700— 1100 б) 800— 1200	в) 900— 1400 г) 1400— 2000	0,04	а) 300/33 б) 500 в) 500 г) 1100	а) 9 б) 20 в) 20 г) 50	10—60
500—555	2950—4000	0,02 (при вклю- чении)	50/0,2; ≥50 000	250; 660	20—40
500—555	2950—4000	0,00001 (с элек- тронным осцилло- графом)	50/0,02; ≥50 000	150; 160	20—40

1	2	3	4	5
Dr. Mauger GmbH Нойффен	TM-22	SEV Тип Vp11Ad	Стекланный ахроматический объектив	0,7—1,0
Heimann GmbH Висбаден— Дотихайм	KT13/1	Vi-болометр	KRS-5 линза	4—40
	KT13/2	Vi-болометр	CaF <sub>2</sub> -линза и фильтр	0,6—5,5
	KT14	Vi-болометр	Ge-линза	2—20
			CaF <sub>2</sub> -линза	0,3—5,5
	KT16	Vi-болометр	Ge-линза	2—20
	KT4 (дифференциальный)	Vi-болометр	Зеркальная оптика Кассегрейна с фильтром	0,6—40 также 8—14 0—14
	KT41	Vi-болометр	Ge-линза	2—20
	KT26	Vi-болометр	KPS-5-оптика и фильтр	7—35
	KT21	Vi-болометр	CaF <sub>2</sub> -линза	6,65—6,95
	KT22	Vi-болометр	CaF <sub>2</sub> -линза	7,9—8,2
	KT23	Vi-болометр	CaF <sub>2</sub> -линза	4,8—5,5
	KT24	Vi-болометр	CaF <sub>2</sub> -линза	>8

Продолжение табл. 9.10

6	7	8	9	10	11
530—645	2200—3550	0,005 с быстро- действую- щим при- бором	50/0,2; ≥50 000	250; 660	20—40
(—50)— (+20)	100—200	0,3; 1,5	200/32; 2000/200	6,3;	0—40
50—300	500—1000	0,3; 1,5	200/22; 2000/85 также 50/4; 200/20	9,1; 23 также 12,5; 10	0—40
0—50	200—900, в специ- альном исполнении до 2000	1,5	200/22; 2000/100 также 80/4;	9,1; 20 также 20;	20—40 (60)
50—300 *	400...800	1,5	200/20 также 18/1,5; 36/12	10 также 12; 3	
0—50 (—50)—50	0—400 300—400 (...2000) шкала линейная)	1,5; 7	Как КТ14	Как КТ14	10—40
Для измерения яркости (—100)—0 (шкала линейная)	300—400	От 0,15 до 7 по выбору	200/2; 100 м/1 м 200/1; 100 м/0,5 м	100 100 200 200	10—40
25—40		1,5	36/12; 27/6 20/1,5	3; 4,5; 13,5	15—35
0—100	200—500	0,3; 1,5	200/32; 2000/200 также 32/4; 200/60	6,3 10 также 8; 3,3	0—40
0—150	100—300	2	200/32; 1000/100	6,3; 10	10—40
0—150	100—300	2	32,4; 200/60	8; 3,3	10—40
300—600	1000—1600	0,3	80/4	20	0—40
(—20)—60		1,5	40/4	10	10—40

1	2	3	4	5
Hartmann and Braun Fim	Пиррадио	Термобатарея	Стекло́нная линза	0,4—2,8 0,4—2,8
Braun-Electronic Deutsche Gulton GmbH, Франкфурт	Инфратерм (линеаризованная шкала, сменная оптика) IP-1	PbS-фоторезистор	Линза кварц-интрасил	1—3
	IS-2	Si-фотоэлемент	Кварцевая линза	0,6—1,1
	IS-3	Si-фотоэлемент	То же	0,6—1,1
Ultrakust Ruhmannsfelden	Термофил 4465	Термобатарея с КВг-окном	Позолоченный металлический конус, закрытый пленкой	2—20
	4465-1	То же	То же	2—20
	4465-2	То же	То же	2—20
	4465-3	То же	Вогнутое зеркало	2—20
	4465-4 (линеаризованная шкала, цифровой отсчет)	То же	Вогнутое зеркало с КВг-окном	2—20
Pyro-Werk, Ганновер	Пиро (переносный)	Термопара	Стекло́нная линза	0,4—2,8
	P501/D	2 термопары	То же	0,4—2,8
	P501/S	Термопара	То же	0,4—2,8
	P501/N	Термопара	Кварцевая линза	0,3—3,8
	P501/Fi	Термопара	Стекло́нная линза с фильтром из CO <sub>2</sub> и водяного пара	0,35—0,6
	Кустотерм	Термобатарея	Зеркальная оптика	0,8—9,0

Продолжение табл. 9.10

6	7	8	9	10	11
700—1350 700—1350	1000—2000 —	8 или 3 1	500/25	20	0—100
65—300	600—3000	0,1	60/0,25; 60/0,35; также 1000/7,5; также 3000/14; 3000/40	240; 170 175; 62 214; 76	0—45
550—1000	1100—3000	0,001	70/1; 70/0,2 также 1300/20; 1300/3,8 также 5600/13,5; 5600/16,5	70; 350 65; 340 415; 340	0—75
550—1800	—	0,05	150/2,3; 1300/20; 3000/46	65	0—60
0—120	0—320	0,5	16/14; 1500/370	1,1; 4	10—50
0—200	0—600	0,5	70/32; 1500/370	2,1; 4	10—50
0—120	0—320	0,5	18/6; 40/10	3; 4	10—50
0—120	0—600	0,5	100/60; 2000/300	1,5; 7	10—50
(—60)—500	—	0,5	127/5×12	10	0—50
300—700	1000—2000	4	600/40; 5000/200	15; 25	10—40
600—1000	1200—2000	5	600/24; 5000/200	25; 25	20—40
600—1000	1200—2000	1	600/24; 5000/200	25; 25	20—40
300—500	600—1000	5	600/30; 5000/250	20; 20	20—40
700—1000	1300—2000	5	600/30; 5000/250	20; 20	20—40
20—200	200—600	0,5	20/26; 2000/323	0,77; 6,2	10—40

1	2	3	4	5
Uher AG Вена	U Pyr/МК-120	Ge-фотоэлемент	Визирная труба без объектива	1,5
	МК110	Ge-фотоэлемент		1,5
	35BG3	Ge-фотоэлемент	Стеклянная лин- за	1,5
	35BG5	Si-фотоэлемент	То же	0,8
	35BU5	Si-фотоэлемент	То же	0,65
	35BN1	PbS-фоторезистор	То же	2,5
Barnes Engineering Comp. Стэнфорд (Dr. Stevogt, Вайльхайм)	Термал Мастер IT-4A IT-4B	Термисторный бо- лометр с гиперим- мерсионной лин- зой	Ge-линза и фильтр	8—14 9,5—11,5
	IT-4C			3,4—3,5
	IT-4D			7,7—8,1
	IT-4E			5,08—5,13
	IT-400A IT-400B IT-400C IT-400D	Термобатарея	Ge-линза	7—20 8—10 3,1—3,8 4,5—5,6
	Темп Трон IT-7A	Si-фотоэлемент	Стеклянная лин- за	0,7—1,0
	IT-7B	PbS-фоторезистор	Стеклянная лин- за и фильтр	1,9—2,6

Продолжение табл. 9.10

6	7	8	9	10	11
150—280	250—400	0,005	25/17; 500/65	1,5; 7,7	0—40
350—550 500—900 800—1400	800—900 700—1200 1100—1700	0,005 0,005 0,005	500/20 500/8 500/6	25 62 100	0—40
350—600 или 500—1700	1100—1700 или 500—2700	0,001	5000/50; 2000/1,75 также $\geq 1800$	100; 114 также 710	0—40
700—1000 или 750—2100	1100—1700 или 900—2700	0,001	5000/50; 200/1,75 также $\geq 1000$	100; 114 также 710	0—40
900—1300 или 900—2500	1200—1700 или 1100—2700	0,001	5000/50; 200/1,75 также $\geq 1800$	100; 114 также 550	0—40
150—280 или 150—400	400—1000 или 250—1400	0,1	5000/300; 350/20 также $\geq 1100$	17; 17 также 80	0—40
(-40)— (+30)	160—300	0,1 (также 0,03 и 1)	25/38; 75/50	0,66 1,5	0—40
30—110	200—400		2500/1400	1,8	
30—75	170—300		также 100/75; 250/30; 2500/380	также 1,33; 8,3; 6,6	
30—150	700—1700		также 25/13; 250/25; 2500/140	также 1,9; 10; 17; 9	
0—125 50—300 150—400 100—2000	100—400 — — 1000—2500	1	$\geq 25$	60 также 120	0—60
500—1000 100	1000—3000	0,1 (также 0,03 и 1)	25/45; 75/35; 140/13; 250/38	0,56; 9; 11; 6,6	0—40
100—520	500—2500	0,1 (также 0,03 и 1)	25/13; 75/11; 203/46; 7500/150	2; 6,8; 4,4 50;	0—40

1	2	3	4	5
Barnes Engineering Comp. Стэнфорд (Dr Slevogt, Вайльхайм)	IT-7C	InAs-фоторезистор	Кварцевая линза и фильтр	3,4 или 2,3—3,9
	IT-7D	InSb-фоторезистор	Ge-линза и фильтр	5,0—6,2
	PRT-5 (переносный прецизионный)	Иммерсионный термисторный бо- лометр	То же	8—14 или 9,5—11,5 14—16
	PRT10 PRT11 (переносные)	Вакуумированная термобатарея	Вогнутое зеркало с фильтром	6,5—20
	Прибор для исследователь- ских целей 12-521	Иммерсионный Ge полупроводнико- вый	Зеркальная опти- ка Кассегрейна с фильтром	6,5—20
	Оптический пирометр EP-1	Фотоумножитель	Стеклозная лин- за с красным или синим филь- тром	0,62 или 0,37
H. G. Wer- ner and Co, Штутгарт	HSA-1E	Терморезистор	Параболическое зеркало	2—20
	—8E	Терморезистор	То же	2—20
	—4E (стандарт)	Терморезистор	То же	2—20
	—6E	Терморезистор	То же	2—20
	—1G	Терморезистор	То же	4,8—20
	—4G	Терморезистор	То же	4,8—20
	—MB	Терморезистор	То же	2—20
	—201 (измерение отклонения относительно опорной температуры)	Терморезистор	Инфракрасное зеркало	8—14

6	7	8	9	10	11
30—400 50—650	—	0,1 (также 0,03 и 1)	25/48; 250/38	0,92; 6,6	0—40
50—500	200—1700	0,1 (также 0,03 и 1)	890/7,5; 7500/75	119; 100	0—40
(—20)—15	40—75	0,01 (также 0,1 и 1)	250/90; 2500/900 также 250/8,9 также 5000/12,7	2,8; 2,8 28 406	(—20)—40
(—10)—60 0—200		4 4	150/110; 900/650; также 900/75; 15 000/750	1,4; 1,4 также 12;	(—10)—60
(—20)—90	800—3200	0,006	1 000—75 000	333	10—40
700—1500 1400—3000	700—1500 или 1400—3000	0,01	≥500	385	(—20)—50
0—150	100—320	0,05	100/25; 3000/60	4; 50	0—50
0—150	100—320	0,05	12,5/2,5; 100/20	5	15—40
0—300	200—600	0,05	Как 1Е	4; 50	0—50
100—650	550—1000	0,05	Как 1Е	4; 50	0—50
0—150	100—320	0,05	Как 1Е	4; 50	0—50
0—300	200—600	0,05	Как 1Е	4; 50	0—50
20—40	—	0,05	25/7	3,6	20—40
(—10)—100	—	0,05	12 000/40 90 000 max	300	(—18)—50

1	2	3	4	5
Land Pyrometer- Ltd., Дронфилд	Система I (без линейри- зации) RO	Термобатарея	Стеклоанная лин- за	0,4—2,8
	RG	Термобатарея	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -линза и фильтр	4,3—8
	QO	Si-фотозлемент	Стеклоанная лин- за	0,4—1,2
	Система II (линейризо- ванная) RO	Термобатарея	То же	0,4—2,8
	RL	Термобатарея	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -линза	0,7—12
	HL и HF	Термобатарея	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -линза	0,7—12
	HG и HE	Термобатарея	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -линза и фильтр	4,3—8 или 4,3—5,5
	QO	Si-фотозлемент	Стеклоанная лин- за	0,4—1,2
	QM	Si-фотозлемент	Стеклоанная лин- за и фильтр	0,8—1,2
	VO	PbS-резистор	Стеклоанная лин- за	0,4—2,8
	ST (переносный)	Термобатарея	Золоченый реф- лектор	0,4—1,2
	QSE	Si-фотозлемент	То же	0,4—1,2
	YQA	Si-фотозлемент	Стекловолокно	0,4—1,2
Пирометр спектрального отношения	2Si-фотозлемент	Стеклоанная лин- за	0,65 0,88	

Продолжение табл. 9.10

6	7	8	9	10	11
400—800	900—1800	2	125/8 1200/75	15,5	0—80
300—800	500—1200	4	125/23; 600/81	5,5; 7,5	10—40
600—1000	1700—2800	0,001	125/2; 1200/73	63; 17	0—80
600—1600	—	2	125/7; 600/55	17; 5	10—40
0—300	—	2	75/35	2,2	10—40
100—600	300—1200	0,06	125/4; 1200/35	32; 32	10—40
400—1200	—	0,06	125/2,5; 1500/43 также 125/7; 600/35	50; 35 также 18; 17	10—40
600—1100	1500—2500	0,001	125/7; 1200/35	17; 34	5—65
400—750	500—900	0,001	125/7; 600/35	18; 17	5—65
100—300	250—650	0,25 или 0,025	125/1,2; 1200/35	104; 34	5—35
50—260	300—550	2	0/50	—	0—50
550—700	1050—1300	0,001	0/50	—	0—80
350—650	—	0,001	0/10	—	10—50
1100—1500	1500—2500	40	—	—	0—60

1	2	3	4	5
Leeds and Northrup Corp., Филадельфия	Рэйотьюб 8893 или 98	Термобатарея	Двойное вогнутое зеркало с кварцевым окном	0,3—3,8
	8892 или 91	Термобатарея		0,3—3,8
	8896 или 93E	Термобатарея		0,3—3,8
	8845	Термобатарея	Двойное вогнутое зеркало с окном из CaF <sub>2</sub>	0,3—10
	Спекчури 8866 или 86-1	Si-фотоэлемент	Стеклянная линза	0,65 или 0,9
	8885 или 85-1	Si-фотоэлемент	Вогнутое зеркало	0,65 или 0,9
	8885-2	Si-фотоэлемент	» »	0,90
	Автоматический пирометр с исчезающей нитью 8641-1 или 8641-2	С пирометрической лампой накаливания и фотоумножителем	Стеклянная линза	0,645±±0,017 или 0,655±±0,016
Schmidt, G, Гамбург	Чаппер Q2 Пирометр спектрального отношения 500	ISEV	Стеклянная линза со светопроводным кабелем	0,500 и 0,580
Honeywell Inc., Миннеаполис	Радиаматик RH; RHF	Термобатарея	Стеклянная линза	0,3—2,7
	RJ; RJE	Термобатарея	Кварцевая линза	0,3—3,8
	RL-1	Термобатарея	CaF <sub>2</sub> -линза	0,3—10
	RJ-3; RJ-1	Термобатарея	Кварцевая линза	0,3—3,8
	RL-2	Термобатарея	CaF <sub>2</sub> -линза	0,3—10

Продолжение табл. 9.10

6	7	8	9	10	11
450—1000	—	6,5 или 0,65	305/31 или 229/24; 2000/177	9 или 9; 11,2	0—177
650—1400	975—2200	6,5; 25 или 0,65	305/16; 2000/91	.19; 22	0—177
252—760 или 0—400	399—871 0—550	1 или 6,5	229/27; 2000/190	8,5; 10,5	0—177
38—150	93—370	6,5	305/8,5	8,5; 10,5	0—100
1070—1400 или 743—1000	1230—1650	0,001	305/2,5; 2000/15,8	124; 124	0—100
1060—1371 или 716—955	1232—1659 или 927—1288	0,001	229/3,2; 2000/22,7	72; 88	0—100
463—594	524—760	0,001	229/20; 2000/140	11,5; 14,3	0—100
775—1225	2000—2800	1	1020/0,15	680	0—57
900	3100	0,25	—	—	0—55
760—1870	—	2; 0,5	254/12,7; 914/114 также 610/35	20; 8 также 17,5	0—100
538—1260	—	2; 0,5	914/48	19	
260—648	—	2			
930—2760	—	2	150/3; 241/25	50; 9,3	0—100
260—1760	—	2	150/13; 300/44	11,5; 6,8	0—100

1	2	3	4	5
Honeywell Inc., Миннеаполис	RL	Термобатарея	CaF <sub>2</sub> -линза	0,3—10
	SJR	InSb-фоторезистор	CaF <sub>2</sub> -линза и фильтр	4,5—5,0 и 5—7
Irgon Niles, Иллинойс (Кунц-Франк-Фурт)	Мудлайн (шкала ли- неаризована) 2000	Si-фотоэлемент	Стеклянная лин- за	0,7—0,97
	3400	InAs-фотоэлемент	CaF <sub>2</sub> -линза и фильтр	3,36—3,5
	7000	InSb-фотоэлемент	То же	4,8—5,2
	6000	PbS-фоторезистор	Стеклянная лин- за	2—2,5
	4000	Термобатарея	Оптика KRS-5	8—15
	8000	Термобатарея	Оптика KRS-5	7,65—8,15
Leybold Heraeus, Ханану	Логометриче- ский пирометр PQP3	2SEV	Стеклянная лин- за и светопровод- ный кабель	0,45 и 0,65

реи из нескольких последовательно соединенных термопар или болометры, работающие по принципу модулированного облучения с последующим усилением синусоидального выходного сигнала. После выпрямления для передачи на показывающий прибор выходной сигнал должен быть равен 0—20 мА. Такие усилители модулированных сигналов могут иметь очень высокое усиление, они дешевле, чем высокостабильные усилители постоянного тока. Кроме того, они менее чувствительны к помехам (колебаниям окружающей температуры и напряжения питания).

В табл. 9.10 приведены наиболее существенные технические данные некоторых энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения различных фирм-изготовителей.

Диапазон длин волн или эффективная длина волны  $\lambda_e$  определяются используемым приемником излучения и конструкцией оптической системы. В необходимых случаях приведены только наименьшие и наибольшие пределы измерения. Помимо времени установления показаний (до уровня 98%), приводятся важные для технического применения данные о минимальном диаметре излучателя  $D$  для расстояния  $a$  от излучателя до пирометра, при котором достигается полное облучение приемника излучения. Эти данные относятся к минимально допустимому расстоянию от объекта до плоскости переднего среза линзы пирометра и, кроме того, к одному или нескольким большим расстояниям. Используя эти данные, можно с достаточной для большинства случаев точностью графически определить

6	7	8	9	10	11
50—370	—	4; 6	152/79; 1830/721	1,9; 2,5	0—100
121—2260 38—2260		$\left\{ \begin{array}{l} 0,01 > \\ > 370 \text{ К} \\ 0,1 < \\ < 370 \text{ К} \end{array} \right.$	$\geq 500$	100	22—72
600—1000	1500—3000	0,01—0,1	$\geq 460$	20; 300	(—20)—93
50—200	200—800	0,01—1	$\geq 305$	50; 100	10—55
50—300	300—1300	0,01—1	$\geq 305$	50; 100	10—55
80—200	2000—3000	0,01—0,1	$\geq 460$	150	10—55
0—100	0—500	0,1—10	$> 305$	40	10—55
20—200	100—400	0,1—10	$> 305$	40	10—55
900—1400	2200—2500	0,01	—	—	0—40

минимальный диаметр излучателя для любого расстояния. Из этих же данных получают показатель визирования  $d$ . Если пирометр одной и той же модели при различных конструкциях оптики имеет несколько показателей визирования  $d$ , то соответствующие данные приводятся с примечанием «также». Если приведена только одна пара значений, то диаметр излучателя для любого расстояния должен быть вычислен из соотношения  $d = a/D$ . Кроме того, указана допустимая температура корпуса прибора. Из приведенного сопоставления видно, что пирометры, предназначенные для решения одинаковых задач измерения, но изготовленные различными фирмами, очень различаются в отношении рабочих диапазонов и показателей визирования. Поэтому необходим очень внимательный подход к выбору модели пирометра, наиболее полно удовлетворяющей конкретным задачам и условиям измерения.

### 9.7.3.3.1. Пирометры для измерения высоких температур с термоэлектрическими приемниками излучения

Для измерения температур выше  $500^\circ\text{C}$  чаще всего применяют пирометры с линзами и термоэлектрическими приемниками излучения (рис. 9.40, 9.41). Ардометр фирмы «Siemens» имеет в качестве приемника излучения термобатарейку 5 из 11 ленточных NiCr-константановых термопар (см. рис. 9.37). Холодные спая

термопар, изолированные тонкой пленкой, зажаты между двух медных дисков. Никелевый резистор 7, служащий для компенсации изменений температуры окружающей среды, запрессован в корпус и имеет с ним хороший тепловой контакт. С помощью ирисовой диафрагмы 3 при градуировке может быть установлено заданное

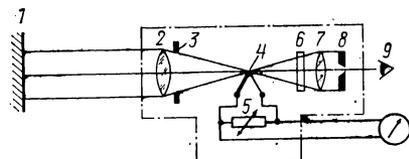


Рис. 9.40. Принципиальная схема рефракторного пирометра с термоэлектрическим приемником излучения:

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — апертурная диафрагма; 4 — термоэлектрический приемник излучения; 5 — никелевый резистор для автоматической компенсации изменений температуры корпуса пирометра; 6 — защитный дымчатый светофильтр; 7 — окуляр; 8 — диафрагма; 9 — наблюдатель

напряжение выходного сигнала, соответствующее верхнему пределу измерительного диапазона, например 15 мВ. Ардометр способен работать при давлении от 300 мм вод. ст. до 1 бар изб. и выдерживает длительное воздействие температуры до 180°С. Погрешность измерения вследствие изменения температуры окружающей среды (корпуса пирометра) от 25 до 180°С составляет только 3—8 К в зависимости от диапазона измерения (см. рис. 9.13). Она входит в предел допустимой погрешности пирометра, который не превышает 1% при верхнем пределе диапазона измерения 1350—1750°С. При более низком или высоком верхнем пределе диапазона измерения предел допустимой погрешности

пирометра составляет 1,5% от верхнего предела диапазона измерения. К пирометру можно подключать одновременно несколько измерительных приборов. Для исключения влияния такого подключения на показания пирометра параллельно выходным клеммам пирометра включено несколько съемных резисторов с эквивалентным сопротивлением.

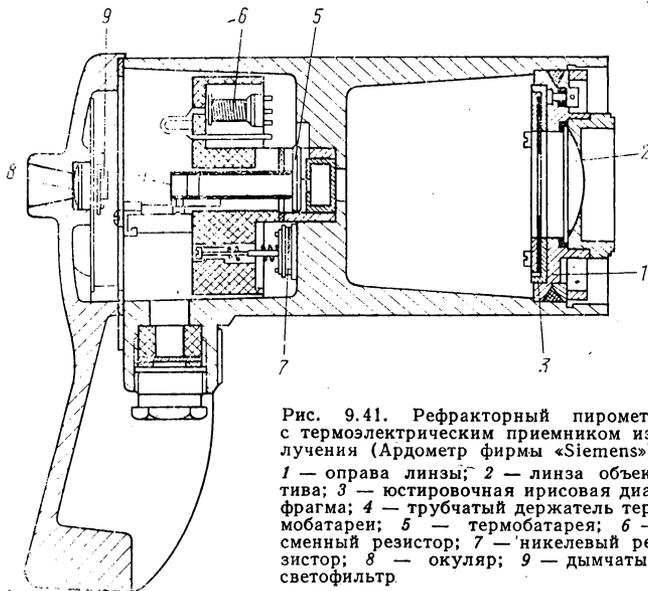


Рис. 9.41. Рефракторный пирометр с термоэлектрическим приемником излучения (Ардометр фирмы «Siemens»): 1 — оправа линзы; 2 — линза объектива; 3 — юстировочная ирисовая диафрагма; 4 — трубчатый держатель термобатареи; 5 — термобатарея; 6 — сменный резистор; 7 — никелевый резистор; 8 — окуляр; 9 — дымчатый светофильтр

Для измерений в диапазоне температур до 1000°С применяют линзы из кварца, а для более высоких температур — из стекла. Ардометр 20 с показателем визирования  $d_k = 20$  дает выходной сигнал 3 мВ при 840°С и 6 мВ при 1000°С. При таких низких значениях выходного сигнала необходимо применение промежуточ-

ного усилителя. Для диапазона с верхним пределом выше  $1200^{\circ}\text{C}$ ; выходное напряжение равно 10 мВ. Ардометры для диапазонов с верхним пределом выше  $1750^{\circ}\text{C}$  имеют выходное напряжение 15 мВ, выше  $2000^{\circ}\text{C}$  30 мВ.

Для измерения температуры малых объектов на расстоянии ардометр может быть снабжен дополнительной оптикой (теленасадкой). Такие ардометры с показателем визирования 50 или 50N снабжаются линзами с различными фокусными расстояниями в зависимости от удаления объекта измерения от пирометра, но при этом размер изображения объекта в плоскости приемника излучения сохраняется неизменным.

В пирометре «Пирадио» фирмы «Hartmann und Braun» в качестве приемника излучения использованы две включенные последовательно термопары NiCr-константан, размещенные в стеклянном баллоне. Компенсация погрешности измерения, возникающей вследствие изменений температуры корпуса пирометра, осуществляется с помощью биметаллической пластины, расположенной внутри корпуса за объективом. Эта пластина перекрывает часть отверстия диафрагмы (при повышении температуры корпуса пирометра это отверстие увеличивается). Благодаря такой компенсации повышение температуры корпуса пирометра до  $120^{\circ}\text{C}$  практически не влияет на выходной сигнал пирометра.

В пирометре излучения «Пиро» фирмы «Rugo-Werk» в качестве приемника излучения применена полупроводниковая термопара в стеклянной капсуле. Выходное напряжение пирометра при измерении высоких температур достигает 30 мВ. Компенсация погрешности от изменения температуры корпуса осуществляется с помощью компенсационных проводов. При подключении к пирометру двух измерительных приборов приемник излучения можно использовать в режиме параллельной работы, так как термопары, составляющие приемник излучения, могут быть электрически разъединены. Для измерения низких температур служит пирометр с линзой из флюорита, а с помощью пирометра «Кустотерм» можно измерять температуру малых объектов, удаленных от пирометра на небольшие расстояния.

Если температуру корпуса пирометра или блока, в котором находится термобатарея, с помощью терморегулятора поддерживают постоянной, равной, например,  $50^{\circ}\text{C}$ , то отпадает необходимость применения каких-либо схем или устройств компенсации погрешности вследствие колебаний температуры корпуса пирометра («Радиаматик» фирмы «Honeywell-Brown») [9.40].

У рефлекторных пирометров («Фери», 1904 г.) [9.72] поток излучения концентрируется на термоэлектрическом приемнике излучения с помощью сферического вогнутого зеркала (рис. 9.42). Благодаря отражению излучения почти без потерь закон полного излучения (закон  $T^4$ ) выполняется вплоть до относительно низких температур. Вследствие этого чувствительность таких пирометров существенно выше, чем чувствительность рефракторных пирометров.

В пирометрах «Ардонокс» фирмы «Siemens» (рис. 9.43) [9.13], у которых на поверхность вогнутого зеркала напылен отражающий слой алюминия и покрытие из кварца для защиты от коррозии, в качестве приемника излучения использована термобатарея из 19 термопар 1. Тонкая пленка из полиэтилена или окошко из флюорида лития 4, хорошо пропускающие инфракрасное излучение, предохраняют пирометр от попадания пыли на зеркало и от воздействия потоков воздуха на приемник излучения. Два термочувствительных резистора 2 служат для компенсации погрешности измерения вследствие изменений температуры корпуса. Ардонокс может работать с магнитоэлектрическим измерительным прибором в диапазоне измерения с верхним пределом, равным  $600^{\circ}\text{C}$ , а с компенсационным само-

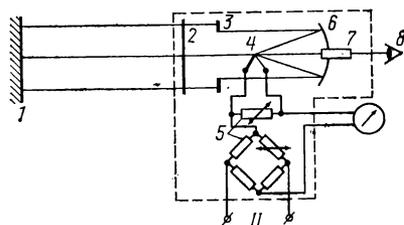


Рис. 9.42. Принципиальная схема рефлекторного пирометра с термоэлектрическим приемником излучения:  
1 — объект измерения; 2 — инфракрасный фильтр; 3 — юстировочная диафрагма; 4 — термоэлектрический приемник излучения; 5 — схема автоматической компенсации влияния изменений температуры корпуса пирометра; 6 — вогнутое зеркало; 7 — отверстие для визирования; 8 — наблюдатель

писцем или измерительным усилителем возможны измерения в интервале температур от  $-40$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Еще более высокую чувствительность имеет двухзеркальный пирометр «Рэйотьюб» фирмы «Leeds and Northrup» (рис. 9.44). Излучение объекта 1, проходя

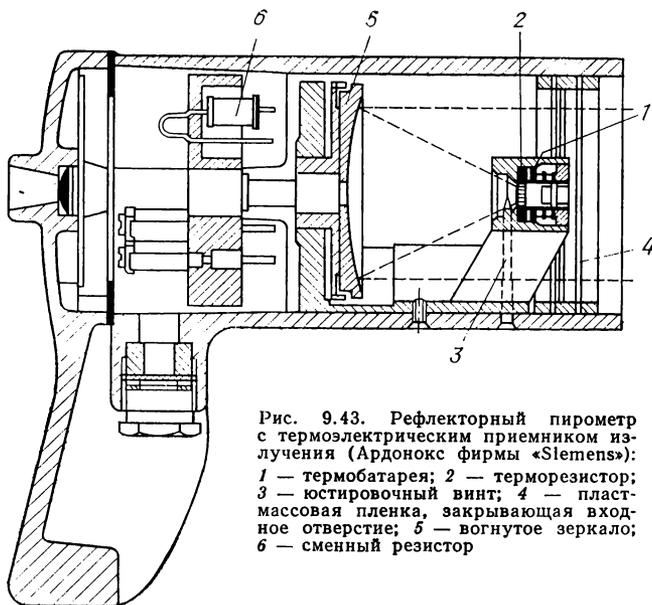


Рис. 9.43. Рефлекторный пирометр с термоэлектрическим приемником излучения (Ардонокс фирмы «Siemens»):  
1 — термобатарея; 2 — терморезистор;  
3 — юстировочный винт; 4 — пластмассовая пленка, закрывающая входное отверстие; 5 — вогнутое зеркало; 6 — сменный резистор

через кварцевое окошко 2 и отражаясь от вогнутого зеркала 5 и частично от обратного зеркала 9, попадает через отверстие диафрагмы 6 на термобатарею 10 и затем в окуляр 3. Контейнер 8, содержащий обратное зеркало и термобатарею, может перемещаться с помощью поводка 7 при фокусировке объекта. Отверстие диафрагмы 6 должно полностью перекрываться изображением объекта измерения.

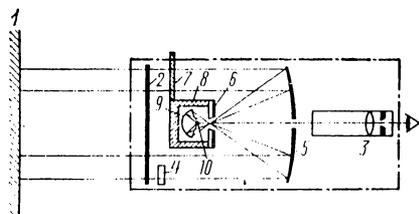


Рис. 9.44. Двухзеркальный рефлекторный пирометр с термоэлектрическим приемником излучения (Рэйотьюб фирмы «Leeds and Northrup»)

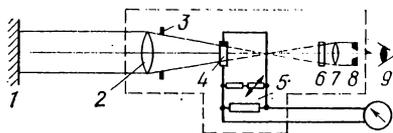


Рис. 9.45. Принципиальная схема рефракторного пирометра с кремниевым фотоэлементом:

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — юстировочная диафрагма; 4 — фотоэлемент; 5 — схема компенсации влияния изменений температуры корпуса пирометра; 6 — дымчатый светофильтр; 7 — окуляр; 8 — диафрагма; 9 — наблюдатель

С помощью этого пирометра можно измерять температуру объектов диаметром 2,5 мм, удаленных от пирометра на расстояние 100 мм [9.38].

Рефракторные пирометры с термобатареями тоже могут иметь дополнительное зеркало, которое возвращает на термобатарею часть прошедшего через нее излучения, благодаря чему повышается чувствительность пирометра.

Вместо регулируемой ирисовой диафрагмы, закрепляемой от смещения после регулировки при поверке пирометра, часто применяют диафрагмы с неизменяемыми калиброванными отверстиями, которые позволяют некоторую регулировку за счет изменения положения диафрагмы между объектом и приемником излу-

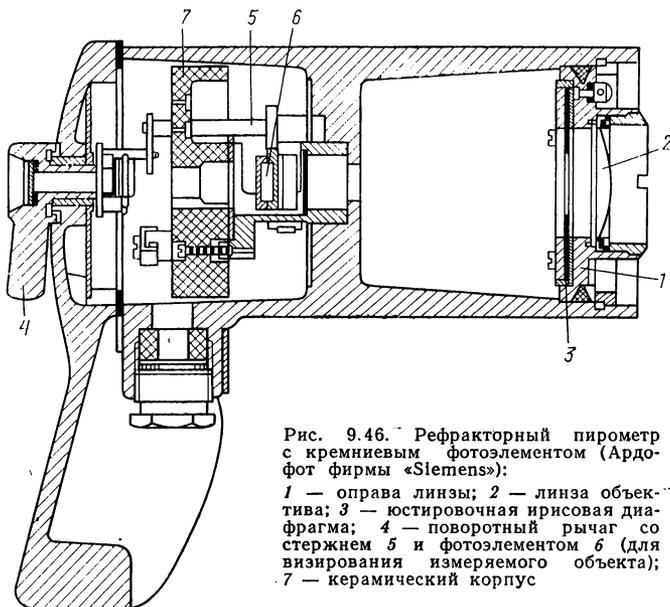


Рис. 9.46. Рефракторный пирометр с кремниевым фотоэлементом (Ардофот фирмы «Siemens»):

1 — оправа линзы; 2 — линза объектива; 3 — ирисовочная диафрагма; 4 — поворотный рычаг со стержнем 5 и фотоэлементом 6 (для визирования измеряемого объекта); 7 — керамический корпус

чения. Отверстие такой диафрагмы может быть несколько увеличено, благодаря чему увеличивается поток излучения, падающий на приемник излучения.

Для облегчения согласования пределов изменения выходных сигналов пирометров с термобатарейми и болометрами со шкалами измерительных приборов ДИН 43701, лист 3 рекомендует ряд нормированных диапазонов измерения, °С, приведенный ниже:

20—100	200—600	80—1500
30—150	500—1000	900—1750
50—250	600—1200	1000—2000
100—400	700—1350	

Шкалы начинаются с 0 или с 20° С. Точный отсчет значений температуры между началом шкалы и началом диапазона измерения невозможен, поскольку энергетическая яркость излучения, воспринимаемая пирометром полного излучения, увеличивается пропорционально четвертой степени абсолютной температуры, а пирометром частичного излучения — еще более высокой степени абсолютной температуры объекта. Поэтому шкала всех энергетических пирометров излучения сильно сжата в области низких температур, а по мере повышения измеряемой температуры она все больше и больше растягивается (рис. 9.47).

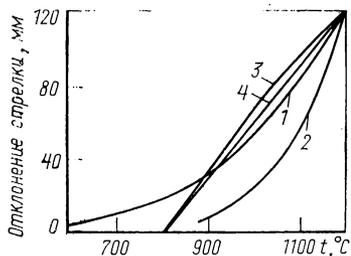


Рис. 9.47. Характеристики шкал различных пирометров излучения: 1 — Ардометр с кварцевой линзой (600—1200° С); 2 — Ардофот с кремниевым фотоэлементом (900—1200° С); 3 — Ардокол с компенсатором (800—1200° С); 4 — Ардокол линейризованный (800—1200° С)

Сопротивление проводов, соединяющих пирометр с измерительным прибором, должно быть в пределах, указанных изготовителем. Если измерительный прибор подключен к пирометру через измерительный преобразователь, то сопротивление проводов может быть большим.

### 9.7.3.3.2. Пирометры с фотоэлементами

Пирометры с фотоэлементами в качестве приемников излучения (см. рис. 9.45, 9.46), так же как и пирометры с термоэлектрическими приемниками, преобразуют измеряемое излучение в выходной сигнал — напряжение постоянного тока. При достаточно высокой интенсивности температурного излучения измерительного поля объекта такие пирометры могут быть подключены непосредственно к магнитоэлектрическим или компенсационным измерительным приборам. При низких температурах излучателя выходной сигнал преобразуется измерительным усилителем или измерительным преобразователем в стандартный сигнал 0—20 мА постоянного тока, который затем измеряется показывающими или регулирующими приборами с нормированным входным сигналом [см. ДИН 43701 лист 4, а также VDE/VDI, директива 2191, Измерительные преобразователи для температуры 6 (1969)]. Постоянная времени фотоэлементов очень мала (0,001—0,05 с), поэтому такими пирометрами можно измерять быстро изменяющиеся температуры.

Так как при заданном верхнем пределе шкалы значения начала шкалы могут сильно различаться в зависимости от типа приемника излучения фотоэлектрических пирометров, ДИН 43701, лист 3 рекомендует для этих пирометров диапазоны измерения выбирать таким образом, чтобы значения верхних пределов шкал до 80°С были кратны 20, от 100 до 250°С — 50 и выше 300°С — 100.

В качестве приемников излучения применяют чаще всего кремниевые фотоэлементы, отличающиеся высокой временной стабильностью [9.69]. Кроме того, применяют германиевые и селеновые фотоэлементы. Конструкции фотоэлектрических пирометров подобны конструкциям пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения.

Компенсация погрешности измерения, возникающая вследствие изменений температуры корпуса пирометра в интервале от 0 до 80°С в пирометре «Ардофот» фирмы «Siemens» (см. рис. 9.46), осуществляется с помощью двух никелевых сопротивлений, включенных параллельно и последовательно с фотоэлементом. Для этой же цели может быть применен термистор. При наводке пирометра на измеряемый объект через окуляр фотоэлемент выводится из поля зрения с помощью рычажного приспособления. У других пирометров с электронными или болометрическими приемниками излучения используется полупрозрачное зеркало, благодаря чему объект измерения виден через окуляр.

К выходу пирометра «Ардофот 20» при измерении в диапазонах температур 800—1200 или 1200—1750°С может быть непосредственно подключен измерительный прибор. Точно так же показывающий прибор можно подключить к выходу пирометра «Ардофот 50» или 50N для диапазонов 900—1350 или 1200—1750°С. Верхним пределам этих диапазонов соответствует выходной сигнал порядка 15 мВ.

Для наименьшего измерительного диапазона пирометра «Ардофот» 20 (500—700°С) выходной сигнал в конце диапазона равен 1 мВ, а у пирометров «Ардофот 50» и 50N верхнему пределу диапазона 600—850°С соответствует выходной сигнал в 2,5 мВ. При измерении в этих диапазонах к пирометрам «Ардофот 20, 50 и 50N» можно подключать компенсационные самописцы или же измерительные усилители с выходным током 0—20 мА.

Пирометры с германиевыми и селеновыми фотоэлементами применяют реже из-за их плохой временной стабильности. Температура корпуса пирометра с германиевым фотоэлементом должна быть не выше 45°С, а с селеновым — до 50°С. Пирометры с германиевым фотоэлементом имеют более высокое выходное напряжение, чем пирометры с кремниевым фотоэлементом. Поэтому этими пирометрами при использовании дополнительной оптики можно измерять температуру очень малых объектов. При показателе визирования  $d_k = 150$  или  $d_k = 100$  можно измерить температуру излучателя диаметром 8 мм на расстоянии 1200 мм или диа-

метром 1,5 мм на расстоянии 235 мм. Диапазон измеряемых температур при подключении компенсационных измерительных приборов или измерительных усилителей может составлять 600—1000 °С [9.73].

Максимум спектральной чувствительности кремниевого фотоэлемента соответствует длине волны 0,85 мкм, германиевого фотоэлемента 1,5 мкм, селенового фотоэлемента 0,6 мкм (см. рис. 9.35, б). Селеновый фотоэлемент по своей спектральной чувствительности примерно соответствует человеческому глазу.

При перпендикулярном облучении фотоэлемента его выходное напряжение холостого хода при увеличении энергетической освещенности достигает некоторого предельного значения, тогда как ток короткого замыкания возрастает линейно. Поэтому при измерении достаточно высоких температур к фотоэлементу с внутренним сопротивлением около 100 Ом подключают низкоомный измерительный прибор. Из-за высокой спектральной чувствительности фотоэлементов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра излучения ток возрастает с повышением температуры значительно сильнее (с показателем степени 8—12), чем у пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения. Поэтому шкала в области низких температур сильно сжата, а наименьший диапазон измерения у пирометров с кремниевыми фотоэлементами составляет 900—1200 вместо 700—1200°С, как у рефракторных пирометров с кварцевой оптикой и термоэлектрическими приемниками излучения (см. рис. 9.47).

### 9.7.3.3. Энергетические пирометры для измерения низких температур

Для измерения температур ниже 600°С в качестве приемников излучения используют термобатареи с большим числом последовательно соединенных термопар, болометры, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Эти приемники излучения обычно подключают к измерительным приборам через усилители модулированного сигнала. Сами пирометры аналогичны пирометрам для измерения высоких температур и подразделяются на рефлекторные, рефракторные пирометры и пирометры с диафрагмами (см. 9.7.3.1.1) [9.74а].

Для модуляции выходного сигнала пирометра измеряемый поток излучения периодически прерывается вращающимся секторным диском или вибрационным модулятором [9.74 б]. При таком методе измерения очень просто осуществляется компенсация влияния неконтролируемых изменений температуры корпуса пирометра на его выходной сигнал (см. 9.5.4).

*Компенсация влияния изменения температуры корпуса на выходной сигнал пирометра.* Согласно уравнению (9.32 б)—(9.32 г) выходной сигнал пирометра пропорционален разности энергетических яркостей излучения измеряемого объекта и корпуса или модулятора пирометра. Для того чтобы измерять температуру объекта  $t_A$ , необходимо исключить влияние температуры корпуса на выходной сигнал пирометра.

По блок-схеме 9.48 измеряемое излучение некоторого объекта  $I$  через линзу 2, пропускающую инфракрасное излучение, попадает на приемник излучения 5. При циклическом прерывании потока излучения вибрационным или вращающимся модулятором, температура рабочих поверхностей которых практически равна температуре корпуса пирометра ( $t_3 = t_c$ ), его выходной сигнал представляет собой переменное напряжение, амплитуда которого зависит только от разности энергетических яркостей  $L_{t_A} - L_{t_3}$ .

После усиления усилителем 8, выпрямления фазочувствительным выпрямителем 9 и сглаживания фильтром 10 выходного сигнала в компенсационном блоке с ним складывается сигнал от датчика температуры 13, величина которого зависит от температуры рабочей поверхности модулятора (корпуса пирометра), причем в такой степени, в какой основной сигнал зависит от яркостной температуры измеряемого объекта [см. уравнение (9.32 з)]. Сигнал, пропорциональный четвертой или более высокой степени температуры рабочей поверхности модулятора, может быть получен от никелевого или термисторного датчика температуры путем подбора заданной температурной характеристики с помощью комбинации сопротивлений в трехточечной компенсационной схеме. Можно также произвести возве-

дение в степень температуры модулятора с помощью серии контуров возведения в квадрат, диодных функциональных генераторов или другими методами. В результате этого выходной сигнал не зависит от температуры корпуса пирометра или модулятора, а зависит только от температуры и излучательной способности  $\epsilon$

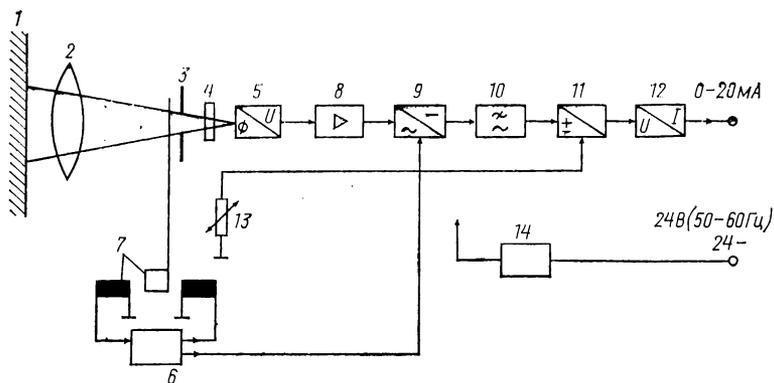


Рис. 9.48. Блок-схема энергетического пирометра излучения с автоматической компенсацией влияния изменений температуры корпуса пирометра (фирма «Heimapp»): 1 — объект измерения; 2 — линза; 3 — диафрагма; 4 — фильтр; 5 — болометрический приемник излучения; 6 — электронный осциллятор; 7 — вибратор (модулятор); 8 — усилитель; 9 — фазочувствительный выпрямитель; 10 — фильтр низких частот; 11 — блок автоматической компенсации; 12 — преобразователь напряжения в выходной ток; 13 — датчик температуры корпуса пирометра; 14 — блок питания

объекта. Преобразователь напряжения в ток чаще всего рассчитан на нормированный выходной ток, изменяющийся от 0 до 20 мА.

Для прецизионных измерений целесообразно измерять, как показано на рис. 9.49, энергетическую яркость измеряемого объекта  $L_{TД}$  и энергетическую яркость дополнительного черного опорного излучателя  $L_{тс}$ , находящегося в кор-

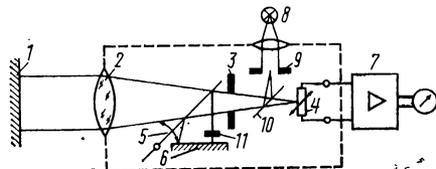


Рис. 9.49. Рефракторный пирометр с болометрическим приемником излучения и опорным черным излучателем (принципиальная схема) (фирма «Heimapp»):

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — юстировочная диафрагма; 4 — болометр; 5 — модулятор (качающееся или вращающееся зеркало); 6 — термостатированный черный опорный излучатель; 7 — усилитель с фазочувствительным выпрямлением; 8 — контрольная лампа с диафрагмой; 9, 10 — передвижное зеркало; 11 — диафрагма

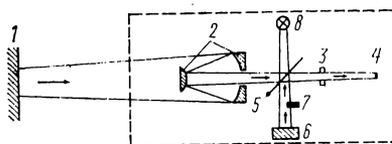


Рис. 9.50. Пирометр излучения с зеркальным объективом Кассегрэйна (фирма «Heimapp»):

1 — объект измерения; 2 — объектив Кассегрэйна; 3 — юстировочная диафрагма; 4 — приемник излучения; 5 — вибрационный модулятор; 6 — опорный излучатель; 7 — диафрагма; 8 — контрольная лампа

пусе пирометра, с помощью дифференциальной схемы [9.16]. В этом случае на приемник излучения периодически с помощью колеблющегося или вращающегося зеркала подается попеременно то излучение от измеряемого объекта, то от опорного излучателя. Тогда выходной сигнал зависит только от разности энергетических яркостей обоих источников. Излучение от стенок корпуса не модулируется, и поэтому даже при измерении низких температур почти не оказывает влияния на результаты измерения. При прецизионных измерениях низких температур мо-

гут возникнуть недопустимо большие помехи из-за отражения излучения корпуса от обратной стороны линзы. Чтобы исключить этот эффект, на пути лучей от опорного излучателя ставится диафрагма 11, которая отражает такую же часть опорного излучения, зависящую от температуры корпуса  $t_3$ .

Температуру опорного излучателя 6 можно поддерживать постоянной, например равной 60°С. Если ее не поддерживают постоянной, то при измерениях низких температур должен быть предусмотрен датчик (см. в 9.5.4 «Компенсация влияния изменений температуры корпуса пирометра на его показания») для измерения опорной температуры, который (13 на рис. 9.46) воздействует соответствующим образом на компенсационное устройство [уравнения (9.32г) и (9.32д)].

Такие дифференциальные устройства с опорным излучателем служат для очень точных измерений быстро изменяющихся температур малых объектов на большом расстоянии в интервале от —100 до 400°С. Пирометры для этой цели имеют зеркальную оптическую систему Кассегрейна (рис. 9.50).

**Линеаризация характеристики шкалы.** По законам излучения энергетическая яркость тела возрастает экспоненциально с температурой. Поэтому у пирометров полного излучения выходной сигнал пропорционален четвертой степени температуры, а у пирометров частичного излучения — более высокой степени в зависимости от эффективной длины волны  $\lambda_e$ , которая у яркостных пирометров, чувствительных к излучению в видимой области спектра, равна 12. Вследствие этого характеристика шкалы пирометра в начале шкалы сильно сжата, а в конце шкалы растянута тем больше, чем меньше эффективная длина волны пирометра (см. рис. 9.45). Для подключения к цифровому показывающему прибору или цифровой управляющей вычислительной машине необходима линейная температурная шкала.

С этой целью сигнал может быть преобразован в блоке 11 (см. рис. 9.46) по закону степенной функции с дробным показателем степени, соответствующим степенной зависимости между сигналом и температурой. Для реализации степенных функций, необходимых при температурной компенсации, применяют серийно выпускаемые схемы извлечения корня, функциональные генераторы на диодах и никелевые резисторы. С их помощью, например, путем включения по схеме многоугольника на отдельных участках кривых температура — сигнал линеаризуют с достаточным приближением характеристики шкалы. Такие схемы воспроизведения степенных функций целесообразно применять и в усилителях постоянного тока.

#### 9.7.3.3.4. Автоматический яркостный пирометр с исчезающей нитью

Автоматический пирометр с пирометрической лампой фирмы «Leeds and Northrup» [9.22; 9.75] устроен аналогично визуальным яркостным пирометрам сравнения с исчезающей нитью (рис. 9.51). Излучения измеряемого объекта 1

и эталонной лампы 10 через цветной фильтр 2 попеременно попадают в фотоумножитель 3 через обтюратор 7. Прямоугольные сигналы переменного тока на выходе фотоумножителя, возникающие при различии яркостей излучения объекта и эталонной лампы, через усилитель переменного тока 4 подаются на вход синхронного демодулятора 5, синхронизированного с обтюратором. Выходной сигнал демодулятора через интегратор 8 управляет током накала эталонной лампы 10 так,

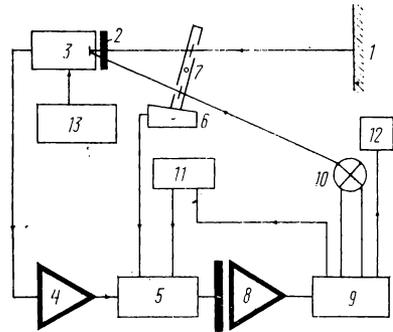


Рис. 9.51. Автоматический яркостный пирометр с исчезающей нитью (фирма «Leeds and Northrup»):

1 — объект измерения; 2 — фильтр; 3 — фотоумножитель; 4 — предусилитель; 5 — блок синхронной демодуляции; 6 — блок управления демодулятором; 7 — обтюратор; 8 — интегрирующий блок; 9 — блок управления током лампы; 10 — эталонная лампа; 11 — блок регулировки чувствительности; 12 — самописец; 13 — источник напряжения

чтобы яркости объекта и лампы уравнились. Тогда ток лампы является мерой температуры объекта. Поскольку с повышением измеряемой температуры изменение яркости на один градус изменения температуры быстро возрастает, коэффициент усиления синхронного демодулятора  $\beta$  уменьшается с помощью автоматической схемы управления. Как и у субъективных оптических пирометров, диапазон измерения может быть расширен с помощью монохроматического фильтра. Погрешность измерения составляет 0,2 К при 1063°С; предел допустимой погрешности при 1225°С составляет  $\pm 4$  К, в диапазоне между 1225 и 1750°С он равен  $\pm 8$  К и в диапазоне между 1750 и 2000°С достигает  $\pm 15$  К.

## 9.7.4. ПИРОМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

### 9.7.4.1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИНАХ ВОЛН И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЯХ ОБЪЕКТОВ

В пирометрах спектрального отношения применяются те же приемники излучения, что и в пирометрах полного и частичного излучения. В отличие от различных энергетически пирометров показания пирометров спектрального отношения не зависят от излучательной способности объекта, пока его излучение остается серым, т. е.  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ . Однако в действительности для всех тел излучательная способность не остается постоянной при изменении длины волны. У металлов она уменьшается при увеличении длины волны ( $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ). Поэтому измеренная такими пирометрами условная (цветовая) температура  $t_r$  таких объектов выше, чем их действительная температура  $t$ . Погрешность измерения тем меньше, чем меньше эффективная длина волны  $\lambda_1$ , и чем больше разность длин волн  $\lambda_2 - \lambda_1$ . Однако у многих веществ, например у карбида кремния, излучательная способность увеличивается с длиной волны. В этом случае измеренная температура занижена, погрешность измерения имеет знак «минус». Величина погрешности обычно меньше, чем у пирометров частичного излучения с таким же приемником излучения (сравни с рис. 9.15). Зависимость погрешности измерения от излучательной способности для пирометров спектрального отношения с различными приемниками излучения приведена в табл. 9.11.

Т а б л и ц а 9.11

Погрешности  $t_r - t$  пирометров спектрального отношения с различными длинами волн при действительной температуре объекта 1400°С

Приемник излучения	Длина волны, мкм		$t_r - t$ , К, при отношении	
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$a$	$b$
Кремний	0,88	1,034	+117	+93 (1,08)
Кремний	0,65	0,88	+54	+44 (1,08)
Кремний/германий	0,88	1,50	+40	+173 (1,46)
Фотоумножитель	0,45	0,65	+27	+17 (1,06)

Примечания.  $a$  — при постоянном отношении  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1,1$  независимо от длины волны;  $b$  — при изменяющемся с длиной волны отношении  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  для вольфрама (значения указаны в скобках). Погрешность яркостного пирометра с исчезающей нитью при  $\lambda = 0,65$  мкм и  $\varepsilon = 0,45$  (для вольфрама)  $t_r - t = -87$  К.

Изменение погрешности измерения  $t_r - t$  из-за возрастания отношения  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  у металлов относительно мало, если приемники излучения пирометра спектраль-

ного отношения чувствительны к излучению с длиной волны менее 1,2 мкм. При больших длинах волн  $\epsilon$  ( $\lambda$ ) снижается значительно быстрее с ростом длины волны (см. рис. 9.4), вследствие чего погрешность измерения в этой области спектра может быть намного больше погрешности при постоянном значении отношения  $\epsilon_1/\epsilon_2$  в соответствии с табл. 9.11 (а) [9.12 и 9.40].

### 9.7.4.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

В настоящее время метод измерения температуры по величине отношения энергетических яркостей излучения в двух участках спектра реализован в целом ряде пирометров спектрального отношения. В пирометре «Ардокол» фирмы «Siemens» [9.42] (рис. 9.52) изображение излучателя проектируется на диафрагму, расположенную перед торцовой поверхностью стержневого световода 3. С другой стороны световода рассеянное излучение попадает на фильтр из фосфида индия 4, частично пропускающий, частично отражающий излучение (рис. 9.53). Обе части излучения попадают на кремниевые фотоэлементы 5 и 6. Эффективная длина волны  $\lambda_{e1}$  отраженного излучения, попадающего на фотоэлемент 6, равна при 1300°С

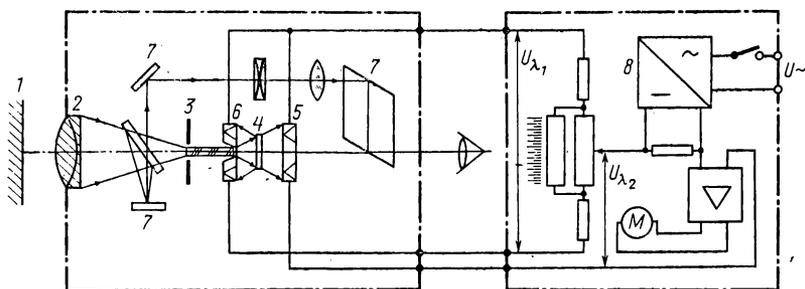


Рис. 9.52. Пирометр спектрального отношения Ардокол с компенсационным измерительным прибором (фирма «Siemens»):

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — световод с диафрагмой; 4 — фильтр из фосфида индия; 5 — кремниевый фотоэлемент ( $\lambda_2 = 1,034$  мкм); 6 — кремниевый фотоэлемент ( $\lambda_1 = 0,888$  мкм); 7 — оптическая система визирования; 8 — стабилизатор опорного напряжения

0,888 мкм, а длина волны  $\lambda_{e2}$  излучения, прошедшего через фильтр на фотоэлемент 5, соответственно равна 1,034 мкм. Для визуального наблюдения измеряемого объекта в приборе предусмотрен поворачивающийся оптический визир 7. Выходные напряжения приемников излучения  $U_{\lambda_1}$  и  $U_{\lambda_2}$  подаются на вход автоматического потенциометра — компенсографа. Положение указателя этого потенциометра пропорционально отношению  $U_{\lambda_2}/U_{\lambda_1}$  и является мерой цветовой температуры объекта измерения. Кремниевые фотоэлементы уравновешены с помощью параллельных сопротивлений, одно из которых состоит частично из меди для компенсации влияния изменений температуры корпуса пирометра. Характеристика шкалы в отличие от пирометров полного и частичного излучения приблизительно линейна (см. рис. 9.47). Компенсограф рассчитан так, что для изменения диапазона измерения изменяется только разметка шкалы.

Для того чтобы пирометр «Ардокол» можно было подключить к различным устройствам с нормированным токовым входным сигналом (0—20 мА), таким как показывающие миллиамперметры, регуляторы, цифровые приборы или управляющие вычислительные машины, напряжения от кремниевых фотоэлементов уравновешиваются в мостовой схеме (рис. 9.54) за счет изменения величины переменного сопротивления  $R_2$  [9.76 и 9.77]. Тогда при постоянном значении сопротивления  $R_1 I_{\lambda_1} R_1 = I_{\lambda_2} R_2$  или  $R_2 = k I_{\lambda_1} / I_{\lambda_2}$ . Уравновешивание осуществляется с помощью находящегося при постоянной температуре полевого транзистора FET (рис. 9.55), который управляет напряжением на фотоэлементе  $F_2$  (см. рис. 9.54).

Для линейризации нелинейного изменения сопротивления FET применяется схема (рис. 9.55), состоящая из резисторов  $R_3, R_4, R_5$  и двух диодов, при которой зависящее от управляющего напряжения  $U_{St}$  эквивалентное сопротивление полевого транзистора FET изменялось таким образом, чтобы выходной ток усилителя, являющийся функцией  $R_2$ , был бы пропорционален отношению  $I_{\lambda_1}/I_{\lambda_2}$ .

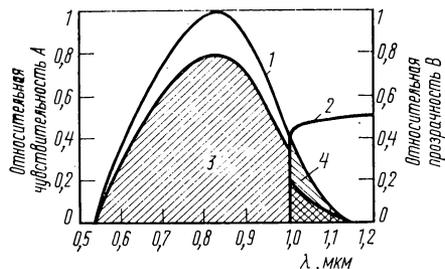


Рис. 9.53. Спектральная чувствительность кремниевого фотозлемента и спектральное пропускание фильтра из фосфида индия: 1 — относительная чувствительность кремниевого фотозлемента; 2 — относительное пропускание индий-фосфидного фильтра; 3 — относительная чувствительность кремниевого фотозлемента к излучению, отраженному индий-фосфидным фильтром; 4 — относительная чувствительность кремниевого фотозлемента к излучению, пропускаемому индий-фосфидным фильтром

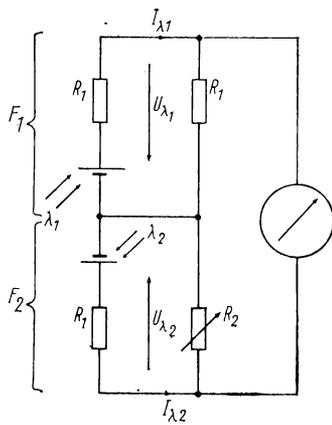


Рис. 9.54. Мостовая схема с фотозлементами  $F_1$  и  $F_2$

Разность напряжений ( $U_{\lambda_1} - U_{\lambda_2}$ ) преобразуется с помощью вибропреобразователя в переменное напряжение и после усиления и демодуляции подается на выходной усилитель. Выходной ток изменяет сопротивление  $R_2$ , пока напряжение на выходе  $F_2$  не станет равным напряжению на выходе  $F_1$ . Погрешности ли-

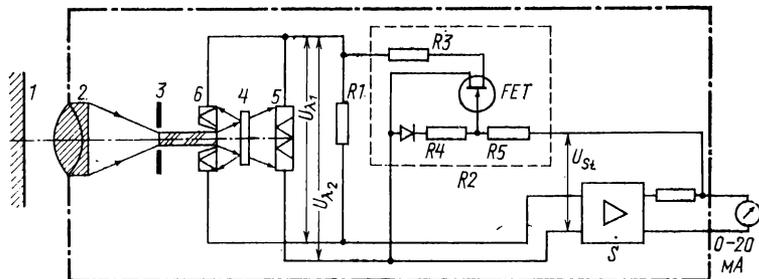


Рис. 9.55. Пирометр спектрального отношения Ардокол с линейризованной температурной характеристикой (фирма «Siemens»):

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — световод с диафрагмой; 4 — фильтр из фосфида индия; 5 — кремниевый фотозэлемент;  $R_2$  — управляемый полевой транзистор с линейризующими диодами и резисторами  $R_4, R_5$  и  $R_3$ ;  $R_1$  — постоянный подстроечный резистор;  $S$  — усилитель с вибропреобразователем и автоматической коррекцией отношения токов фотозэлементов

неаризации изменения управляемого сопротивления  $R_2$  и отношения  $U_{\lambda_1}/U_{\lambda_2}$  частично взаимокompенсируются, благодаря чему остаточная погрешность линейризации не превосходит 1% от величины отношения  $U_{\lambda_1}/U_{\lambda_2}$  [9.78].

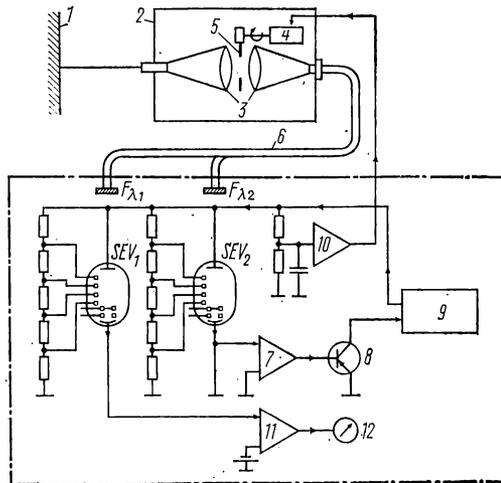
Особенность всех схем для измерения температуры с помощью пирометров спектрального отношения состоит в том, что при отсутствии облучения отношение выходных напряжений фотозэлементов неопределенно, так как каждое из них близко к нулю. Вследствие этого незначительные вариации сигналов из-за явле-

ний температурного дрейфа или старения могут стать причиной ошибочных показаний пирометра. Чтобы исключить эту неопределенность при периодической работе прибора, как например в линиях прокатки, может быть предусмотрено фотореле, которое возвращает указатель прибора в начало шкалы. Это фотореле встроено в корпус линейризованного Ардокола вместе с интегрирующим усилителем со всеми необходимыми деталями.

В пирометре фирмы «Land» с кремниевыми фотоэлементами излучение, прошедшее через стеклянную линзу и диафрагму, разделяется светоделительным кубиком и направляется по двум каналам. Излучение по первому каналу попадает на кремниевый фотоэлемент с эффективной длиной волны  $\lambda_{e1} = 0,88$  мкм. Излучение по второму каналу проходит через цветной фильтр на второй кремниевый фотоэлемент с эффективной длиной волны  $\lambda_{e2} = 0,65$  мкм. Выходные сигналы

Рис. 9.56. Пирометр спектрального отношения с автоматическим поддержанием постоянного уровня сигнала одного из приемников излучения (фирма «Leibold und Heraeus»):

1 — объект измерения; 2 — приемное устройство; 3 — объектив; 4 — сервомотор; 5 — ирисовая диафрагма; 6 — стекловолоконные световоды;  $F_{\lambda_1}$  — синий светофильтр ( $\lambda_1 = 0,45$  мкм),  $F_{\lambda_2}$  — красный светофильтр ( $\lambda_2 = 0,65$  мкм); 7 — интегрирующий усилитель; 8 — высоковольтный регулирующий транзистор; 9 — блок питания; 10 — дифференциальный усилитель; 11 — выходной усилитель; 12 — измерительный прибор; SEV — умножитель вторичных электронов (фотоумножитель)



обоих фотоэлементов усиливаются предусилителями. В предусилителе канала 1 с помощью терморезистора компенсируется влияние изменения температуры корпуса пирометра. Если из-за низкой энергетической яркости излучения, попадающего в канал 2, кремниевый фотоэлемент выдает слишком низкий выходной сигнал, к нему можно с помощью электрического выключателя добавить вспомогательное напряжение. При этом указатель прибора переместится на конечное деление шкалы. Отношение спектральных яркостей  $L_{\lambda_2}/L_{\lambda_1}$  получается благодаря тому, что включенный на выходе усилителя 1 первого канала светогенерирующий диод LED воздействует на фоторезистор в цепи обратной связи усилителя 2 второго канала. В результате выходное напряжение  $V_{A_2}$  этого усилителя регулируется так, что оно равно отношению входных напряжений  $V_{E_2}/V_{E_1}$  и тем самым равно отношению яркостей. После дальнейшего усиления этого напряжения  $V_{A_2}$  выходной сигнал  $S_2$  является мерой цветовой температуры  $t_r$ . Этот сигнал может быть линейризован. В электронное устройство обработки сигналов могут быть добавлены соответствующие функциональные печатные платы предварительного усиления, образования отношения и линейризации, с помощью которых можно получить нужный диапазон измерения, выходное напряжение и т. д.

У других пирометров спектрального отношения оба выходных сигнала, соответствующих длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , регулируются с помощью регулятора опорного напряжения таким образом, что сигнал  $S_{\lambda_1}$  остается постоянным; тогда сигнал  $S_{\lambda_2}$  является мерой цветовой температуры  $t_r$  [9.40; 9.79; 9.80].

В пирометре спектрального отношения, фирмы «Leibold und Heraeus» (рис. 9.56) измеряемое излучение объекта 1 попадает в приемное устройство 2,

откуда через объектив 3 с регулируемой ирисовой диафрагмой 5 по световоду 6 подводится в измерительный блок пирометра с показывающим прибором 12. Световод разделяется на два рукава, по которым излучение объекта, пройдя через два интерференционных фильтра  $F_{\lambda_1}$  и  $F_{\lambda_2}$ , подводится к двум фотомножителям  $SEV$ . Фильтры пропускают излучение с длинами волн  $\lambda_1 = 0,45$  мкм и  $\lambda_2 = 0,65$  мкм при полуширине полос пропускания около 0,05 мкм.

Падение напряжения на нагрузочном сопротивлении от выходного тока фотомножителя  $SEV_2$  после усиления интегрирующим усилителем 7 используется для управления транзистором 8. При увеличении фототока напряжение на  $SEV_2$  понижается транзистором 8 настолько, насколько это необходимо, чтобы выходной сигнал фотомножителя  $SEV_2$  оставался постоянным. Так как при этом на фотомножителе  $SEV_1$  постоянное рабочее напряжение, то при повышении яркости чувствительности обоих контуров будут одинаковы. Рабочее напряжение подается на дифференциальный усилитель 10, который сравнивает его с заданным значением, устанавливаемым с помощью делителя напряжения. При отклонении рабочего напряжения от заданного значения ирисовая диафрагма с помощью сервомотора 4 устанавливается так, что рабочее напряжение возвращается к заданному значению. Сигнал от фотомножителя  $SEV_1$  подается на вход усилителя 11, на выход которого включен измерительный прибор 12, показывающий цветовую температуру  $t_r$ .

По тому же принципу поддержания постоянства сигнала при одной из двух длин волн работает пирометр спектрального отношения фирмы «Schmidt». Излучение измеряемого объекта через световод подводится к приемному блоку прибора. Здесь оно модулируется обтюратором, содержащим два интерференционных фильтра с длинами волн  $\lambda_1 = 0,500$  мкм и  $\lambda_2 = 0,580$  мкм, и попадает на фотомножитель. После усиления импульсы напряжения поступают в разделительный каскад. В этот же каскад синхронно с прохождением фильтров в обтюраторе (положение обтюратора фиксируется при помощи люминесцентного диода в качестве источника света и фототранзистора в качестве приемника света) приходят запускающие импульсы, позволяющие разделить сигналы, соответствующие разным длинам волн. После выпрямления этих сигналов напряжение постоянного тока, соответствующее длине волны  $\lambda_2$ , сравнивается с опорным стабилизированным напряжением. При разбалансе этих напряжений коэффициент усиления фотомножителя изменяется таким образом, что разность напряжений уменьшается до нуля. Тогда выходное напряжение постоянного тока, соответствующее длине волны  $\lambda_1$ , является мерой условной (цветовой) температуры  $t_r$ . Согласно табл. 9.10, наименьшая температура, измеряемая пирометрами спектрального отношения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, находится в районе  $700^\circ \text{C}$ . При использовании приемника излучения из антимонида индия (InSb), охлаждаемого жидким азотом, можно производить измерения при длинах волн 3,1 и 4,5 мм начиная с температуры  $100^\circ \text{C}$  и выше при диаметре излучателя 0,25—0,5 мм [9.80a].

Из законов излучения взаимосвязь между истинной температурой  $T$  и выходным напряжением приемника излучения пирометра спектрального отношения можно выразить соотношением

$$T \sim S \sim \frac{1}{U_z \pm \Delta U_e + U_0 \ln(U_{\lambda_1}/U_{\lambda_2})}, \quad (9.45)$$

где  $\Delta U_e = f(\epsilon_1/\epsilon_2)$ .

Это соотношение может быть задано в аналоговую вычислительную машину. Приемник излучения (охлаждаемый жидким азотом InSb) по методу модулированного облучения через зеркальный многогранник и два фильтра попеременно воспринимает излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Разделенные друг от друга напряжения логарифмируются. В дифференциальном усилителе формируется и запоминается величина  $U_0 \ln(U_{\lambda_1}/U_{\lambda_2})$ . В следующем за ним суммирующем усилителе к напряжению, пропорциональному этой величине, прибавляется постоянное напряжение  $U_z$ . Затем, чтобы при различных значениях  $\epsilon$  получить истинное

Значение температуры, сигнал может быть дополнительно скорректирован напряжением  $\pm \Delta U_e$ . В инверсионном каскаде образуется величина, обратная сигналу и пропорциональная измеренной температуре. В диапазоне измерений от 200 до 1200°С или даже меньшем и при быстродействии порядка 0,3 мс может быть измерена температура излучателя диаметром 1 мм на расстоянии 150 мм. С помощью вращающегося зеркала можно, например, исследовать место контактной сварки и зону термического влияния [9.806].

### **9.7.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ УСРЕДНЕНИЯ ПОКАЗАНИЙ И ЗАПОМИНАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОКАЗАНИЙ**

Аналоговые выходные сигналы пирометров с линеаризованной характеристикой шкалы после необходимого согласования могут быть измерены с помощью цифровых вольтметров с соответствующим диапазоном измерения.

Поскольку пирометры излучения, особенно с электронными приемниками излучения, очень быстро реагируют на изменения температуры (см. табл. 9.10), малое время установления показаний приводит к значительным колебаниям указателя измерительного прибора. Поэтому для того, чтобы измерять чаще всего представляющую наибольший интерес среднюю температуру излучателя или в сочетании с регулятором осуществлять автоматическое регулирование температуры без помех, колебания измеряемого сигнала должны быть демпфированы с помощью усредняющего устройства таким образом, чтобы выходной сигнал пирометра отражал измерение средней температуры объекта. В таких усредняющих устройствах входной ток после усиления заряжает конденсаторы, разрядный ток которых можно изменять с помощью потенциометра. Таким образом, может быть установлено время замедления от 5 до 150 с.

Если имеет значение максимально достигаемая при колебаниях температура, то ее можно определить с помощью устройства запоминания максимальных значений в задаваемом временном интервале. Если, например, при измерении температуры клинкера во вращающихся цементных печах пыль, увлеченная потоком газа, имеет более низкую температуру, чем клинкер, то индицируется только максимальная температура клинкера (при чистой атмосфере). В таких приборах, например, входной ток через усилитель заряжает конденсатор. Разрядке конденсатора через усилитель, при уменьшении сигнала препятствует диод. С помощью транзистора напряжение на конденсаторе может быть преобразовано в пропорциональный выходной ток. Время замедления может быть установлено с помощью потенциометра в пределах от 0 до 200 мин.

Эти устройства могут быть встроены в корпус пирометра или оформлены в виде самостоятельных блоков, или же в виде печатных плат вместе с субблоками питания и измерительного усилителя пирометра объединены в дополнительном блоке прибора, включающем также и показывающий измерительный прибор.

### **9.7.6. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРЕДЕЛЫ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПИРОМЕТРОВ**

Ожидаемая погрешность энергетических пирометров зависит, кроме всего прочего, от температуры измеряемого объекта. Для диапазонов с верхним пределом измерения выше 800°С градуировку пирометров проводят с помощью абсолютно черного эталонного излучателя. Для этого эталонный излучатель в течение длительного времени выдерживают при постоянной температуре, которую измеряют с помощью прошедшего соответствующую поверку яркостного пирометра, чаще всего с помощью визуального (оптического) пирометра с исчезающей нитью. Его показания сравнивают с показаниями испытываемого пирометра излучения. При проверке большого числа энергетических пирометров наименьшую погрешность и одновременно значительное сокращение общей длительности поверки

Т а б л и ц а 9.12

Погрешность измерения  $f$ , максимальная погрешность  $\sum f$ , статистический предел погрешности  $G$  энергетических (рефракторных с термоэлектрическими приемниками

Температура, °С	а. Погрешность измерения напряжения пирометра		б. Погрешность образцового пирометра, градуированного по вторичному эталону — оптическому пирометру с исчезающей нитью [см. табл. 9.6, Е, а]				в. Погрешность при сравнительных испытаниях образцового пирометра класса 0,2 и поверяемого пирометра класса 0,2 с учетом отличия т. э. д. с. поверяемого пирометра $\Delta t$ . Гарантированный предел допустимой погрешности $G$			
	класс 0,05	класс 0,2	класс 0,05		класс 0,2		$\Delta t$	$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	$G$
			$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$				
800	0,1	0,8	8,9	3,3	9,6	3,4	3	13,4	4,6	13
1000	0,12	1,0	5,2	1,8	5,1	2,1	3	10,1	3,8	18
1200	0,13	0,9	3,8	1,4	4,6	1,6	3	8,5	3,5	13,5
1400	0,16	0,85	4,4	1,5	5,1	1,7	3	8,9	3,6	15
1600	0,18	1,1	6,2	2,2	7,1	2,4	3	11,0	4,0	17,5
1800	0,20	1,3	6,8	2,4	7,9	2,7	4	13,2	5,0	30
2000	0,25	1,0	8,9	3,1	9,6	3,2	6	16,6	6,9	30

получают в том случае, если используют в качестве образцового пирометра аналогичный поверяемому энергетический пирометр, который был поверен согласно табл. 9.6 с помощью прецизионного пирометра с исчезающей нитью класса 0,05. Если поверку производят путем сравнения показаний поверяемого пирометра с показаниями однотипного эталонного энергетического пирометра, не обязательно знать температуру черного тела. Нужно только достаточно быстро производить замену поверяемого пирометра эталонным пирометром. Как и при проверке яркостных оптических пирометров, при проверке энергетических пирометров с помощью эталонного оптического пирометра с исчезающей нитью надо учитывать возможные погрешности, указанные в табл. 9.6, А—Г. В столбцах  $F(a)$  или  $F(b)$  приведены расчетные значения максимальной погрешности  $\sum f$  или значения статистических пределов допустимой погрешности  $\sqrt{\sum f^2}$ . Если при проверке пирометра используется эталонный энергетический пирометр, то, кроме погрешностей, указанных в табл. 9.6, Е (а), необходимо еще учитывать порог контрастной чувствительности глаза, погрешность измерения тока нити накала эталонного пирометра и погрешность измерения напряжения или тока приемника излучения поверяемого пирометра. С учетом этого для эталонного энергетического пирометра получаются приведенные в табл. 9.12, б максимальная погрешность  $\sum f$  и статистический предел допустимой погрешности  $\sqrt{\sum f^2}$ .

Если поверку пирометра производят с помощью такого эталонного энергетического пирометра, то снова надо учитывать дополнительную погрешность из-за неточности измерения напряжения или тока самого поверяемого пирометра и, кроме того, погрешность из-за отличия термоэлектродвижущей силы термоэлектрических приемников излучения или приемников излучения другого типа по сравнению с таковыми эталонного пирометра (см. табл. 9.12, а и в).

Если пирометр поверяется с помощью технического оптического пирометра с исчезающей нитью класса 0,05, то погрешность измерения, приведенная в табл. 9.12, столбец «г», будет несколько больше, чем в столбце «в» той же та-

допустимой погрешности  $\sqrt{\sum f^2}$  и гарантированный предел допустимой излучения) пирометров излучения, К

г. Погрешность градуировки пирометров с помощью технического пирометра с исчезающей нитью класса 0,05 (см. табл. 9.6, Е, б) с учетом отличия т. э. д. с. поверяемых пирометров $\Delta t$ (см. столбец в)		д. Погрешность абсолютно черного тела при поверке по трубчатой графитовой печи ( $\varepsilon \approx 0,98$ )	Температура, °С	е. Погрешность энергетического пирометра для низких температур типа Ардонокс фирмы Siemens			
$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$			$\sum f$	$\sqrt{\sum f^2}$	гарантированный предел допустимой погрешности $\sigma$	погрешность абсолютно черного тела при испытаниях в муфельной печи ( $\varepsilon \approx 0,96$ )
17,4	5,2	3,9	-40	1,7	1,1	1,2	3,5
11,9	3,9	4,4	0	0,9	0,6	1,2	0,9
10,8	3,8	5,2	50	0,6	0,35	1,5	1,0
11,7	4,0	6,2	100	1,2	0,65	2,3	2,3
15,1	4,7	7,4	200	2,6	1,5	3,0	3,9
17,7	5,8	8,1	300	3,7	2,2	4,0	5,3
22,2	7,7	10,0	400	4,7	3,0	5,0	5,9
			500	5,8	3,6	6,0	7,5
			600	6,7	4,3	6,0	8,9

блицы. Погрешность измерения  $\sum f$  и статистический предел допустимой погрешности  $\sqrt{\sum f^2}$  будет тем больше, чем больше предел допустимой погрешности измеряющего ток прибора. Поэтому при перепроверке в заводской лаборатории и при прямо-сдаточных испытаниях необходимо по возможности использовать амперметры класса 0,05.

При расчете погрешностей измерения и пределов допустимых погрешностей энергетических пирометров, предназначенных для измерения низких температур, надо учитывать погрешности измерения, которые возникают из-за случайной составляющей погрешности измерения температуры поверхности с помощью ртутных или термоэлектрических термометров.

При  $-50^\circ\text{C}$  эту случайную составляющую погрешности следует считать равной 0,5 К, при  $0^\circ\text{C}$  — равной 0,2 К и при  $100^\circ\text{C}$  — равной 0,5 К. В муфельной печи в интервале температур от 100 до  $600^\circ\text{C}$  она составляет примерно 0,15—0,26 К. С этой погрешностью суммируется погрешность от измерения тока или напряжения в поверяемом пирометре, а также в некоторых случаях погрешность из-за различия температурной чувствительности приемников излучения, зависящей от температуры излучателя. Если поверку пирометра проводили с использованием эталонного пирометра, однотипного с поверяемым пирометром, то в этом случае погрешность будет меньше.

При всех испытаниях должна поддерживаться комнатная температура ( $20 \pm \pm 0,5$ )°С. Гарантированный предел допустимой погрешности (табл. 9.13) имеет величину, которую в большинстве случаев может обеспечить изготовитель измерительного средства (см. 1.2). Сопоставление данных табл. 9.12, столбец «в» показывает, что гарантированный предел допустимой погрешности энергетических пирометров для температур выше  $800^\circ\text{C}$  лежит существенно выше, чем расчетный статистический предел допустимой погрешности. Однако при низких температурах статистический предел допустимой погрешности близок к гарантированному пределу допустимой погрешности (см. табл. 9.12, е).

Т а б л и ц а 9.13

**Гарантированные пределы допустимой погрешности  
технических объективных пирометров излучения**

Диапазон измерения, °С	Гарантированный предел допустимой погрешности пирометров с допуском	
	нормальным	суженным

**1. Энергетические пирометры**

(-40) ÷ (-20)	$\leq \pm 1,2 \text{ K}$	$\leq \pm 0,5 \text{ K}$
60—200	$\leq (\pm 1 \text{ K} \pm 1\%)$	$\leq (\pm 0,5 \text{ K} \pm 1\%)$
200—1350	$\leq \pm 1,5\%$	$\leq \pm 1\%$
1350—1750	$\leq \pm 1\%$	$\leq \pm 0,5\%$
> 1750	$\leq \pm 1,5\%$	$(\pm 0,5 \text{ до } \pm 1\%)$

**2. Пирометры спектрального отношения**

1400—1900	$\leq \pm 1$
1200—2200	$\leq \pm 1,5\%$

**3. Автоматические пирометры с исчезающей нитью**

825—1225	$\pm 4 \text{ K}$
1225—1750	$\pm 6 \div \pm 8 \text{ K}$
1750—2540	$\pm 10 \div \pm 18 \text{ K}$

П р и м е ч а н и е. Гарантированный предел допустимой погрешности в процентах отнесен к верхнему пределу соответствующего диапазона измерения.

## 9.7.7. ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ <sup>1</sup>

### 9.7.7.1. ВВЕДЕНИЕ ПОПРАВКИ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Если измеряемый объект излучает не как черное тело, его температура, измеренная с помощью энергетического пирометра, занижена, так как его излучательная способность  $\varepsilon < 1$ . Это влияние излучательной способности при текущих измерениях температуры можно исключить путем сравнения показаний пирометра с показаниями другого пирометра или термометра, измеряющего действительную температуру объекта. С помощью переменного сопротивления показания пирометра устанавливаются на действительное значение температуры. Этим способом можно компенсировать также нежелательное влияние изменений температуры окружающей среды (см. 9.6.1). При длительных измерениях в производственных условиях излучательная способность должна оставаться достаточно постоянной. Сравнительные измерения необходимо периодически повторять. С помощью переменного сопротивления может быть установлена излучательная способность от  $\varepsilon = 0,1$  до  $\varepsilon = 1$ . В корпусе усилителя можно также предусмотреть функциональный субблок введения поправки на излучательную способность. С помощью устанавливаемого вручную потенциометра можно увеличивать коэффициент усиления тем больше, чем меньше  $\varepsilon$ .

<sup>1</sup> Этому вопросу посвящена книга: Поскачей А. А. и Чарихов Л. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М., 1978. (Прим. ред.)

Если измеряемый объект в определенной узкой области спектра имеет излучательную способность  $\epsilon$  примерно между 0,9 и 1, как, например, большинство пластмасс, то целесообразно для измерения температуры такого объекта использовать пирометр излучения, чувствительный только в этой узкой области длин волн. Тогда при не очень высоких требованиях к точности измерения поправкой на  $\epsilon$  можно пренебречь.

Такой способ учета  $\epsilon$  можно считать целесообразным и достаточным при больших значениях  $\epsilon$  и не очень высокой температуре, как это следует из рис. 9.7. Чем меньше  $\epsilon$  и чем выше температура объекта, тем больше будут погрешности, если в процессе измерения излучательная способность объекта может изменяться относительно первоначально установленного значения. Поэтому разработаны различные методы, с помощью которых влияние излучательной способности автоматически более или менее исключается [9.40; 9.81—9.83].

Согласно уравнению (9.21), разность между действительной  $t$  и яркостной  $t_s$  температурами уменьшается с уменьшением длины волны. Поэтому у пирометров с приемниками излучения, чувствительными к ультрафиолетовому излучению, погрешность, связанная с изменением излучательной способности, пренебрежимо мала из-за слабой зависимости от длины волны и часто присущих металлам относительно высоких значений излучательной способности  $\epsilon$  в этой области спектра [9.84].

### 9.7.7.2. ИСКЛЮЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА

Действительную температуру  $t$  свободно излучающих твердых и жидких металлов и сплавов с высокой температурой плавления, таких как железо, никель или вольфрам можно измерить яркостным пирометром в видимой области спектра, если измеряемый объект визировать под достаточно большим углом, например  $80^\circ$  (угол между нормалью к излучающей поверхности и направлением излучения). Как видно из рис. 9.57, в соответствии с законом косинуса Ламберта, энергетическая яркость излучения не изменяется до угла визирования примерно  $30^\circ$ . Затем она возрастает с увеличением угла и достигает максимума около  $\varphi = 80^\circ$ .

Энергетическая яркость излучения в направлении, составляющем к нормали угол  $80^\circ$ , превосходит энергетическую яркость излучения в направлении нормали примерно на 18%. Кроме того, такое излучение поляризовано. Энергетическая яркость излучения в плоскости колебаний, параллельной излучающей плоскости, возрастает; энергетическая яркость перпендикулярной компоненты снижается. Излучательная способность жидкого железа в направлении нормали к излучающей поверхности составляет примерно 0,4, тогда как при максимуме энергетической яркости параллельно поляризованного излучения она достигает 0,9. Разность между яркостной температурой при поляризованном излучении и действительной температурой при  $1400^\circ\text{C}$  для железа равна  $-4\text{ K}$ , для никеля  $-22\text{ K}$  и для вольфрама  $-10\text{ K}$  [9.85].

Яркостный пирометр (пирометр с исчезающей нитью) можно снабдить поляризационным фильтром и соответствующим образом отградуировать. Такой пиро-

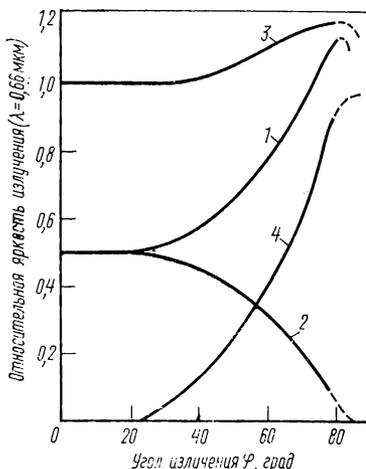


Рис. 9.57. Зависимость относительной яркости излучения жидкого чугуна от угла излучения:

1 — параллельно поляризованное излучение; 2 — перпендикулярно поляризованное излучение; 3 — нормальное излучение; 4 — отношение разности параллельно и перпендикулярно поляризованных излучений к их сумме

метр перед измерением устанавливают таким образом, чтобы вектор излучения был параллелен излучающей плоскости измеряемого объекта. Результаты измерения температуры в летках доменных печей, вагранок, индукционных печей совершенно не зависят от состояния поверхности расплавов. Этот метод пригоден и для измерения температуры нагретых металлических поверхностей. Только для благородных металлов, двухвалентных металлов и металлов с низкой температурой плавления этот метод не применим.

### 9.7.7.3. ИСКЛЮЧЕНИЕ МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ СТОРОННЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Другой метод исключения влияния излучательной способности состоит в том, что на поверхность измеряемого объекта проецируется излучение эталонного черного излучателя. Благодаря этому на излучение объекта с излучательной способностью  $\epsilon$  накладывается отражающееся от его поверхности излучение эталонного излучателя. Температуру эталонного излучателя регулируют таким

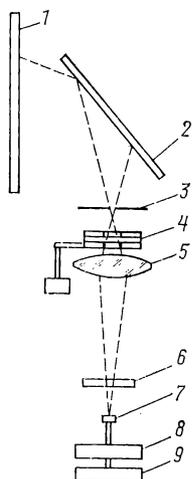


Рис. 9.58. Измерение температуры по ларадометру:

1 — эталонный черный излучатель; 2 — объект измерения; 3 — диафрагма; 4 — обтюратор с поляризационным фильтром; 5 — линза; 6 — фильтр; 7 — приемник излучения; 8 — усилитель; 9 — измерительный прибор

образом, чтобы его энергетическая яркость стала равна энергетической яркости, составленной из энергетических яркостей собственного излучения объекта и отраженного им излучения черного излучателя. Тогда сумма отражательной и излучательной способностей объекта равна 1 и при этом температура эталонного излучателя равна истинной температуре измеряемого объекта [9.86]. Регулирование температуры эталонного излучателя может быть осуществлено, например, с помощью пирометра с приемником излучения из сульфида свинца. При помощи обтюлятора сравнивают, с одной стороны, энергетическую яркость эталонного излучателя, с другой — суммарную энергетическую яркость излучения объекта и отраженного от его поверхности излучения черного тела. Разность этих яркостей дает на выходе пирометра сигнал переменного напряжения. Температура эталонного излучателя регулируется так, чтобы этот разностный сигнал стал равен нулю. Тогда температура эталонного излучателя равна действительной температуре объекта [9.87].

Так как при этом методе направления излучений от измеряемого объекта и эталонного излучателя должны быть приблизительно параллельны, это приводит к некоторым трудностям при измерении. Поэтому дополнительно применяют вогнутое зеркало, расположенное так, чтобы излучение эталонного излучателя с вольфрамовой температурной лампой проецировалось на измеряемый объект [9.81]. При таком измерении температура чистой поверхности расплава чугуна только на 10 К отличается от температуры того же места, закрытого шлаком (1360°С).

Действительная температура нагретого металла может быть измерена методом наложения собственного и отраженного излучений при направлении облучения под углом 45° к поверхности объекта с помощью вращающегося поляризационного фильтра (см. рис. 9.58). Энергетические яркости обоих излучений, поляризованных в перпендикулярной и параллельной плоскостях и попадающих на приемник излучения  $L_{\perp}$  и  $L_{\parallel}$ , можно отнести соответственно к яркостным температурам  $t_{s\perp}$  и  $t_{s\parallel}$ . При различии температур эталонного излучателя (черного тела) и измеряемого объекта доли параллельно и перпендикулярно поляризованных излучений от объекта и от черного тела также различны. Поэтому выходной сигнал приемника излучения содержит переменную компоненту. Если путем регулиро-

вания температуры эталонного излучателя добиться исчезновения этой компоненты, то обе составляющие излучения объекта будут равны соответствующим составляющим черного излучения. Смешанное излучение ведет себя как неполяризованное излучение черного тела, а выходной сигнал соответствует действительной температуре измеряемого объекта [9.88, 9.89]. При измерении температуры металлических поверхностей с излучательной способностью  $\varepsilon = 0,005-0,6$  погрешность измерения при температуре  $545^\circ\text{C}$  составляет всего около  $10\text{ K}$  [9.90].

Если раскаленный металл наблюдать под углом  $45^\circ$ , то можно измерять температуру без дополнительного эталонного излучателя с помощью одного простого яркостного пирометра [9.91]. Для этого надо провести два определения яркостной температуры в параллельно и перпендикулярно поляризованном излучении. С помощью формулы Френеля для отражения поляризованных лучей и яркостного пирометра с поляризационным фильтром получают соотношение <sup>1</sup> между яркостными температурами  $t_{s\perp}$  и  $t_{s\parallel}$  и действительной температурой объекта  $t$ . Этот метод был опробован при определении излучательной способности вольфрамовой температурной лампы.

Погрешность измерения из-за неопределенности излучательной способности может быть исключена при помощи термобатарей, которую размещают вблизи объекта измерения. Холодные спаи термобатарей автоматически нагреваются так, чтобы разность температур между рабочим и холодным спаями исчезла. Тогда второй термоэлектрический термометр будет показывать действительную температуру [9.92].

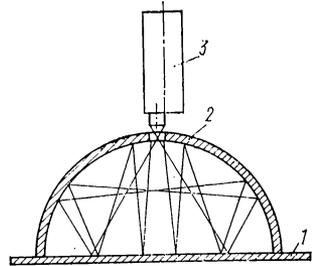


Рис. 9.59. Измерение температуры поверхности с помощью вогнутого сферического рефлектора:

1 — объект измерения; 2 — рефлектор; 3 — пирометр излучения

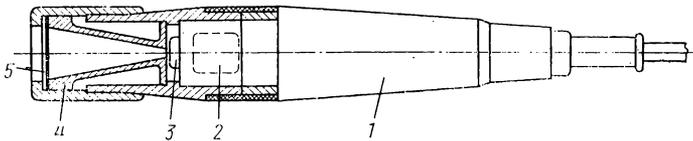


Рис. 9.60. Пирометр излучения для измерения температуры поверхности с коническим рефлектором (Ультракуст):

1 — рукоятка, в которой находятся подстроечные резисторы, а при стационарном использовании и измерительный усилитель; 2 — резистор для компенсации влияния изменений температуры корпуса пирометра, находящийся в тепловом контакте с термобатареей 3; 4 — конический рефлектор; 5 — защитная пленка, пропускающая инфракрасное излучение

Влияние изменяющейся даже в широких пределах излучательной способности можно устранить без дополнительного нагрева тем, что измеряемая энергетическая яркость путем многократного отражения приближается к яркости черного излучателя. Для этого на измеряемом объекте или в непосредственной близости от него располагают очень хорошо отполированное, позолоченное внутри вогнутое зеркало (рис. 9.59). Через окно из флюорида кальция измеряемое излучение попадает на термоэлектрический приемник излучения. С помощью такого пирометрического устройства можно измерять температуру тел с излучательной способностью от 0,6 до 1 в интервале температур от  $50$  до  $1300^\circ\text{C}$  с погрешностью  $1\%$ , если пирометр градуируется для излучательной способности 0,8 [9.93]. Для кратковременных измерений температуры поверхностей разработан переносный прибор с коническим рефлектором (рис. 9.60).

$$t - t_{\varepsilon} = T_{s\perp} + \frac{\lambda}{C_s} \ln \left[ 2 - \exp \frac{C_2 (T_{s\perp}^{-1} - T_{s\parallel}^{-1})}{\lambda} \right] \quad (\text{Прим. ред.})$$

Метод кажущегося увеличения излучательной способности с помощью многократного отражения можно скомбинировать с методом повышения энергетической яркости излучения объекта путем дополнительного облучения его поверхности от стороннего излучателя [9.86 и 9.87]. Для этого отражатель нагревается приблизительно до температуры измеряемого тела. При этом достаточно, чтобы рефлектор из чисто отполированной меди имел наибольшую отражательную способность в диапазоне длин волн 1—5 мкм. Тогда вследствие малой остаточной разности температур между рефлектором и измеряемым объектом влияние изменяющейся излучательной способности объекта пренебрежимо мало. С помощью такого же рода пирометра излучения, но в болометрическом приемнике излучения для измерения низких температур можно повысить кажущуюся излучательную способность, например, при отжиге биметаллической ленты (сталь—свинцовистая бронза), проходящей через установку с индукционным нагревом, от  $\varepsilon = 0,2$  до  $\varepsilon = 0,95$ , что позволяет снизить погрешность измерения до 5 К при температуре 525° С [9.94].

#### 9.7.7.4. ИСКЛЮЧЕНИЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПИРОМЕТРАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Для лабораторных исследований разработан трехцветовой пирометр, в котором температура определяется по энергетическим яркостям излучения в трех длинах волн [9.96а]. Если интервал между длинами волн при изменении вида расплава и температуры остается неизменным, то отношение энергетических яркостей  $L_1 L_3 / L_2^2$  не зависит от излучательной способности  $\varepsilon$ . Воспроизводимость показаний пирометра двойного спектрального отношения значительно хуже, чемобычных пирометров спектрального отношения.

Из уравнений (9.19а, 9.19в и 9.19г) можно определить действительную температуру  $t$  измеряемого объекта по величине отношения энергетических яркостей при двух длинах волн, которое является функцией цветовой температуры  $t_r$ , и из отношения излучательных способностей при этих длинах волн. По закону Кирхгофа отношение излучательных способностей равно отношению коэффициентов поглощения при одних и тех же спектральных и геометрических условиях. Отношение излучательных способностей не может быть определено непосредственно из эксперимента. Однако отношение коэффициентов поглощения объекта можно получить из приращений температуры при двух длинах волн, если объект измерения облучается через оптику пирометра от стороннего источника излучения. Тогда, если  $E(\lambda)$  — энергетическая освещенность, получим

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\alpha(\lambda_1) E(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_2) E(\lambda_2)}. \quad (9.46)$$

Эти приращения температуры могут быть косвенно определены из приращения энергетической яркости стороннего источника излучения в третьей, возможно более широкой спектральной области  $\lambda_0$ , не включающей длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Этим исключается влияние излучения, отраженного от измеряемого объекта.

Если это излучение стороннего источника падает на черное тело, то оно также нагревается. Яркость испускаемого этим черным телом излучения  $L$  пропорциональна энергетической освещенности объекта измерения, так что  $L = kE(\lambda)$ .

Так как при этом приращение температуры  $\Delta T$  тоже должно быть увеличено в сигнале в  $k$  раз, то с учетом (9.46) имеем

$$\frac{\alpha(\lambda_1) kE(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_2) kE(\lambda_2)} = \frac{\alpha(\lambda_1) L_1}{\alpha(\lambda_2) L_2} = \frac{k \Delta T_1}{k \Delta T_2} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2}$$

или 
$$\frac{(\alpha_1)}{(\alpha_2)} = \frac{L_2 \Delta S_1}{L_1 \Delta S_2} = \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (9.47)$$

Для определения отношения используется нулевой метод. В качестве стороннего источника излучения используют криптон-ионный лазер. Измерения на вольфрамовой температурной лампе показали совпадение между собой и в сравнении со значениями, определенными де Восом при 1415 К (см. рис. 9.4), лучшее, чем 0,2% [9.96].

Для регулирования температуры расплавов в сталеплавильных и литейных цехах необходимо точно измерять эти температуры независимо от излучательной способности расплавов. С помощью описанных выше схем можно определять истинную температуру нагретых твердых тел независимо от их излучательной способности. Для очень подвижных расплавов, поверхность которых находится в более или менее окисленном состоянии, эти методы неприменимы. В этом случае действительную температуру измеряют с помощью пирометров спектральных отношения, если объект имеет излучательные свойства серого тела. Однако если излучательная способность при обоих длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  различна, то опять возникает погрешность, которая при высоких значениях  $\epsilon$  меньше, чем при измерении яркостными пирометрами, но которую следует учитывать при низких значениях  $\epsilon$  (см. табл. 9.3). Величина этой погрешности зависит, кроме того, как от температуры, так и от химического состава расплава и шлака.

Остаточную погрешность при измерении температуры пирометрами спектрального отношения можно в значительной мере исключить, если подобно исключению погрешности из-за излучательной способности  $\epsilon$  в яркостных пирометрах проводить однократные, а в случае необходимости — периодически повторяющиеся определения действительной температуры расплавов или нагретых твердых тел с помощью подходящего термоэлектрического термометра, а затем устанавливать показания пирометра излучения на измеренные таким образом значения температуры. Если сделать приемлемое в определенных пределах допущение, что для излучающего тела разность излучательных способностей при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с увеличением  $\epsilon_1$  уменьшается и при  $\epsilon_1 = 1$  становится равной нулю, то величина  $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/(1 - \epsilon_1) = K$  должна иметь постоянное значение [9.40, 9.95]. Для измерения действительной температуры независимо от излучательной способности на двух длинах волн путем измерения отношения энергетических яркостей компенсационным методом (см. рис. 9.52) в измерительный контур  $\lambda_2$  введено дополнительное напряжение. Для этого измерительный потенциометр связан со следящим потенциометром, характеристика сопротивления — температура которого соответствует закону излучения Планка. Это напряжение подается на фотоэлемент с эффективной длиной волны  $\lambda_2$ . Однако, так как из-за этого температурные показания сдвигаются, они должны быть скорректированы в обратную сторону. Оба сопротивления для создания дополнительного напряжения и для обратного сдвига связаны через переключатель корректировки ( $K$ -переключатель). После установки на измеренную опорную температуру с помощью  $K$ -переключателя показания пирометра в значительной мере не зависят от изменений  $\epsilon$ .

Погрешность при длительных измерениях температуры расплавов стали лежит в пределах 10—15 К, в среднем она равна 5 К; при измерении температуры чугуна в вагранках погрешность составляет  $\pm 12$  К при измеряемой температуре порядка 1500° С. При сравнительных испытаниях с термопарой погружения 75% расхождений показаний лежат в пределах  $\pm 5$  К. Аналогичные результаты получаются при измерении температуры чугуна на выпусках доменных печей [9.95; 9.110; 9.111].

## 9.8. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

### 9.8.1. ЧЕРНЫЕ ТЕЛА; ГРАДУИРОВКА ЭТАЛОННЫХ ПИРОМЕТРОВ

Для реализации модели черного тела, служащего для воспроизведения фиксированных температурных точек, существуют различные способы [9.2]. Один из них (способ погружения) заключается в том, что полое керамическое тело погружается в ванну с расплавом металла. При вертикальном расположении

погружаемого керамического тела (рис. 9.61, а) коническое отверстие визируется через абсолютно отражающую призму градуируемым первичным эталонным пирометром [9.97]. Возможные погрешности, обусловленные отклонением излучения на призме, устраняются при горизонтальном расположении выходного излучающего отверстия (см. рис. 9.61, б) [9.98, 9.99]. Энергетическую яркость измеряют при плавлении и затвердевании металла. Погружаемые тела нагреваются в тигельной печи сопротувления или в индукционной печи.

Градуировку эталонных пирометров по фиксированным точкам в государственных институтах осуществляют с помощью визуальных пирометров сравнения, в большинстве случаев визуальных микропирометров или объективных фотоэлектрических пирометров. Ослабление энергетической яркости в эталонном пирометре осуществляется путем изменения силы тока от температуры  $t_s$  до температуры плавления золота  $t_{Au}$  с помощью обтюратора, расположенного перед пирометром (см. 9.7.1.2.1).

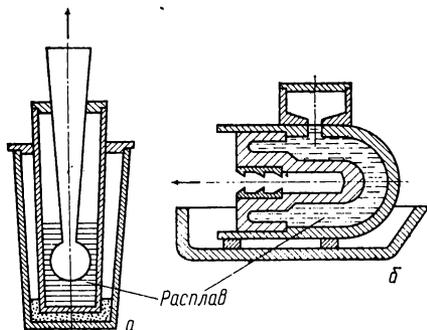


Рис. 9.61. Модель абсолютно черного тела излучателя для измерения температур фиксированных точек:

а — вертикальное расположение; б — горизонтальное расположение

создаваемого излучением черного тела при температуре затвердевания золота ( $1064,43^\circ\text{C}$ ). Значения сигналов, соответствующих более высоким температурам, определяют из отношения спектральной энергетической яркости  $L_{\lambda_s}$  черного излучения с температурой  $t$  к его яркости при температуре  $t_{Au}$  [см. уравнение (2.20)].

Для этого энергетическая яркость черного излучателя постепенно, начиная от температуры затвердевания золота, удваивается. Для этого используют зеркальное устройство с клиньями из стекла с одинаковыми пропусканиями. Температура черного тела сравнения повышается до тех пор, пока ослабляемая этим устройством энергетическая яркость излучения вновь не достигнет величины яркости излучения при температуре затвердевания золота. В этом случае после прекращения ослабления энергетическая яркость излучения вдвое больше, чем при температуре затвердевания золота. В результате повторного процесса удвоения получаем температурную шкалу первичного эталонного пирометра. Погрешность этих измерений при температуре затвердевания золота составляет  $\pm 0,10\text{ K}$ . При использовании вакуумной лампы накаливания с вольфрамовой лентой в качестве черного тела погрешность составляла при температуре  $1627\text{ K} \pm \pm 0,25\text{ K}$ , а при  $2200\text{ K} \pm 1,6\text{ K}$ .

В фотоэлектрических первичных эталонных пирометрах в большинстве случаев в качестве приемника излучения используют фотоумножители, что объясняется их высокой чувствительностью в видимой области спектра. Однако их можно характеризовать лишь как квазистабильные приемники излучения, так как они стабильны только в течение довольно короткого времени измерения и при достаточно малых фототоках. Эти условия выполняются, когда пирометрические измерения проводят при постоянной силе тока лампы сравнения и при использовании секторных дисков для ослабления энергетической яркости, аналогично

Температурная шкала эталонного пирометра должна быть проградуирована по температуре плавления золота (см. 2.2.3). Для определения температурной зависимости силы тока первичного эталонного пирометра следует использовать фотоэлектрические способы измерения. В СССР и США для этой цели применяют фотоэлектрические пирометры с фотоумножителями в качестве приемников излучения. В СССР используется пирометр с модулированием излучения. Экстраполяция от точки затвердевания золота к более высоким температурам осуществляется методом удвоения энергетической яркости [9.100, 9.101]. Сначала измеряется значение выходного сигнала,

тому, как это делается в пирометре с нейтральным клином. Такой первичный эталонный пирометр, у которого постоянная сила тока лампы сравнения соответствует энергетической яркости при температуре затвердевания золота, т. е. при  $I_{Au}$ , работает по методу «постоянного света». Он с достаточно высокой точностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к пирометрам этого типа в диапазоне температур 1000—3400° С. Повышение точности по сравнению с визуальным первичным эталонным пирометром при воспроизведении температурной шкалы можно оценить как десятикратное [9.102].

## 9.8.2. ГРАДУИРОВКА ПИРОМЕТРОВ ПО ЧЕРНОМУ ТЕЛУ

Градуировку и поверку пирометров излучения можно проводить по черному телу, температура которого ограничивается температурой, допустимой для данной нагревательной печи. Отверстие трубки, через которое производится визирующее излучение источника, должно быть достаточно мало по сравнению с длиной трубки, чтобы излучение источника многократно отражалось от стенок трубки. Керамические трубки обычно чернят с внутренней стороны окисью кобальта. При более высоких требованиях к измерению на переднем конце трубки устанавливают большее число диафрагм, почти достигающих источника излучения. В результате этого повышается равномерность распределения температуры на большем участке трубки, а также увеличивается степень черноты выходящего из трубки излучения. В случае использования керамических трубок температура источника излучения измеряется при помощи термопары, расположенной на его задней стенке. Для создания излучателей Луммер и Курльбаум вывели в 1901 г. условия и предложили формы их исполнения, которые были значительно усовершенствованы в 1926 г. Бродуном и Гофманом [9.2]. С помощью таких источников черного излучения можно градуировать или поверять пирометры независимо от их спектральной чувствительности.

Вольфрамовая лампа накаливания также может быть использована в качестве черного тела для спектральной области 0,4—1,0 мкм. Источником черного излучения является вертикально расположенная вольфрамовая трубка диаметром 3,1 мм и длиной 25 мм, имеющая в осевом направлении прорезь шириной 0,2 мм, из которой выходит излучение. Трубка закрепляется на молибденовых и никелевых выводах и помещается в заполненную аргоном стеклянную колбу с кварцевым окошком для выхода излучения. В области температур 2000—2400 К излучательная способность такой трубки равна 1 с недостаточностью 2% [9.103].

Поверочные и градуировочные печи для технических пирометров излучения должны иметь возможно меньшие отверстия трубок или диафрагм. Отверстия, однако, должны быть и достаточно велики, чтобы при выбранном удалении пирометра от печи достигался необходимый для него минимальный диаметр измерительного поля. Если для правильного измерения температуры требуются лишь излучатели с малым диаметром выходного отверстия, как например при измерении с помощью большинства энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения, то можно использовать трубчатые печи небольшого диаметра. В качестве излучателя в этих печах используют пробку (заглушку), устанавливаемую примерно в середине длины трубы. В качестве материала для нее в зависимости от температуры можно использовать медь, окислительную сталь, керамику или графит. Такие пробки должны подвергаться чернению при помощи окиси кобальта. Нагрев стенок трубы должен быть рассчитан таким образом, чтобы перед пробкой на участке трубы, равном трем ее внутренним диаметрам, обеспечивалась постоянная температура.

При температурах источника излучения примерно до 1450° С можно использовать печи с трубами из спеченного глинозема ( $Al_2O_3$ ), которые в случае большого внутреннего диаметра подвергают чернению окисью кобальта. В случае труб малого диаметра при определенных условиях можно отказаться от чернения. Если эти трубы нагреваются от нагревательной обмотки или силитовых стержней (рис. 9.62), электрическое сопротивление которых уменьшается при увеличении

температуры, то необходимо задавать и регулировать необходимую температуру. Для температур до 1700° С могут быть использованы трубчатые печи с родиевыми проволочными нагревателями.

Отверстие трубы на конце выхода излучения должно быть открыто только во время измерения. По окончании измерения его следует закрыть с помощью дверцы или пробки. Требуемый минимальный диаметр трубы  $D$  получается из значения показателя визирования пирометра  $d = a/D$ . При расстояниях между пирометром и отверстием трубы  $a = 400$  мм и  $d = 10$  диаметр  $D$  должен составлять не менее 40 мм.

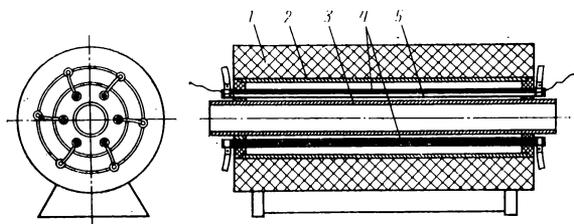


Рис. 9.62. Трубчатая печь с силиковыми нагревателями:

1 — тепловая изоляция; 2 — наружная керамическая труба; 3 — внутренняя керамическая труба; 4 — силиковые стержни; 5 — термоэлектрический термометр

Для фотоэлектрических пирометров, имеющих относительно большие показатели визирования, диаметр трубы может быть значительно меньшим. Так, для интервала температур 500—1000° С достаточно отверстия диаметром  $D = 1,27$  мм. Необходимая при этом мощность печи составляет не более 275 Вт [9.104].

Для измерения температур в диапазоне 1200—3200° С используют трубчатые печи Нернста-Таммана с угольными или графитовыми трубами диаметром 40—60 мм. При температурах свыше 1500° С в известных условиях рабочее пространство угольных, а также родиевых трубчатых печей следует заполнять защитным газом, например аргоном. Угольная труба по торцам закрепляется в водо-

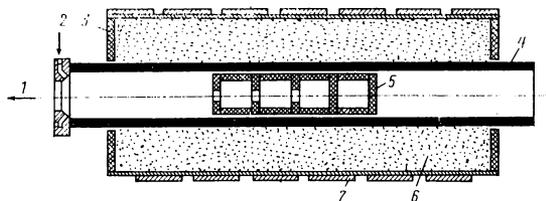


Рис. 9.63. Трубчатая графитовая печь индукционного нагрева:

1 — направление выхода излучения; 2 — подача защитного газа; 3 — асбест; 4 — графитовая труба; 5 — графитовые вставки; 6 — угольная засыпка; 7 — индуктор

охлаждаемых токоподводах. Кроме того, корпус трубчатой печи также охлаждается водой. Между охлаждающей рубашкой и угольной трубой находится угольный порошок в качестве теплоизоляции, предназначенный также для уменьшения угара угольной трубы.

В других конструкциях печей в качестве теплоизоляции вместо угольного порошка используют цилиндрические экраны из танталовой или молибденовой фольги, устанавливаемые снаружи графитовой трубы. Благодаря этому значительно снижается время выхода печи на установившееся значение температуры. В некоторых конструкциях печей выходное отверстие трубки имеет окошко из фтористого кальция [9.105].

Если вместо нагрева сопротивлением используют индукционный нагрев, то можно отказаться от охлаждения токоподводов водой (рис. 9.63) [9.108]. Такую

печь можно использовать для температур до 3500 К. Для нагрева печи требуется генератор мощностью 72 кВт, выдающий ток частотой 10 кГц. Излучающее тело в этих печах состоит из последовательно расположенных диафрагм и полого графитового цилиндра. Труба заполняется аргоном в качестве защитного газа.

Печи с угольными трубами с внутренним диаметром 40—60 мм, если не используются дополнительные диафрагмы, имеют эквивалентную излучательную способность порядка 0,98. Путем установки диафрагм эту излучательную способность можно повысить до 0,995. Если печь заключена в герметичный корпус с кварцевым окошком, то следует учитывать его влияние на поглощение излучения, в результате которого излучательная способность такой печи уменьшается [9.107].

Если показатель визирования пирометра излучения для измерения низких температур мал, т. е. необходимо черное тело большего диаметра, при котором пренебрежимо малое излучение пирометра полностью перекрывается изображением объекта, то при расстояниях между пирометром и черным телом порядка 20—30 см для градуировки уже нельзя использовать трубчатые печи. В этом случае для температур до 90° С можно пользоваться металлическим сосудом, заполненным водой. Поверхность сосуда, на которую визируется пирометр, должна быть достаточно плоской и зачерненной. Обычно по сосуду с тепловой изоляцией протекает вода, имеющая постоянную температуру, которая поддерживается с помощью циркуляционного термостата. При этом температуру воды можно измерять с помощью ртутного термометра. Благодаря небольшой толщине стенки сосуда температура излучающей поверхности сосуда достаточно точно соответствует температуре воды, если эта поверхность защищена от воздушных потоков.

Для температур в диапазоне 90—500° С градуировку и поверку пирометров, имеющих малые показатели визирования, можно производить, визируя их на толстые пластины, например из никеля, с очень близко расположенными друг от друга несквозными отверстиями. Противоположная сторона пластины теплоизолирована и снабжена электрическим нагревателем. Температура пластины измеряется с помощью одной или нескольких термопар, зачеканенных в одно или несколько отверстий пластины. Поверхность пластины и внутренних стенок отверстий должна быть хорошо зачернена. В этом случае можно считать, что излучательная способность пластины равна 0,96.

Температура полых излучателей измеряется с помощью термометров сопротивления, термоэлектрических термометров или поверенных в РТВ или на заводе-поставщике вторичных эталонных пирометров излучения. При этих поверках на черных телах не требуется, чтобы эффективный диапазон длин волн эталонного пирометра соответствовал аналогичному диапазону поверяемого пирометра.

### **9.8.3. ПОВЕРКА ЯРКОСТНЫХ ПИРОМЕТРОВ ПРИ ПОМОЩИ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ЛАМП С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ НИТЯМИ НАКАЛА**

Свойства пирометрических ламп с вольфрамовыми ленточными нитями накала, а также возможные погрешности измерения при их поверке рассмотрены в 9.7.1.2.2. Согласно работе [9.2], при поверке и градуировке визуальных пирометров всегда визируются одни и те же участки вольфрамовой ленты в одном и том же направлении как поверяемым, так и эталонным пирометрами. Этот участок вольфрамовой ленты маркируется специальной меткой. Кроме того, на колбе лампы указывается, в каком направлении следует наблюдать вольфрамовую ленту. При поверках пирометров при помощи пирометрических ламп с вольфрамовыми ленточными нитями накала поверяемый пирометр должен быть чувствительным к тем же длинам волн излучения, что и эталонный пирометр и пирометрическая лампа. Поскольку поверенные в РТВ лампы точнее, чем поверенные оптические пирометры с исчезающей нитью, то поверку целесообразно проводить на проградуированных и поверенных пирометрических лампах с ленточной вольфрамовой нитью накала (о погрешностях в результате отклонений от эффективных длин волн см. уравнение (9.39) и табл. 9.6, колонка Е).

Ток лампы накаливания следует измерять с помощью амперметра с классом точности не хуже 0,1 и в процессе измерения поддерживать постоянным. Если измерительное поле объекта для данного пирометра больше, чем вольфрамовая лента, то ее изображение следует увеличить с помощью линзы, как показано на рис. 9.64.

Как указано в 9.7.1.2, поверку и градуировку оптических яркостных пирометров можно производить с помощью прокалированной и поверенной вольфрамовой ленточной пирометрической лампы или на вольфрамовой ленточной пирометрической лампе, но путем сравнения с показаниями поверенного эталонного пирометра того же типа, что и поверяемый пирометр. В последнем случае не обязательно иметь градуировочную кривую или таблицу лампы.

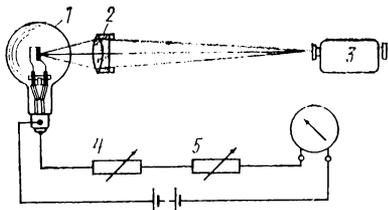


Рис. 9.64. Установка для поверки пирометров излучения на пирометрической лампе с вольфрамовой ленточной нитью накала (см. рис. 9.39):

1 — пирометрическая лампа; 2 — линза с диафрагмой; 3 — пирометр; 4, 5 — переменные сопротивления для установки силы тока

- Вследствие термической инерции ленточной лампы после значительных изменений тока требуется выдержка в течение 10—30 мин. Не следует превышать силу тока, указанную в протоколе испытаний. Если ленточная лампа не работала в течение длительного времени (нескольких дней), повышать силу тока следует постепенно до достижения устойчиво неизменной яркостной температуры, равной

1100° С. При этой температуре определяется соответствующая сила тока. Через час после этого следует увеличить силу тока до достижения максимально допустимой температуры. Затем сила тока вновь определяется при температуре 1100° С. Обе полученные величины силы тока должны находиться в пределах допустимой погрешности. Воспроизводимость измерения в диапазоне температур 800—1500° С должна быть лучше, чем 0,5—1,5 К, а в диапазоне 1500—2200° С лучше, чем 1,5—3 К.

## 9.9. ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

### 9.9.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ВЫШЕ 600° С

#### 9.9.1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ; ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЯРКОСТНЫХ ПИРОМЕТРОВ

Точность измерения всех энергетических пирометров, применяемых на промышленных предприятиях, должна проверяться через определенные промежутки времени. В большинстве случаев эту поверку производят в заводских лабораториях на черных телах, например трубчатых угольных печах, температуру которых измеряют с помощью вторичных эталонных оптических пирометров (см. 9.7.1.2), которые также должны через определенное время проверяться в лабораториях изготовителей или в РТВ.

Лишь благодаря применению визуальных яркостных пирометров (оптических пирометров с исчезающей нитью) удалось безошибочно определять температуру в замкнутом пространстве высокотемпературных печей и в результате этого значительно улучшить качество выпускаемой продукции. Если стенки печи или объект измерения визируют через отверстия для обслуживания или через небольшие смотровые отверстия, то с помощью визуальных пирометров в большинстве случаев удается с достаточно высокой точностью измерить температуру стенок печи или объекта, если его температура близка к температуре стенок печи (см. 9.6.1.2). Правильные результаты измерения получают лишь в том случае,

если в поле измерения пирометра нет оказывающих влияния на точность измерения газов, паров или твердых частиц, поглощающих излучение.

Однако если нужно определить температуру раскаленных свободно излучающих тел или температуру чугуна на выпуске доменной печи, из ковша при отборе пробы ложкой или при разливке из вагранки, то полученная с помощью оптических пирометров с исчезающей нитью или энергетических пирометров температура значительно ниже действительной [9.122]. Благодаря усовершенствованию визуального цветового пирометра сравнения Незера (см. 9.7.2). [9.35] удалось в производственных условиях примерно с такой же точностью, что и с помощью термоэлектрических термометров, погружаемых в расплав и имеющих вследствие этого небольшой срок службы, измерять температуру свободно излучающих расплавов при выпусках. На основе многочисленных измерений было установлено, что измеренные таким образом цветовые температуры  $t_f$  в зависимости от их значений, химического состава и излучательных характеристик расплава на 60—200 К выше яркостных температур  $t_s$ , получаемых при измерении с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью [9.111, а, 9.122].

При длительных измерениях с помощью пирометров спектрального отношения с кремниевыми фотозлементами оказалось, что излучательная способность чугуна в выпускном желобе доменной печи, а также в струе при разливке из вагранки может принимать различные значения в зависимости от состава легирующих элементов и от окислительной способности расплава [9.110]. Поэтому полученные результаты измерения всегда содержат ту или иную погрешность, даже если температуру измеряют энергетическими пирометрами, показания которых скорректированы по показаниям термоэлектрического термометра погружения, или когда используют пирометры спектрального отношения, для корректировки показаний которых взято одно значение отношения излучательных способностей. Чтобы получить действительную температуру расплава при выпуске, следует пользоваться термоэлектрическими термометрами с защитными колпачками, которые могут находиться в струе расплава в течение трех часов.

Для текущего производственного контроля и прежде всего для автоматизации технологических процессов следует использовать энергетические пирометры или пирометры спектрального отношения непрерывного действия. Но следует отметить, что для производственного контроля все еще находят широкое применение визуальные яркостные пирометры. Техники-измерители, занятые на производственном контроле, должны периодически поверять все стационарные пирометры излучения. Для этого можно использовать переносные портативные визуальные пирометры, например оптические пирометры с исчезающей нитью или цветовые пирометры. Кроме того, на многих производственных участках требуются дополнительные температурные измерения, как, например, на различных участках прокатных цехов, в небольших плавильных и нагревательных печах, вдоль ванн с расплавом на стекольных заводах, а также в кольцевых или камерных печах на предприятиях керамической промышленности [9.130].

### 9.9.1.2. АРМАТУРА ДЛЯ МОНТАЖА ПИРОМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры излучения, используемые на промышленных предприятиях для измерения температуры, если они устанавливаются стационарно, должны быть оснащены арматурой, отвечающей условиям эксплуатации пирометров. Эта арматура должна защищать пирометры от воздействия окружающей среды и обеспечивать такие условия измерения, чтобы можно было получать **достоверные** результаты в течение достаточно длительного времени. Арматура должна препятствовать загрязнению оптики пирометра пылью и повреждению ее твердыми или жидкими выбросами. Недопустимо также, чтобы пирометр нагревался излучением, выходящим из печи. Кроме того, необходимо следить за тем, чтобы в пространстве между пирометром и объектом измерения не попадали частицы пыли, дым или пары из печи, которые могут привести к получению **неправильного** результата измерения. Установки должны быть расположены таким образом, чтобы можно было удобно визировать объект измерения, а также чистить пиро-

метр, его арматуру и отверстие в стенке печи. Благодаря соответствующим системам унифицированных узлов можно так комбинировать различные виды арматуры, что с помощью небольшого количества монтажных деталей можно выполнить требования, связанные с той или иной конкретной проблемой измерения [9.108].

Так, например, пирометр 1 (рис. 9.65) можно соединить с промежуточным фланцем 2 при помощи быстродействующего замка-защелки. Таким образом

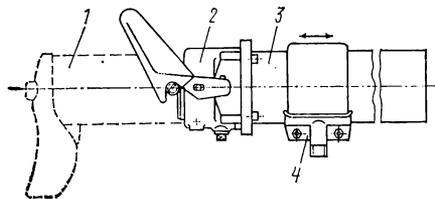


Рис. 9.65. Пирометр с установочной арматурой:

1 — пирометр; 2 — промежуточный фланец с быстродействующим замком-защелкой и штуцерами для подачи воздуха; 3 — металлическая установочная (визирная) труба; 4 — холодильник

можно в любой момент просто и быстро произвести поверку и чистку оптики пирометра. В некоторых случаях достаточно установить пирометр либо непосредственно, либо через промежуточный фланец на штатив с шаровым шарниром. Это позволяет перемещать пирометр в горизонтальной и вертикальной плоскостях для визирования объекта измерения в нужном направлении.

К промежуточному фланцу можно присоединять визирные или установочные трубы 3 из стали или керамики. Их можно обдувать воздухом через штуцеры, расположенные на промежуточном фланце. Кроме того, на установочной трубе можно смонтировать

холодильник 4 в форме обоймы, чтобы не допустить нагрева пирометра от горячей визирной трубы. Необходимо, однако, следить за тем, чтобы температура продуваемого воздуха в результате этого охлаждения не опускалась ниже точки росы.

Для защиты от влияния излучения раскаленного объекта на пирометр или обслуживающий персонал можно установить защитный экран на промежуточный фланец или удлинительный патрубок.

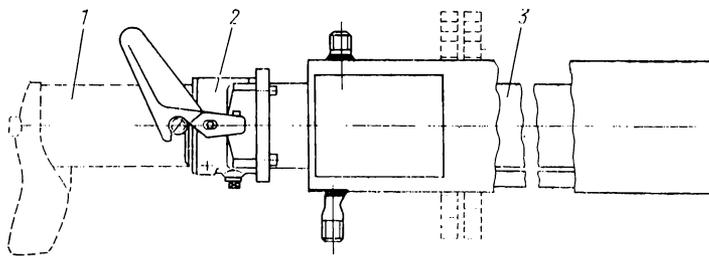


Рис. 9.66. Арматура пирометра с водоохлаждаемой фурмой:

1 — пирометр; 2 — промежуточный фланец; 3 — водоохлаждаемая фурма

Удлинительные патрубки служат также для увеличения расстояния между установочной или визирной трубой и пирометром. При жестком монтаже пирометр с промежуточным фланцем может быть установлен непосредственно или через удлинительный патрубок на стенке печи с отверстием, предусмотренным для визирования измеряемого объекта.

При измерениях высоких температур на смонтированной в стенку печи установочной трубе для защиты ее от угара должна быть предусмотрена водоохлаждаемая фурма (рис. 9.66). Водоохлаждаемая фурма должна в этом случае несколько выступать внутрь печи. Благодаря этому происходит грануляция жидкого шлака или кладки печи, так что не происходит завала отверстия

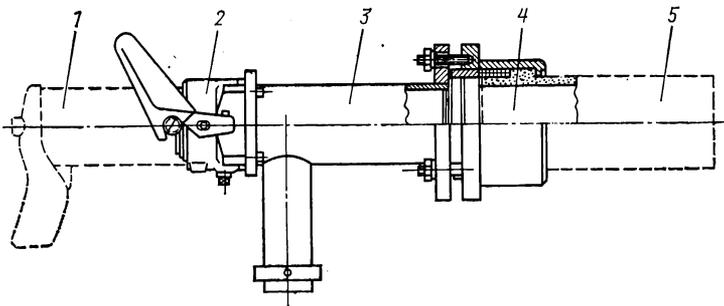


Рис. 9.67. Армура пирометра с керамической визирной трубой:

1 — пирометр; 2 — промежуточный фланец; 3 — патрубок со штуцером для подачи воздуха; 4 — монтажный фланец для установки визирной трубы; 5 — керамическая визирная труба

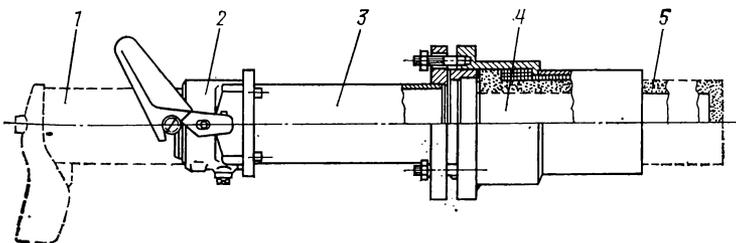


Рис. 9.68. Армура пирометра с керамической калильной трубой для нагревательных колодцев:

1 — пирометр; 2 — промежуточный фланец; 3 — удлинительный патрубок; 4 — монтажный фланец со стальной трубой; 5 — керамическая калильная труба

для визирования. Водоохлаждаемую фурму следует устанавливать под углом  $30^\circ$  вверх или вниз от горизонтальной линии, и именно так, чтобы выход воды всегда был расположен в верхней точке охлаждающей рубашки, поскольку лишь в этом случае она полностью омывается охлаждающей водой.

Чтобы при температурах примерно до  $1700^\circ\text{C}$  удалить от пирометра пламя и дымовые газы, следует использовать показанную на рис. 9.67 фланцевую трубу 3 со штуцерами для продувки воздуха и керамическую термостойкую трубку для визирования из силумита или массы  $H$ , которая выступает во внутреннее пространство печи.

Если излучательная способность рабочего пространства печи невелика, печь заполнена дымовыми газами, то применяют омываемую печными газами или погруженную в расплав замкнутую с одной стороны силитовую калильную трубу, термостойкую до температуры  $1650^\circ\text{C}$ . Визируется дно этой трубы (рис. 9.68). В печных газах отношение длины равномерно нагретой трубы к ее диаметру должно составлять не менее чем 6 : 1. Труба 5 уплотняется с помощью наружного

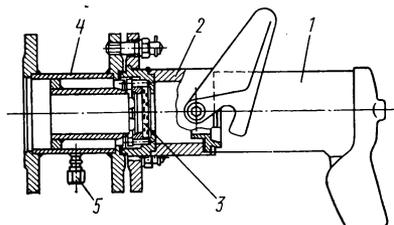


Рис. 9.69. Армура пирометра с кварцевым окошком:

1 — пирометр; 2 — промежуточный фланец с герметично установленным сменным кварцевым окошком 3; 4 — монтажный патрубок, соединенный с промежуточным фланцем 2 с помощью поворотного фланцевого зажима; 5 — штуцер для подачи воздуха

фланца 4 путем сальниковой набивки. Для того чтобы пары, приводящие к повреждению оптики пирометра, не могли пройти через калильную трубу, внутри нее путем продувки воздухом следует создавать небольшое избыточное давление по отношению к давлению в рабочем пространстве печи. Воздух для этой цели можно подавать из заводской магистрали сжатого воздуха. Он подвергается очистке в водяном или масляном фильтре и затем проходит через керамический фильтр. Чтобы точно визировать дно калильной трубы, между промежуточным фланцем и фланцем трубы устанавливают сферический шарнир. Такие шарниры позволяют облегчить установку пирометра в тех случаях, когда необходимо визировать объекты небольшого размера.

Требуемый минимальный диаметр  $D$  визирной или установочной труб вычисляется из показателя визирования  $d$  пирометра при известном расстоянии  $a$  между концом визирной трубы и линзой пирометра (см. 9.7.3.1.1).

Если нужно измерить температуру в объеме с высоким давлением, например в воздухонагревателе, пирометр защищают от избыточного давления с помощью кварцевого стекла 3, устанавливаемого герметично на промежуточном фланце, соединенном с патрубком 4 с помощью поворотного фланцевого зажима (рис. 9.69).

## 9.9.2. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДАХ

### 9.9.2.1. ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ

На металлургических заводах в воздухонагревателях доменных печей с помощью пирометров излучения прежде всего контролируется температура подкупольной зоны. Арматура с пирометром (см. рис. 9.69) устанавливается на люке с отверстием (рис. 9.70). Между арматурой 4 и визирной трубой 5 находится задвижка 6, с помощью которой преграждается выход воздуха наружу при снятии пирометра. Жаростойкая футеровка обечайки люка предохраняет стальной кожух воздухонагревателя вблизи люка от перегрева, благодаря чему достигается такая же теплоизоляция, что и в остальной части воздухонагревателя. Отверстие овальной формы создается кладкой из фансового кирпича в соответствии с показателем визирования пирометра.

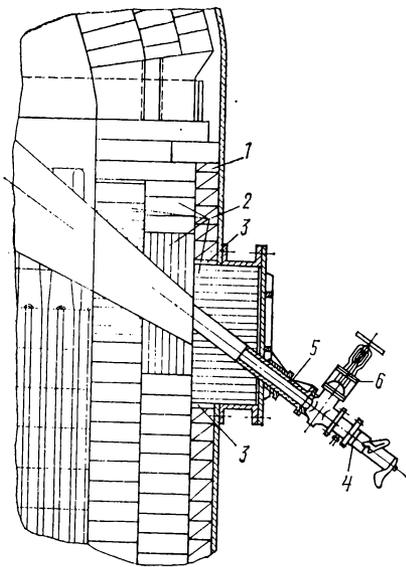


Рис. 9.70. Измерение температуры купола воздухонагревателя:

1 — теплоизоляционная кладка; 2 — жаропрочная кладка; 3 — температурный шов; 4 — пирометр с монтажной арматурой по рис. 9.69; 5 — визирная труба; 6 — задвижка

Чтобы избежать конденсации влажных отходящих газов или насыщенного пара воды воздуха, кварцевое стекло обдувается воздухом, избыток давления которого поддерживается постоянным при изменении давления в воздухонагревателе [9.108]. Для измерения температуры используются рефракторные пирометры с термоэлектрическими приемниками излучения или кремниевыми фотоэлементами. При измерении с помощью пирометра с кремниевым фотоэлементом не возникает погрешности измерения, обусловленной содержанием углекислого газа или паров воды в промежуточной

атмосфере. Поскольку наиболее высокие температуры наблюдаются в области пламенного порога воздухонагревателя, при определенных условиях рекомен-

дуются также измерять температуру насадки воздухонагревателя. Для этого над куполом вертикально устанавливается пирометр, направленный на насадку. Температуру купола составляет примерно 1250—1500° С.

С помощью этого оборудования можно также измерять температуру горячего дутья в воздухопроводе доменной печи. Для того чтобы измерять эту температуру с минимальным запаздыванием, пирометр визируют на пустотелый кирпич в воздухопроводе, характеризующийся незначительной теплоаккумулирующей способностью [9.109].

Температура жидкого чугуна в выпускном желобе доменной печи при выходе из летки зависит от его состава. На температуру выпуска прежде всего оказывает влияние содержание кремния: она возрастает при увеличении его содержания. Одновременно с повышением температуры расплава изменяется его излучательная способность. Перед окончанием выпуска расплав частично покрыт крупными кусками шлака, температура которых ниже температуры жидкого чугуна. Она тем ниже, чем сильнее дутье в доменной печи. Наличие шлака на поверхности расплава может привести к значительному изменению излучательной способности. Это оказывает меньшее влияние на показания пирометров спектрального отношения, чем на показания энергетических пирометров (см. рис. 9.20).

Как следует из табл. 9.14, значения погрешностей при измерениях с помощью откорректированных по  $\epsilon$  пирометров частичного излучения (Ардофот) и пирометров спектрального отношения (Ардокол), которые могут наблюдаться при отклонениях излучательной способности объекта, равных  $\pm 0,05\epsilon$ , не слишком отличаются друг от друга. Поэтому у обоих типов пирометров, откорректированных по  $\epsilon$ , можно ожидать примерно равных погрешностей при измерении температуры, если поверхность расплава достаточно свободна от шлака и пары не могут помешать измерению. В этом случае путем непрерывных сравнительных измерений на выпускном желобе за леткой с помощью погружных термоэлектрических термометров получают совпадающие показания, отклонения которых составляют примерно  $\pm 10$  К (сравни с. 457). Однако следует отметить, что для различных марок чугуна требуется различная корректировка показаний пирометра на излучательную способность.

Т а б л и ц а 9.14

**Погрешность измерения температуры  $\Delta t$  пирометров частичного излучения и пирометров спектрального отношения с кремниевыми фотоэлементами при двух значениях излучательной способности объекта  $\epsilon_1 = 0,75$  и  $\epsilon_1 = 0,35$  со средним отклонением  $\Delta \epsilon = \pm 0,05$  (рассчитано по табл. 9.5)**

$\epsilon_1$	$\Delta t$ , К, при температуре объекта, °С					
	Ардофот			Ардокол		
$0,75 \pm 0,05$	33 ± 8	42 ± 9	52 ± 11	14 ± 4	18 ± 5	22 ± 6
$0,35 \pm 0,05$	118 ± 14	146 ± 16	180 ± 20	76 ± 16	99 ± 21	125 ± 25

### 9.9.2.2. МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

При непрерывном литье заготовка должна охлаждаться в различных зонах, по которым она проходит по заданной программе для получения оптимального качества поверхности. Для измерения температуры можно использовать пирометр частичного излучения или пирометр спектрального отношения с достаточно большим показателем визирования. Пирометр устанавливают снаружи камеры разбрызгивания охлаждающей воды на ее стенке (рис. 9.71). Визируется он на поверхность заготовки, обрызгиваемой через распылительные сопла водой, через

стальную визирную трубу, проходящую между опорными роликами и почти соприкасающуюся своим торцом с заготовкой. При диаметре визирной трубы 20 мм и длине 3000 мм, т. е. при показателе визирования  $d = 150$ , достигается полное облучение приемника излучения пирометра. При большей длине визирной

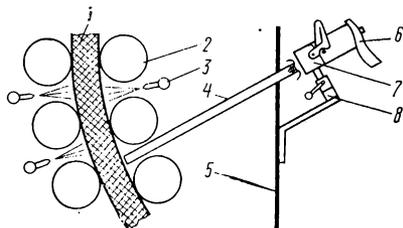


Рис. 9.71. Установка для измерения температуры непрерывно-литой заготовки на участке камеры вторичного охлаждения:

1 — литая заготовка; 2 — опорные ролики; 3 — водяное сопло; 4 — визирная труба; 5 — наружная стенка камеры охлаждения; 6 — пирометр излучения; 7 — промежуточный фланец; 8 — штатив с зажимом

трубы показатель визирования должен быть соответственно больше. Если установка визирной трубы возможна лишь с уклоном в сторону пирометра, то на нижней стороне визирной трубы вне зоны разбрызгивания воды в распылительной камере просверливается отверстие, через которое может стекать вода. Визирная труба обдувается слабым потоком воздуха, поступающего из промежуточного фланца. Для автоматического регулирования температуры поверхности заготовки можно предусмотреть запоминающее устройство пиковых значений, фиксирующее лишь максимальные температуры [9.112].

### 9.9.2.3. СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ

#### 9.9.2.3.1. Мартеновская печь

Температура верха насадок регенераторов мартеновской печи измеряется с помощью термопар PtRh10 — Pt, оснащенных внутренними защитными чехлами из материала KER 710 и наружными защитными чехлами из карбида кремния.

Температура свода измеряется с помощью двух пирометров излучения, смонтированных в задней стенке печи вблизи обеих головок. До тех пор, пока нерасплавленный скрап находится в рабочем пространстве печи, температура свода у завалочного окна наибольшая. Если скрап расплавлен, то наиболее высокая температура свода наблюдается на конце факела у отводящей продукты горения головки печи. Пирометр, показывающий более высокую температуру, посредством избирательного переключателя (который срабатывает при разности температур порядка 5К) через измерительную цепь регулятора температуры так устанавливает подачу топлива, чтобы температура свода печи не превышала допустимую [9.112а].

Пирометр 1 с промежуточным фланцем и крепежными деталями нежестко устанавливается на расстоянии около 300 мм от задней стенки печи (рис. 9.72). Чтобы пирометр можно было легко перемещать во всех направлениях и визировать нужный участок свода, его устанавливают на штативе 2 с помощью зажимов и перемещаемой в вертикальной плоскости установочной трубы, которую можно, кроме того, перемещать в горизонтальной плоскости по U-образной направляющей 3. По гибкому шлангу 4 к пирометру и через сопло 5 к визирному отверстию 6 подведен очищенный сжатый воздух для продувки. Эти меры должны способствовать тому, чтобы печные газы не выносили из печи через отверстие 6 раскаленные частицы окислов, которые могут повредить линзу пирометра. При нарушении подачи сжатого воздуха визирное отверстие автоматически закрывается заслонкой. Несмотря на продувку воздухом, визирное отверстие может зашлаковаться. В этом случае, сдвинув пирометр в вертикальном направлении, можно очистить визирное отверстие с помощью стальной штанги [9.108]. Образование даже небольших наростов на стенках визирного отверстия может привести

к ослаблению измеряемого излучения и искажению показаний пирометров частичного излучения. В этом случае измерения следует проводить с помощью пирометров спектрального отношения, на показания которых ослабление излучения не оказывает влияния (см. 9.6.3) [9.42]. Периодически температура рабочего пространства печи контролируется с помощью визуальных пирометров излучения.

### 9.9.2.3.2. Конверторы

Температуру жидкой стали при повалке конвертора для отбора пробы измеряют с помощью термоэлектрических термометров разового погружения. Непрерывные измерения температуры в процессе продувки проводят с помощью термомпар, армированных чехлами из жаропрочных материалов, например «кромета» [9.113]. Термомпары вводят сбоку через футеровку конвертора. После каждой плавки защитный чехол заменяется. На автоматизированных кислородных конверторах с верхней продувкой специальную водоохлаждаемую фурму со сменной термомпарой периодически вводят в ванну и вынимают с одновременным отбором пробы без повалки конвертора.

На конверторах с донной продувкой процесс плавки удалось контролировать с помощью пирометра излучения, визуального на расплав со стороны днища конвертора через одно из дутьевых сопел [9.114]. Так как излучательная способность поверхности ванны в конверторе мало отличается от единицы, температуру ванны с высокой точностью можно измерять, например, при помощи пирометра полного излучения. Вставленный в водоохлаждаемую фурму пирометр вводят через горловину конвертора почти до поверхности ванны. Отверстие фурмы продувкой сжатого воздуха предохраняется от попадания в него шлака [9.115]. Результаты сравнительных измерений с помощью термоэлектрических термометров разового погружения в среднем отклоняются от результатов, полученных с помощью пирометров излучения, менее чем на  $\pm 10$  К. На рис. 9.73 показана кривая изменения температуры по ходу продувки, полученная в результате таких измерений с помощью пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения.

По излучению пламени, выходящего из горловины конвертора, можно судить о ходе реакций в расплаве и по полученной информации регулировать процесс продувки с целью достижения требуемого качества выплавляемой стали. Исследование распределения энергии по спектру пламени как функции времени продувки показало, что излучение пламени томасовского конвертора складывается в основном из спектров окиси углерода, двуокиси углерода и водяного пара. Вследствие этого в процессе обезуглероживания в видимой области спектра наряду с многочисленными линиями железа, марганца, щелочей и кальция наблюдаются полосы углерода и его окислов. В процессе дефосфоризации полосовой и линейчатый спектры сужаются. Затем по мере удаления фосфора вновь наблюдается усиление

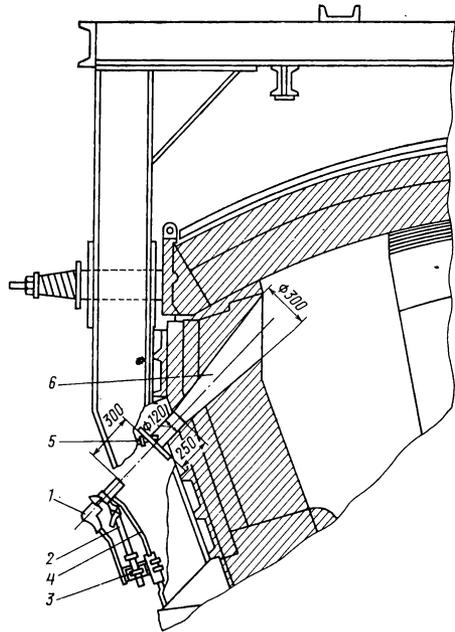


Рис. 9.72. Измерение температуры свода мартеновской печи:

1 — пирометр излучения; 2 — штатив пирометра; 3 — U-образная направляющая, перемещаемая в горизонтальной плоскости; 4 — гибкий шланг для подачи воздуха; 5 — воздушное сопло для продувки визирной трубы 6

непрерывного излучения, источником которого являются прежде всего тонкоизмельченные расклеванные частицы. Это излучение наиболее интенсивно вблизи инфракрасной области примерно при длине волны 1,2 мкм [9.115, 9.116]. При измерениях в видимой области спектра после достижения излучением наибольшей интенсивности можно указать наиболее благоприятный момент для окончания продувки, который, кроме того, зависит также и от температуры ванны [9.117]. С помощью пирометра спектрального отношения, измеряющего отношение энергетических яркостей при  $\lambda_1 = 0,413$  и  $\lambda_2 = 0,73$  мкм, получают аналогичную зависимость (см. рис. 9.73, б). В переходный период непрерывное излучение с длиной

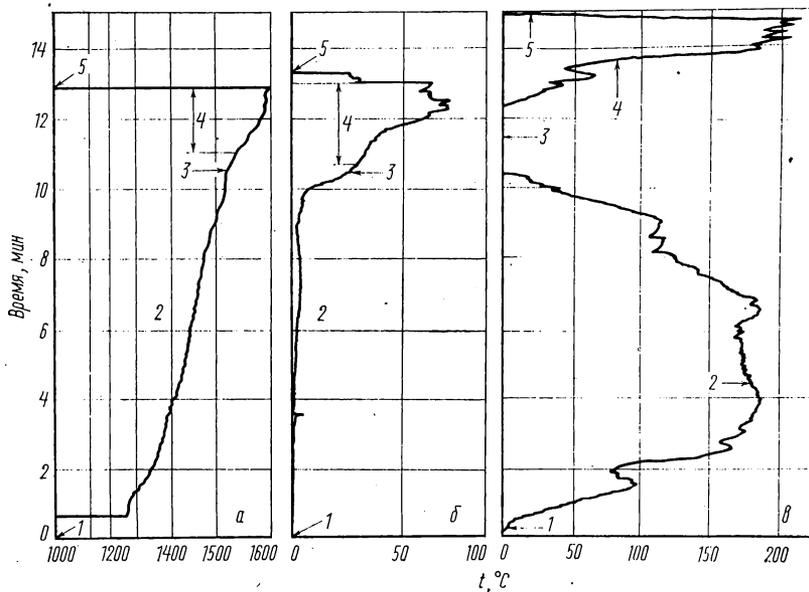


Рис. 9.73. Температура ванны и излучение факела томасовского конвертора:  
 а — изменение температуры ванны при продувке воздухом (измерение пирометром с термоэлектрическим приемником излучения); б — изменение излучения факела при его измерении пирометром спектрального отношения при  $\lambda_2 = 0,73$  мкм и  $\lambda_1 = 0,413$  мкм в процессе продувки воздухом; в — изменение излучения факела при его измерении пирометром спектрального отношения при  $\lambda_1 = 0,888$  мкм и  $\lambda_2 = 1,034$  мкм в процессе продувки воздухом с добавкой кислорода и водяного пара; 1 — начало продувки; 2 — обезуглероживание; 3 — переход; 4 — дефосфоризация; 5 — конец продувки

волны  $\lambda_1 = 0,413$  мкм, источником которого является окись углерода, исчезает. В процессе дефосфоризации непрерывное излучение от твердых частиц и дыма наблюдается в области  $\lambda_2 = 0,73$  мкм.

На характер спектра излучения пламени наряду с температурой и составом ванны значительное влияние оказывают процессы горения с образованием дыма. Отсюда вытекает, что получаемые в близкой инфракрасной области спектра с помощью энергетических пирометров или пирометров спектрального отношения с кремниевыми фотоэлементами зависимости между обезуглероживанием и дефосфоризацией могут значительно измениться аналогично тому, как это наблюдалось при измерениях в видимой области спектра (см. рис. 9.73, в). Так, при томасовском процессе получаемая с помощью пирометра спектрального отношения типа «Ардокол» доля излучения пламени с  $\lambda_2 = 1,034$  мкм в ходе обезуглероживания в инфракрасной области становится значительно больше, чем доля излучения с  $\lambda_1 = 0,888$  мкм. Измеряемый сигнал по окончании обезуглероживания уменьшается. В процессе дефосфоризации сигнал вновь увеличивается, но не

достигает величины, получаемой при измерениях в видимой области спектра [9.118].

Менее наглядную информацию дает расшифровка сигналов, полученных при измерении излучения пламени кислородного конвертора с верхней продувкой при помощи пирометра спектрального отношения типа «Ардокол». В зависимости от расстояния между фурмой для продувки кислорода и поверхностью ванны, а также интенсивности продувки кислородом процессы обезуглероживания и дефосфоризации протекают и по времени различно. Тем не менее, при различных способах верхней продувки измеряемые сигналы дают достоверную информацию о всем процессе продувки. В частности, об окончании процесса продувки можно четко судить по резкому уменьшению сигнала [9.118]. Поскольку томасовские конверторы все шире заменяются конверторами с верхней продувкой кислородом, детальные аналитические исследования спектра в близкой инфракрасной области спектра, а также в видимой области спектра полезны для расшифровки и объяснения спектра излучения пламени в процессе продувки на таких конверторах.

Температуру пламени конвертора можно определить на основе измерений цветовой и яркостной температур (см. 10.1.3). В видимой области спектра с помощью цветowych пирометров сравнения можно измерить действительную и яркостную температуры и по диаграмме рис. 10.4, определить температуру пламени [10.10].

Для непрерывного измерения излучения пламени пирометр устанавливают на расстоянии около 5 м от конвертора таким образом, чтобы можно было визуировать пламя длиной порядка 0,6—1 м над горловиной конвертора. При этом необходимо следить за тем, чтобы на конверторе с верхней продувкой, оснащенный передвижным кессоном, визуирование не производилось ни в этом кессоне, ни в самом конверторе, поскольку в результате этого искажается измеряемый сигнал.

#### **9.9.2.4. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ КОЛОДЦЫ, ПРОКАТНЫЕ СТАНЫ, ПРОХОДНЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ**

Поступающие из сталеплавильного цеха в прокатный цех слитки равномерно нагревают в нагревательных колодцах до температуры прокатки. Надежность контроля температуры в значительной мере зависит от правильности установки измерительного устройства. В непрерывном производстве хорошо зарекомендовали себя пирометры частичного излучения с термопарами в качестве приемников излучения, устанавливаемые с помощью арматуры на стенке колодца (см. рис. 9.68). Через стенку колодца вставляется стальная труба с керамической визирной трубой с закрытым концом. Для защиты визирной трубы от шлака фасонные кирпичи внутренней футеровки колодца выкладываются таким образом, что образуют конусное отверстие, благодаря чему визирная труба не выступает внутрь печи, но хорошо омывается печными газами. В колодцах, работающих на жидком топливе, место установки визирной трубы должно находиться примерно на 4 м выше пода ячейки колодца [9.108].

Из нагревательного колодца слитки поступают на блюминг или слябинг. Слябы подаются в нагревательные печи широкополосного стана, где их нагревают до температуры прокатки. Для измерения температуры в нагревательных печах используют такую же визирную трубу, что и для измерения температуры в нагревательных колодцах. Температуру поверхности сляба в печи измеряют с помощью пирометра спектрального отношения, поскольку нагретые до более высокой температуры, чем металл сляба, частицы шлака на его поверхности не оказывают влияния на показания такого пирометра.

Из нагревательных печей слябы поступают на рольганг. После прохода через валки первой черновой клетки окалина почти полностью удаляется. После этого следует измерить температуру верхней стороны сляба, для того чтобы можно было правильно настроить вертикальную клетку в соответствии с выбранной температурой прокатки. Поскольку сляб и валки сильно охлаждаются водой, для измерения температуры следует использовать пирометр спектрального отношения, на показания которого вода, пары и окалина оказывают относительно небольшое

влияние. Все же воду, ее брызги и пары необходимо по возможности удалить путем отдувки сжатым воздухом. В том случае, когда применяется накопитель пиковых сигналов, который выдает лишь значения температуры свободных от окалины участков поверхности металла, измерение температуры можно производить с помощью пирометра частичного излучения. После черновых клетей прокатанная полоса (подкат) поступает в чистовую группу клетей стана. Перед ней и после нее температура полосы измеряется с помощью пирометров частичного излучения с кремниевыми фотоэлементами. В конце отводящего рольганга температура полосы измеряется при помощи таких же пирометров непосредственно перед моталкой, так как поверхность полосы покрыта тонким прочным оксидным слоем, характеризующимся высоким и постоянным значением излучательной способности.

Если погрешность измерения, обусловленная неопределенностью значения излучательной способности поверхности полосы, слишком велика, то на основании сравнительных измерений, например с помощью яркостного пирометра (оптического пирометра с исчезающей нитью), по табл. 9.14 показания пирометра частичного излучения можно скорректировать на среднее значение излучательной способности. В этом случае погрешность измерения не выходит за допустимые пределы. Для пирометра спектрального отношения коррективка показаний не требуется.

Для визирования металла на прокатном стане используется пирометр с промежуточным фланцем, на котором закрепляется штатив с шаровым шарниром. Штатив крепится при помощи зажима на трубчатой штанге. Кроме того, в случае необходимости защиты от влияния излучения предусматривается защитный экран и обдувка пирометра воздухом для защиты его объектива от водяных брызг.

Если охлажденная полоса должна быть подвергнута нормализации, то при измерении температуры с помощью пирометров излучения после поступления полосы в печь для нормализации получают слишком завышенные значения температуры, что обусловлено влиянием излучения стенок печи (рис. 9.17). Только после приближения температуры поверхности полосы к температуре стен печи показания пирометра становятся правильными. Поэтому в большинстве случаев с помощью термоэлектрического термометра или пирометра излучения измеряют лишь температуру стенки печи. Используя более сложное оборудование, можно измерять температуру отжигаемого металла в процессе нагрева, выдержки и охлаждения. Для этого, например, к поверхности нагреваемого металла подводят стальную визирную трубу с открытым концом. Благодаря этому измерительное поле экранируется от излучения стенок печи. Визирная труба имеет охлаждаемую водой или маслом рубашку. Внутренняя полость визирной трубы продувается воздухом или азотом. Требуемое расстояние от нагреваемого металла зависит от внутреннего диаметра трубы, а также от коэффициента диффузного отражения нагреваемого металла. Отношение этого расстояния к диаметру трубы для кремнистых горячекатаных сталей должно быть равно примерно 1, для этих же сталей в холодном состоянии — около 0,3, а для холоднокатаных кремнистых и конструкционных сталей — около 0,2. Рассчитавшая, исходя из этих расстояний, погрешность измерения, обусловленная излучением стенок печи, при температуре стенок печи 900° С составляет всего около —5 К, если температура отжигаемого металла на 100 К ниже, чем температура стенок печи. При свободном облучении поверхности отжигаемого металла стенами печи погрешность измерения составляла бы примерно 25—50 К [9.119]. Если расстояние слишком мало, то следует соответственно расширить конец визирной трубы.

### 9.9.2.5. ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХ

Для измерения температуры в литейных цехах, как и для измерения при выпуске чугуна из доменной печи, используют погружные термоэлектрические термометры; для кратковременных измерений — термоэлектрические термометры со сменными блоками одноразового погружения и защитой термопары кварцевой трубкой, а для непрерывных измерений — термоэлектрические термометры с легко

заменяемыми внутренними защитными чехлами из спеченного глинозема и наружными чехлами из спеченного карбида кремния. Они позволяют проводить измерения температуры чугуна в случае практически свободной от шлака поверхности при температурах до  $1500^{\circ}\text{C}$  в течение примерно трех часов. Для более длительных непрерывных измерений можно использовать пирометры излучения, например пирометры с кремниевыми фотоэлементами. При этом поверхность чугуна визируется в выпускном желобе на выходе из летки, где меньше всего шлаковых примесей. С помощью почти достигающей поверхности чугуна визирной трубы, продуваемой воздухом, отобранным из воздухопровода холодного дутья вагранки, можно предохранить линзу пирометра от шлаковых брызг и от воздействия слишком высоких температур. При использовании пирометров частичного излучения было установлено, что показываемая ими температура чугуна мало отличается от действительной, если их показания откорректированы на некоторое среднее значение излучательной способности поверхности жидкого чугуна. Таким же образом можно измерять температуру чугуна в ковше и непосредственно в струе при его разливке [9.110].

### 9.9.2.6. АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ И КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАСПЛАВА

Как показали многочисленные измерения на расплавах сталей с помощью субъективных цветовых пирометров сравнения, которые наряду с цветовой температурой позволяют одновременно определять и яркостную температуру  $t_v$  и  $t_s$  в видимой области спектра, уже в процессе разливки можно оценить качество стали. Путем такого анализа излучения при непрерывном контроле можно так управлять плавкой, чтобы получить сталь наиболее высокого качества с точки зрения глубокой вытяжки и прочностных свойств. Точно также можно предварительно оценить качество чугуна и поддерживать наиболее благоприятную температуру разливки [9.120, 9.121].

Качество металла существенно зависит от точного поддержания температуры разливки на заданном уровне, обусловленном химическим составом сплава, который также оказывает влияние на излучательную способность его поверхности. Излучательная способность углеродистых сталей увеличивается при добавке в них хрома и титана вследствие образования оксидов и уменьшается в результате небольших добавок алюминия или кремния. При различном содержании углерода это влияние проявляется по-разному. В результате добавки молибдена излучательная способность сначала уменьшается, а затем, по мере образования оксидов, вновь возрастает. Добавки никеля не приводят к ее изменению для углеродистых сталей. Но в коррозионностойких сталях, наоборот, никель, как и хром, приводит к уменьшению излучательной способности [9.122].

В связи с тем, что по измеренным действительной температуре  $t$  и яркостной температуре  $t_s$ , а также по разности этих температур  $t - t_s$  можно косвенно определить излучательную способность  $\epsilon$ , то представляется возможным создать некоторую карту полей качества. Она подразделяется на несколько областей, позволяющих провести оценку качества стали и чугуна, в том случае, когда измеренная температура  $t$  и разность температур  $t - t_s$  соответствуют определенному полю.

Если на эту карту полей нанести границы отдельных классов, исходя из допустимых значений температуры и излучательной способности  $\epsilon$ , то на основе измерений в видимой области спектра при  $\lambda = 0,65$  мкм можно легко отнести взаимосвязанные значения  $\epsilon$  и  $t$  к указанным Крэйцером [9.122а] для жидкой стали классам качества I—IV [табл. 9.15].

Вследствие существования зависимости  $\epsilon$  от длины волны при измерениях с помощью пирометров излучения других типов получают отличные от приведенных в табл. 9.15 ориентировочные значения.

Для непрерывного определения качества расплава, кроме действительной его температуры  $t$ , необходимо также знать его яркостную температуру  $t_s$ , чтобы определить  $\epsilon$ . Если построить зависимость разности  $t - t_s$  от  $t$  с  $\epsilon(\lambda)$  в качестве

Т а б л и ц а 9.15

Классы качества жидкой стали в зависимости от температуры  $t$  и излучательной способности  $\epsilon$  ( $\lambda$ ) при  $\lambda = 0,65$  мкм

Класс качества	Допустимая температура, °С	Допустимая излучательная способность $\epsilon$ ( $\lambda$ )
I	1560—1590	0,37—0,47
II	1590—1620	0,37—0,47
III	1560—1620	0,47—0,56
IV	1520—1560	0,47—0,56

параметра, то получим почти прямые линии, которые почти пересекаются при  $t - t_s = 0$  и  $t = t_0$ . Отсюда получаем уравнение

$$\frac{t - t_s}{t - t_0} = f_1(\epsilon) \quad \text{или} \quad \frac{t_s - t_0}{t - t_0} = f_2(\epsilon). \quad (9.48)$$

Аналогичные зависимости получают при измерениях температуры  $t_b$  с помощью пирометров частичного излучения. Например, для пирометра с кремниевым фотоэлементом при  $\lambda_b = 0,888$  мкм температура  $t_0 = 395^\circ \text{С}$ . Для графического изображения зависимостей следует провести линеаризацию характеристик сигнал — температура или сигнал — напряжение измерительных приборов с помощью функционального преобразователя [9.40, 9.45].

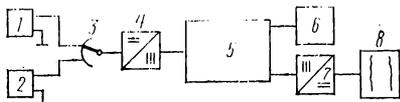


Рис. 9.74. Блок-схема установки для качественной оценки расплава по измеряемым действительной  $t$  и яркостной  $t_s$  температурам по парам значений  $t$  и  $\epsilon$ :

1 — термoeлектрический термометр для измерения температуры расплава; 2 — пирометр для измерения яркостной температуры; 3 — мультиплексор; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — микропроцессор; 6 — цифровой указатель  $t$  и  $\epsilon$ ; 7 — цифро-аналоговый преобразователь; 8 — самописец с непрерывной записью двух величин

Действительную температуру расплава при непрерывных измерениях в течение нескольких часов можно определить с помощью погружных термоэлектрических термометров длительного измерения или откорректированных по  $\epsilon$  пирометров спектрального отношения. При изменении химического состава расплава на основе кратковременных сравнительных измерений с помощью термоэлектрических термометров кратковременного погружения следует откорректировать показания пирометра спектрального отношения путем соответствующего изменения положения корректора  $K$  (см. 9.7.7.4).

Температуру  $t_b$  можно определить, например, при помощи пирометра с кремниевым фотоэлементом. Для уменьшения влияния на показания пирометра шлака, покрывающего значительную часть поверхности металла, используется накопитель пиковых значений, фиксирующий лишь максимальные значения измеряемой температуры.

При помощи цифровых методов (рис. 9.74) можно наглядно представить в цифровой форме и графически температуру и излучательную способность стали и их изменение в процессе разливки. Благодаря этому можно своевременно принять меры для достижения требуемого качества металла. Напряжения выходных сигналов от датчиков 1 и 2 температур  $t$  и  $t_s$  через мультиплексор 3 кодируются аналого-цифровым преобразователем 4 и затем в микропроцессоре 5, включающем в случае необходимости накопитель пиковых значений или блок усреднения, обрабатываются по соответствующей программе, в результате чего на выходе устройства 6 в цифровой форме выдаются значения температуры  $t$  и излучательной способности  $\epsilon$ . Если необходимо определить временное изменение параметров плавки, то выходные сигналы из микропроцессора могут быть поданы через цифро-аналоговый преобразователь 7 на двухперьевой самописец.

Действительная температура измеряется с помощью термоэлектрических термометров кратковременного погружения через определенные промежутки времени. Если она определяется при помощи откорректированного на излучательную способность пирометра спектрального отношения в течение достаточно длительного промежутка времени, то вычислительная машина для управления процессом плавки оснащается корректором  $K$  (см. 9.7.7.4), необходимым для настройки на определенную с помощью термоэлектрического термометра кратковременного погружения действительную температуру  $t$ . Для определения яркостной температуры  $t_s$  в микропроцессоре можно использовать напряжение, которое выдает, например, пирометр с кремниевым фотоэлементом при  $\lambda_e = 0,888$  мкм.

### 9.9.3. ДРУГИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ

Измерение методами пирометрии излучения температуры ванны в электро- и электродуговых печах представляет большие затруднения, поскольку поверхность расплава почти всегда покрыта шлаком. В результате этого измеренная температура ниже действительной. Вследствие этого в большинстве случаев проводят лишь кратковременные измерения с помощью термоэлектрических термометров разового погружения [9.126]. Однако при выпуске металла из печи его температуру можно измерять с помощью пирометров излучения. Так, субъективные цветные пирометры позволяют измерять цветовую и яркостную температуры в видимой области спектра.

Температура расплава в вакуумных индукционных печах в большинстве случаев измеряется с помощью погружных термоэлектрических термометров, армированных жароупорными защитными чехлами. В вакуумных дуговых и электрошно-лучевых печах [9.127] нельзя проводить таких измерений, поскольку процесс плавки нельзя прерывать, отключая электроэнергию. В этом случае измерение температуры можно осуществить с помощью пирометров излучения. В зависимости от состава и температуры ванны, степени разрежения внутри камеры печи происходит различное по величине испарение составных частей ванны. Эти пары осаждаются на стенках печи, а также на смотровом окне, предназначенном для визирования пирометра. В результате этого возникает погрешность при измерении энергетической яркости. Поэтому между смотровым окном и ванной устанавливается заслонка, в результате чего окно остается открытым лишь часть времени плавления. Благодаря этому продолжительность визирования через смотровое окно уменьшается в некоторых случаях в 10 000 раз. Для измерения температуры используют также цветные пирометры и пирометры спектрального отношения в видимой или близкой инфракрасной областях спектра, поскольку тонкие пленки осажденных паров в этих областях почти не оказывают влияния на результаты измерения. Кроме того, ослабление излучения, проходящего через смотровое окно, при измерениях с помощью этих пирометров пренебрежимо мало [9.125].

Аналогичны условия измерения и при изготовлении кремниевых полупроводников. Их получают путем выращивания монокристаллов кремния из газовой фазы при низких давлениях. Температуру выращиванияемого моно- или поликристалла порядка 1200° С измеряют с помощью пирометров спектрального отношения или пирометров частичного излучения.

Температура проволоки на проволочно-прокатных станах измеряется между участком охлаждения и петлёукладчиками, например с помощью пирометров частичного излучения с кремниевыми фотоэлементами в сочетании с накопителями пиковых значений, предназначенных для компенсации ослабления сигнала при укладке петель проволоки. Пирометр целесообразно установить на эксцентрик, чтобы он в результате маятникового движения полностью облучался по крайней мере один раз при каждом колебании [9.123]. Температуры, полученные при измерениях с помощью такого пирометра в сочетании с накопителем пиковых значений, примерно на 20—60 К превышали температуры, полученные при измерениях с помощью пирометров частичного излучения с термоэлектрическими

приемниками излучения. Это можно, вероятно, объяснить лишь влиянием поглощения излучения парами воды [9.83].

В индукционных закалочных печах часто витки индуктора расположены так близко друг к другу, что для измерения температуры остается лишь узкая щель. Кроме того, в случае местного перегрева подвергаемых поверхностной закалке деталей небольшого размера температура может быстро понижаться вследствие теплопроводности материала, из которого изготовлена деталь. При небольших промежутках между витками индуктора для измерения температуры необходимо использовать оптику пирометра с характеристиками согласно рис. 9.30. В этом случае расстояние пирометра от индуктора следует выбрать таким образом, чтобы при этом диаметр пучка лучей в зазоре между витками индуктора был минимальным [9.124]. Проще в этих условиях использовать световоды. Один конец световода соединяется с пирометром, а другой вводится через зазор между витками индуктора почти до соприкосновения с поверхностью измеряемого объекта.

На высокочастотной установке для сварки труб температура сварного шва измеряется в зоне обсадки, благодаря чему можно судить о качестве сварного шва и своевременно принять необходимые меры. К свободному концу гибкого кабельного световода присоединяется короткий кварцевый цилиндр, который устанавливается между направляющими роликами на расстоянии 5—10 мм от точки обсадки. Вредное влияние паров воды исключено путем подачи сжатого воздуха. К другому концу гибкого кабельного световода подсоединен пирометр спектрального отношения на кремниевых фотоэлементах [9.83].

Световоды применяют также для измерения температуры в камерах сгорания газовых турбин и во вращающихся цементных печах. Для защиты от воздействия слишком высоких температур световоды можно установить в гибкий водоохлаждаемый защитный экран [9.125].

Для измерения температуры закалочной соляной ванны наряду с термоэлектрическими термометрами, защитная арматура которых характеризуется лишь ограниченным сроком службы, часто применяют пирометры частичного излучения с термоэлектрическими приемниками излучения или кремниевыми фотоэлементами. Излучательная способность таких ванн равна единице. Поднимающиеся с поверхности ванны пары следует удалять с помощью вытяжной вентиляции.

## **9.9.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В керамической промышленности процесс обжига, помимо температуры, зависит от продолжительности. Поэтому для контроля за процессом обжига в печах применяются конусы Зегера, а также образцы для испытания на растяжение. Кроме того, на различных стадиях процесса обжига как в периодических многоподовых, так и в непрерывных тоннельных, кольцевых или камерных печах температура стенок, а также обжигаемого материала измеряется с помощью термоэлектрических термометров или пирометров излучения. Благодаря этому достигается надежный контроль за процессом обжига. Для измерения пирометрами излучения температуры внутренних поверхностей стенок печи часто используют калильные трубы с закрытым концом, заложенные в кладку печи.

В непрерывных обжиговых печах с перемещающейся зоной обжига, т. е. в кольцевых или камерных печах, применяются стационарные термоэлектрические термометры. Температуру перемещающейся зоны обжига иногда измеряют с помощью термоэлектрических термометров или пирометров излучения, перемещающихся вместе с зоной обжига, что позволяет судить о температуре непосредственно перед или за зоной максимального нагрева. Температура обжигаемого материала измеряется через небольшие смотровые отверстия, расположенные в нескольких точках кладки печи, с помощью яркостных пирометров. В этом случае температура измеряется при отсутствии в печи газообразных продуктов сгорания [9.12, 9.18].

## 9.9.5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В цементной промышленности контроль за температурой процесса обжига во вращающейся цементной печи с помощью пирометров излучения необходим прежде всего в области зоны спекания. При этом колебания температуры спекания должны быть минимальными, поскольку жароупорная футеровка вращающейся цементной печи в зоне спекания не должна перегреваться. Измерение температуры при помощи пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения слишком неточно, так как клинкерная пыль в поле зрения пирометра имеет более низкую температуру, чем спекаемый материал. Эта пыль, поглощающая значительную часть излучения, образуется в результате истирания клинкера и поступает с потоком вторичного воздуха. Вследствие этого в зависимости от концентрации клинкерной пыли измеренная температура может быть примерно на 250 К ниже действительной.

Если измерять температуру пирометром спектрального отношения, то на результаты измерения температуры спекаемого материала клинкерная пыль почти не оказывает влияния. Лишь частички пыли, размеры которых меньше длины волны излучения, т. е. примерно меньше 1 мкм, могут привести к погрешности измерения, поскольку только они поглощают излучение. Но частички пыли во вращающихся цементных печах большей частью имеют диаметр свыше 75 мкм и лишь незначительная их часть (<1%) 50 мкм или менее. Отсюда следует, что клинкерная пыль не может оказать сколько-нибудь заметного влияния на результаты измерения температуры с помощью пирометра частичного излучения. Сравнительные измерения в зоне спекания показали, что температуры, полученные с помощью пирометра с термоэлектрическим приемником излучения, в соответствии с вышесказанным, были на 200 К ниже температур, полученных при измерении с помощью пирометра спектрального отношения. Пирометр спектрального отношения позволил поддерживать при непрерывном производстве температуру в зоне спекания постоянной в пределах 1410—1460° С, благодаря чему удалось улучшить качество клинкера, стойкость футеровки печи, а также уменьшить расход топлива [9.17].

Во вращающихся трубчатых печах спекаемый материал проходит зону спекания, где температура достигает максимального значения. Теплообмен с окружающим пространством вращающейся печи осуществляется через жароупорную футеровку. Согласно этому, изменение температуры кожуха печи должно соответствовать изменению температуры внутри печи. Путем измерения наружной температуры кожуха можно установить причину неисправности: будь то повреждение футеровки или образование на внутренней поверхности печи отложений в виде колец из составляющих спекаемого материала. Такие неисправности можно установить, визируя пирометром излучения с вогнутым зеркалом различные участки вращающейся печи (см. рис. 9.60) или используя для измерения температуры поврежденных участков пирометр частичного излучения, установленный стационарно.

Для контроля всей поверхности поврежденного участка вращающейся печи следует использовать измерительную установку, постоянно контролирующую температуру поверхности печи. Для этого вдоль печи на направляющих устанавливаются две каретки, приводимые в движение бесконечным тросом. На каждой каретке устанавливаются пирометр излучения. С помощью сигнализатора максимальных значений можно подавать сигналы о пиках температуры. Каретки должны двигаться настолько медленно, чтобы пирометр за один оборот печи перемещался не более чем на половину ширины его измерительного поля. Поэтому для этой цели используют пирометры излучения, имеющие наибольший диаметр измерительного поля, т. е. пирометры с минимальным показателем визирования  $d = a/D$ , например пирометр типа «Ардонокс», имеющий диапазон измерения 40—400° С [9.129].

## 9.9.6. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

При производстве и переработке стекла необходим точный контроль за температурой, поскольку даже незначительное изменение температуры может оказать существенное влияние на вязкость стекла, экспоненциально зависящую от температуры. Поэтому при непрерывном производстве измерять температуру следует с помощью термометров, характеризующихся высоким постоянством свойств во времени. Однако требования к пирометрическим приборам при различных способах производства настолько различны, что следует учитывать характеристики применяемого пирометра и следить за правильностью его монтажа на предусмотренном участке измерения [9.130—9.132].

### 9.9.6.1. ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛА

Для измерения температуры в стекольной промышленности могут быть использованы рефракторные пирометры с термоэлектрическими приемниками излучения или кремниевыми фотоэлементами, если толщина стекла, температура которого измеряется, такова, что оно непрозрачно для излучения. Напротив,

в случае тонкого стекла, т. е. еще прозрачного для излучения, при измерениях с помощью этих пирометров получают слишком заниженные значения измеренных температур.

Различные сорта стекла в зависимости от качества и толщины (рис. 9.75) в области длин волн 3,8—8 мкм практически не пропускают излучения. Отраженное от стекла излучение в этой области длин волн оказывает незначительное влияние на результаты измерения. Однако это влияние значительно усиливается в области длин волн 8—12 мкм и максимально при длине волны излучения 9,5 мкм. Отражение в этой области длин волн обусловлено резонансными эффектами группы  $\text{SiO}_2$  в стекле. Поэтому в области длин волн 4—8 мкм стекло ведет себя почти как черное тело с излучательной способностью  $\epsilon = 0,96$ . В связи с этим спектральную чувствительность пирометра излучения ограничивают этой областью длин волн, так что с помощью этих пирометров можно определять действительную температуру поверхности стекла.

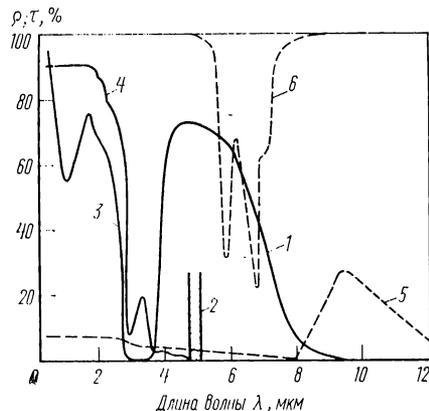


Рис. 9.75. Коэффициенты пропускания  $\tau$  и отражения  $\rho$ , а также коэффициент пропускания, %, водяного пара и фильтра пирометра излучения, предназначенного для измерения температуры стекла:

1 — комбинация фильтров InAs—LiF для  $\lambda = 3,8-8$  мкм ( $\tau$ ); 2 — фильтр для  $\lambda = 4,8-5,2$  мкм ( $\tau$ ); 3 — оконное стекло толщиной 10 мм ( $\tau$ ); 4 — оптическое стекло толщиной 2 мм ( $\tau$ ); 5 — отражение от стекла ( $\rho$ ); 6 — полосы поглощения водяного пара ( $\tau$ )

Для измерения температуры поверхности стекла можно использовать рефракторный пирометр с термоэлектрическим приемником излучения и с линзой из флюорида лития или пирометр с вогнутым зеркалом и входным окошком из флюорида лития. Непосредственно перед приемником излучения устанавливают фильтр из антимоноида индия. В этом случае, согласно рис. 9.75, пирометр реагирует лишь на энергетическую яркость в диапазоне длин волн 3,8—8 мкм [9.40, 9.130а]. Ограничить длину волны излучения можно также с помощью специальных фильтров, в которых эффект фильтрации достигается благодаря многократ-

ному отражению и интерференции излучения [9.132, 9.133]. В производственных условиях, где между стеклом и пирометром могут находиться пары воды высокой концентрации, результаты измерения в диапазоне длин волн 5,7—7,4 мкм могут быть искажены полосами поглощения паров воды (см. рис. 9.75). В таких случаях применяют пирометры излучения с интерференционными фильтрами, пропускающими излучения лишь в узкой спектральной области 4,8—5,2 мкм.

Для оценки свойств различных пирометров важно знать глубину стекла, с которой еще выходит наружу излучение, воспринимаемое пирометром в качестве измеряемой величины. Кроме того, желательно знать, на какой глубине стекло имеет температуру, полученную в результате измерения. При использовании пирометров со стеклянными линзами и термоэлектрическими приемниками излучения 91% излучения исходит из стекла с глубин от 0 до 50 мм. Измеренная температура соответствует излучению с глубины порядка 15 мм. Для пирометров с кремниевыми фотоэлементами эффективными являются 97% излучения, исходящего с глубин от 0 до 50 мм. Полученная в результате измерения температура соответствует глубине 7—10 мм. Пирометры для измерения температуры поверхности стекла реагируют на 96% излучения с глубины 0—1 мм; полученная температура соответствует глубине 0,2—0,4 мм. Поэтому в случае более толстого стекла используют обычные пирометры излучения; напротив, когда необходимо определить температуру поверхности стекла или температуру тонких стекол толщиной 1—5 мм, используют пирометры для измерения температуры поверхности стекла.

Для измерения температуры тонкого стекла, достигающей в низкотемпературной области 300° С, можно также использовать обычные пирометры излучения, например «Ардонокс» с полиэтиленовой пленкой. В этом случае доля пропускаемого при такой низкой температуре излучения с длиной волны  $\lambda = 3$  мкм настолько мала, что стекло можно рассматривать как черное тело с излучательной способностью  $\epsilon = 0,97$  при температуре 300° С,  $\epsilon = 0,99$  при 200° С и  $\epsilon = 0,999$  при 100° С. Вследствие отражения излучения на поверхности стекла при длинах волн 8—11 мкм расчеты проводят по среднему значению излучательной способности, равному примерно 0,95.

Для кратковременных измерений используют переносные пирометры излучения, смонтированные на телескопической штанге, которая выдвигается на 2,7 м. Для проведения более длительных измерений в таких пирометрах предусматривается водяное охлаждение и арматура для продувки воздуха [9.132]. С помощью этих пирометров можно контролировать распределение температуры в камере вытягивания или в отжигательной печи, а также в листовом стекле на установках, обогреваемых природным газом или мазутом в течение 30 мин.

Вследствие высоких требований к качеству продукции к устройствам для измерения температуры в зависимости от способа изготовления предъявляются столь же высокие требования [9.130—9.132].

### 9.9.6.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТЕКЛОПЛАВИЛЬНЫХ ВАННАХ

В стеклоплавильных ваннах температура свода на участках плавления и рафинирования измеряется одновременно с помощью визуальных яркостных пирометров, непрерывно при помощи термоэлектрических термометров, армированных защитными чехлами из глинозема, или пирометров со стеклянными линзами и термоэлектрическими приемниками излучения. Пирометры излучения должны без дополнительного охлаждения водой выдерживать температуру окружающей среды до 180° С. Промежуточным фланцем со штуцерами для подачи воздуха пирометр крепится к визирной трубе, которая при помощи фасонного кирпича устанавливается в своде печи над ванной. При измерении температуры визируется днище калильной трубы.

В необогреваемой рабочей части температуру расплава стекла можно измерять без калильной трубы на выходе из ванны с помощью пирометров излучения. На этом участке благодаря уравниванию излучения между ванной и

сводом излучение от более нагретых частей ванны или факела не оказывает влияния на результаты измерения, однако пирометры следует хорошо обдувать воздухом.

### 9.9.6.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАСЫПНОЙ ШАХТЕ

В засыпной шахте (а также в канале или питателе) температура должна постепенно понижаться примерно до  $1100^{\circ}\text{C}$  при переходе к капельным питателю и перепускному устройству. Для этого температуру расплава стекла в двух или более зонах регулируют путем изменения подачи топлива (мазута или газа) и в случае необходимости — путем дополнительного поддува воздуха. Для измерения температуры каждой зоны необходим термоэлектрический термометр или пирометр с кремниевым фотоэлементом и шаровым фланцем для точного визирования плавильного канала. К фланцу присоединяется визирная труба из глинозема, входное отверстие которой должно быть расположено в 50 мм от поверхности расплава, благодаря чему раскаленные газообразные продукты сгорания не оказывают влияния на результаты измерения. Незадолго до выпуска температура должна поддерживаться постоянной и ее отклонения не должны превышать  $\pm 1\text{ K}$  для получения стабильного качества стекла.

### 9.9.6.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАПЕЛЬ СТЕКЛА

Температуру поступающих из питателя капель стекла можно измерять с помощью быстродействующих пирометров с кремниевым фотоэлементом, показатель визирования которых должен быть равен 100. При подаче капель стекла через каждую секунду их температуру можно замерять в течение всего лишь 0,3 с. При этом аналогично измерению температуры с помощью пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения получают совокупную температуру сердцевины и поверхности капли стекла.

Капля наблюдается через визирную трубу, расположенную недалеко от ножницы для резки стекла. Она продувается воздухом, чтобы удалить пары воды и мазута из поля измерения пирометра. Поскольку на температуру капли оказывает влияние охлаждение, обусловленное резкой стекла ножницами, то кратковременное измерение температуры после каждого реза производится через определенное время выдержки. Полученное значение температуры вводится в запоминающее устройство, где сохраняется до следующего измерения.

### 9.9.6.5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИСТОВОГО ТЯНУТОГО, КАТАНОГО И ЛИТОГО СТЕКЛА

При вытяжке оконное стекло непрерывной полосой проходит через водоохлаждаемую вытяжную камеру. Процесс охлаждения регулируется таким образом, чтобы температура начала полосы стекла на выходе из лужовицы до площадки обламывания изменялась определенным образом (рис. 9.76). Кроме того, температура полосы в плоскости поперечного сечения должна быть во всех точках одинаковой. Это достигается регулировкой клапанов охлаждения. Для контроля температуры по три пирометра с термоэлектрическими приемниками излучения, например типа «Гласардонокс», устанавливаются по ширине полосы с обеих ее сторон на двух различных уровнях по высоте, так чтобы можно было точно определить разность температур между отдельными охлаждаемыми участками. Для записи температуры показания шести пирометров так сдвинуты в одной плоскости, что температура одного участка записывается отдельно от температуры другого на строго определенной полосе диаграммы. Фланцы для установки пирометров должны быть хорошо герметизированы, чтобы в камеру вытяжки листового стекла не подсасывался воздух. Пирометры охлаждаются водой, протекающей через рубашку холодильника (см. рис. 9.66).

При процессе «Флоат» стекло из плавильной печи по каналу подается в цинковую ванну с защитной атмосферой. Температура стекла на входе в цинковую

ванну равна  $1100^{\circ}\text{C}$ ; температура полосы стекла на выходе из нее  $600^{\circ}\text{C}$ . После этого полоса поступает в роликовую отжигательную печь, а затем на машину поперечной резки. Температура поверхности стекла в цинковой ванне, как и в роликовой отжигательной печи, контролируется с помощью пирометров с термо-

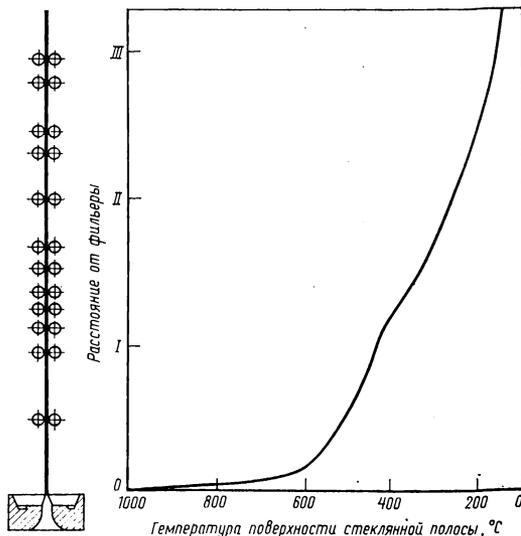


Рис. 9.76. Кривая охлаждения стекла в вытяжной камере и в шахте вытяжной машины

электрическими приемниками излучения. При этом необходимо следить за тем чтобы объект измерения не отражал излучений сторонних источников. С помощью пирометров излучения, предназначенных для измерения температуры стекла, визирные трубы которых охлаждаются водой (см. рис. 9.66), можно установить эксцентриситет рабочих валков вальцовочной машины, в которую стекло поступает в пластическом состоянии (рис. 9.77). Вследствие эксцентриситета (овальности) валков толщина и вместе с тем теплоемкость стекла периодически изменяются, в результате чего за валками наблюдаются периодические колебания его температуры. На стекле толщиной 5 мм изменение температуры в 6 К соответствует изменению его толщины на 0,1 мм.

Для дальнейшей переработки в гибочной и закалочной печах полосовое стекло разрезают на небольшие листы и затем нагревают в периодических печах. Температуру нагрева можно измерять с помощью обычных пирометров с термоэлектрическими приемниками излучения, предназначенных для измерения низких температур. При монтаже пирометров необходимо следить за тем, чтобы было устранено влияние излучения нагревательных элементов. Этого можно достичь, например, путем установки визирной трубы пирометра между этими элементами так, чтобы ее входное отверстие было расположено вблизи поверхности стекла, температура которого измеряется. После нагрева до заданной температуры листы стекла через определенные промежутки времени выходят из печи и с относительно высокой скоростью проходят мимо устройств для изме-

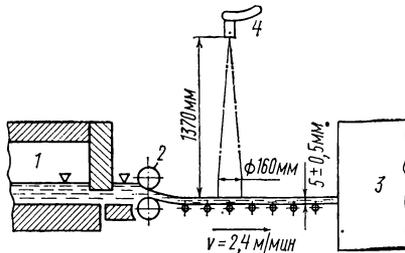


Рис. 9.77. Измерение эксцентриситета валков с помощью пирометра излучения для измерения толщины стекла:

1 — стеклянная ванна; 2 — валки; 3 — отжигательная печь; 4 — пирометр излучения для измерения температуры стекла

рения температуры. Поэтому процесс охлаждения следует контролировать с помощью пирометров инфракрасного излучения, характеризующихся очень небольшой инерцией и оснащенных устройствами для корректировки показаний на излучательную способность объекта измерения.

#### **9.9.6.6. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНФРАКРАСНЫХ СУШИЛЬНЫХ ПЕЧАХ**

После нанесения зеркального покрытия на стекло его подвергают сушке в инфракрасных сушильных печах. В связи с тем, что температура нагрева не должна превышать  $80^{\circ}\text{C}$ , для ее измерения используют пирометры инфракрасного излучения, чувствительные к излучению в спектральной области длин волн выше 8 мкм. В этом случае инфракрасные «светлые» и «темные» излучатели не оказывают влияния на результаты измерения.

Для измерения более высоких температур (выше  $800^{\circ}\text{C}$ ) в производственных условиях главным образом используют пирометры с термоэлектрическими приемниками излучения или кремниевыми фотоэлементами. Они применяются для подобных измерений потому, что выдаваемые ими сигналы настолько велики, что к этим пирометрам без предварительного усиления можно непосредственно подключать измерительные приборы для наблюдения, записи или регулирования температуры. Эти пирометры отличаются высокой стабильностью показаний и могут без дополнительного охлаждения работать при температурах окружающей среды до  $180^{\circ}\text{C}$ . Однако в указанном диапазоне температур можно также использовать пирометры с другими приемниками излучения, как это следует из табл. 9.10, в которой приведены диапазоны измерения и характеристики пирометров излучения различных типов.

#### **9.9.7. ИЗМЕРЕНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР (НИЖЕ $600^{\circ}\text{C}$ )**

##### **9.9.7.1. ОБЩИЙ ОБЗОР**

Измерение температур в диапазоне  $(-100) \div 600^{\circ}\text{C}$  в промышленности и научных исследованиях стало возможным лишь благодаря разработке высокочувствительных стабильных приемников теплового излучения, таких как термоэлектрические, болометрические или пирозлектрические, а также квантовые приемники излучения, например фотоумножители, и, конечно, приемники инфракрасного излучения (см. 9.7.3.2). Кроме того, наличие широкого набора различных световодов и интерференционных фильтров, позволяющих использовать для измерений эффективный спектральный участок как в видимой так и, прежде всего, в инфракрасной областях спектра, значительно расширило возможности применения пирометров.

Пирометры излучения для измерения низких температур применяют при изготовлении и переработке пластмасс (сушка, литье, получение пленки, тонких нитей); в химической промышленности (сушка лаков и красок); в полиграфической промышленности (обработка поверхности бумаги); в текстильной промышленности (сушка, горячее фиксирование краски); в резиновой промышленности (непрерывный контроль производства шин на равномерность нагрева); в пищевой промышленности (сублимационная сушка продуктов питания); в керамической промышленности (сушка изделий); при переработке древесины (сушка, склеивание); в стекольной промышленности (производство листового стекла); для измерения перегрева стенок вращающихся трубчатых печей, паропроводов, подшипников, корпусов двигателей, электрических нагревателей, соединительных устройств высоковольтных линий (с целью установления повреждений); для измерения температуры в трансформаторах, электрических машинах, электронных схемах; для определения температуры металлической полосы; для измерения температуры земли, воды, облаков, воздуха на больших высотах; в медицине

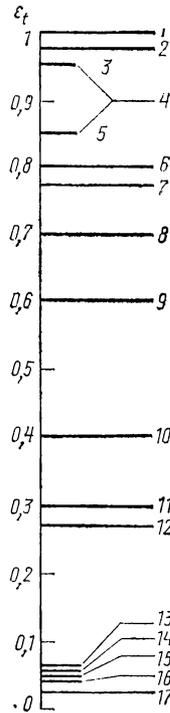


Рис. 9.78. Суммарная излучательная способность  $\epsilon_t$  различных материалов при 300 К [9.116 а]:

1 — абсолютно черное тело; 2 — черный матовый лак; 3 — дерево, кирпич, шамот, резина; 4 — фарфор, керамика, бумага, гипс; 5 — масляные краски; 6 — черная оксидированная медь; 7 — покрытая тонкой окалиной сталь; 8 — покрытая ржавчиной сталь; 9 — оксидированная медь; 10 — пескоструйный алюминий; 11 — оксидированная алюминиевая бронза, никель; 12 — серый окисленный свинец, темно-серое железо; 13 — полированные олово и никель; 14 — полированное железо; 15 — полированный алюминий; 16 — полированное серебро; 17 — полированное золото

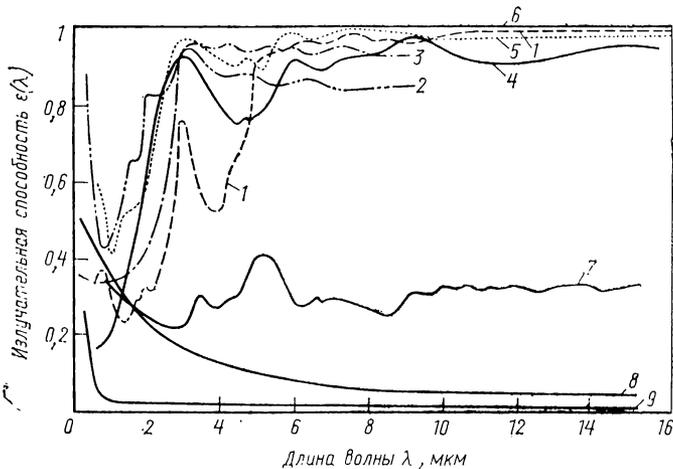


Рис. 9.79. Спектральная излучательная способность различных объектов [9.74]:

1 — шамот; 2 — зеленая листва; 3 — белая краска; 4 — белая бумага; 5 — дерево; 6 — черная краска; 7 — алюминиевая бронза; 8 — железо, вольфрам; 9 — серебро

(измерение температуры тела, терапевтический контроль, биология); для микроисследований. Применение пирометров излучения для измерения наружной температуры вращающихся трубчатых печей, а также измерения температуры в стекольной и керамической промышленности уже рассматривалось выше.

Из перечисленных выше областей применения пирометров следует, что излучательные характеристики объектов, температура которых измеряется, очень различны. У чистых полированных свободных от окисной пленки металлов суммарная излучательная способность  $\epsilon_t$  при температуре  $300^\circ\text{C}$  колеблется от 0,03 до 0,14 (рис. 9.78). По мере окисления поверхности  $\epsilon_t$  возрастает примерно до 0,8. У неметаллов, например керамических материалов,  $\epsilon_t$  составляет 0,8—0,9.

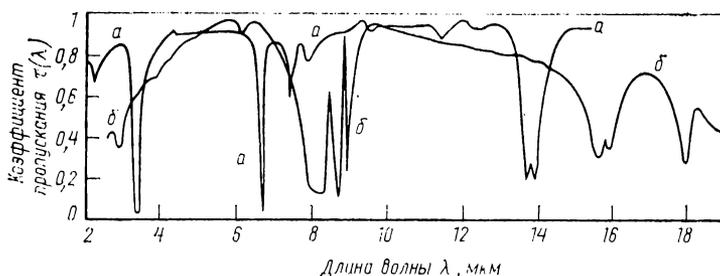


Рис. 9.80. Зависимость коэффициента пропускания  $\tau(\lambda)$  высокополимерных материалов от длины волны  $\lambda$  [9.134]:  
а — полиэтилен (Луполен); б — перфторэтилен (Тефлон)

Далее, необходимо помнить, что в случае чистых металлических поверхностей в диапазоне длин волн  $0,3$ — $2$  мкм спектральная излучательная способность  $\epsilon(\lambda)$ , равная  $0,3$ — $0,5$ , резко уменьшается и что только при длинах волн более  $4$  мкм  $\epsilon(\lambda)$  может принимать примерно постоянное значение, меньшее  $0,05$  (рис. 9.79). У сильноокисленных металлов и у неметаллов, например шамота, непрозрачных пластмасс, красок и т. д., напротив, спектральная излучательная способность при увеличении длины волны возрастает и начиная с длины волны  $5$  мкм становится равной  $0,95$ — $1,0$ .

Такие материалы, как, например, стекло, кварц, тонкие синтетические пленки, лаки и т. п., в видимой области спектра и в ближней инфракрасной области довольно прозрачны, однако в дальней инфракрасной области их прозрачность очень различна и значительно изменяется в зависимости от длины волны. При этом наблюдается одна или несколько характерных полос поглощения, которые можно объяснить присутствием таких соединений, как  $\text{C—H}$ ;  $\text{C} \equiv \text{N—}$ ;  $\text{C}=\text{C}$ ;  $\text{CH}_2$  (рис. 9.80) [9.134—9.137].

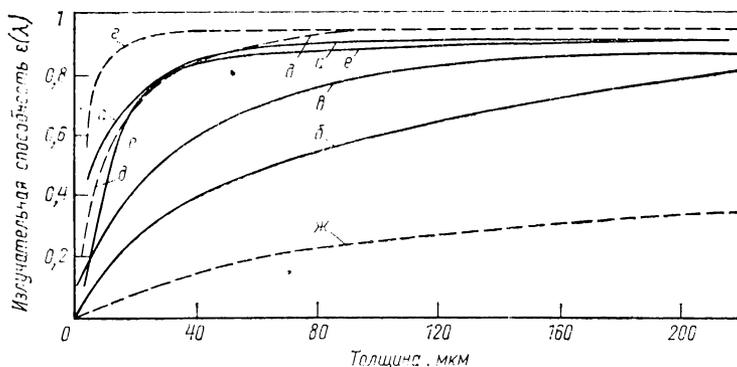
### 9.9.7.2. ВЫСОКОПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В табл. 9.16 для некоторых высокополимерных материалов приведены характерные полосы поглощения, наблюдаемые при длинах волн порядка  $3,4$  и  $6,8$  мкм. В области этих полос поглощения инфракрасное излучение почти не проходит. Поэтому температуру таких материалов можно измерять с помощью пирометров излучения, чувствительных только к этим длинам волн. Поскольку излучательные способности таких материалов при этом практически равны единице, достигается высокая точность измерения. Согласно рис. 9.81, спектральная излучательная способность  $\epsilon(\lambda)$  возрастает в той или иной степени в зависимости от типа синтетического материала и коэффициента пропускания с увеличением его толщины. Так, для синтетических пленок в областях характерных полос поглощения и в определенных условиях уже при толщинах всего лишь  $5$  мкм излучательная способность может составлять  $0,8$  и более.

Т а б л и ц а 9.16

## Характерные полосы поглощения некоторых полимерных материалов

Материал	Полоса поглощения вблизи $\lambda$ , мкм				
Полиуглеводороды:					
полиэтилен (Луполен 1810)	3,4	6,8			
полипропилен	3,4	6,8	7,2		
полиизобутилен (Оппанол)	3,4	6,8	7,2		
полистирол	3,4	6,8	14,2		
полибутадиен (Америноп)	3,5	6,5	10,0	13,5	
Полигалогенуглеводороды:					
поливинилхлорид (Хосталит С 270)	3,4	7,0	8,0		
перфторэтилен (Тефлон)	8,2	8,7			
Полиэфир:					
полифталаат (Хостафан)	3,4	5,8	7,8		
полигликолевые эфиры терефталевой кислоты	5,8	8,0	9,0	13,7	
Полимеры с эфирными группами:					
эпоксидные смолы (Аральдит)	9,4	6,8	8,0	9,6	12,0
Полиамиды:					
нейлон	3,0	3,4	6,2	6,6	
Феноловые смолы:					
бакелит 475	3,0	6,8	8,2		
Полисилоксаны:					
силиконовая смола Р 750	7,9	8,7—9,9	12,4	14,3	
Полиуретаны:					
лак Десмодур	4,4	5,8	6,5	8,2	

Рис. 9.81. Излучательная способность  $\varepsilon(\lambda)$  при  $\lambda = 3,43$  мкм (сплошные линии) и  $8,05$  мкм (штриховые линии) в зависимости от толщины некоторых высокополимерных материалов [9.158]:

$a$  — полиамид (Найлон);  $b$  — полиэфир (Хостафан);  $в, з$  — полиэтилен (Луполен);  $д$  — поливинилхлорид (Хосталит);  $е, ж$  — перфторэтилен (Тефлон)

В соответствии с этим, вводя поправку на среднее значение излучательной способности материала, можно всегда получать достоверные результаты измерения температуры, если пленки имеют такую толщину, при которой излучательная способность больше или равна 0,8.

Для измерения температуры неселективно излучающих тел используют пирометры излучения, спектральная чувствительность которых охватывает достаточно широко область длин волн (0,5—10 или даже до 40 мкм). С помощью различных сменных объективов в этих пирометрах можно изменять показатель визирования. В особых случаях, например при измерении температуры прозрачных материалов, пирометры оснащают фильтрами для выделения той или иной спектральной области.

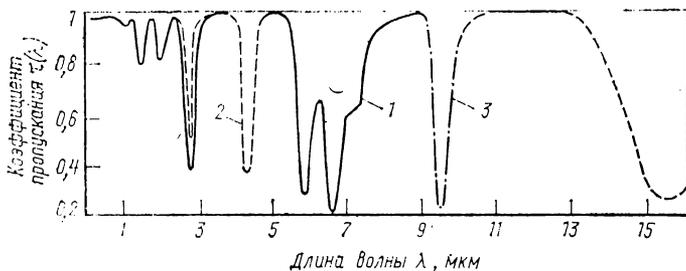


Рис. 9.82. Коэффициент пропускания  $\tau(\lambda)$  по [9.137, а] водяного пара (1); двуокиси углерода (2); озона (3)

Кроме того, при выборе пирометра необходимо следить за тем, чтобы на результат измерения не оказывали влияния пары воды и двуокиси углерода, находящиеся в поле визирования пирометра. Окна относительной прозрачности (рис. 9.82) расположены в участках спектра со слабо выраженными полосами поглощения паров воды в диапазоне длин волн 2,6—2,9, а также 5,6—7,5 мкм. Для углекислоты эти полосы расположены в диапазонах длин волн 2,7—2,8, 4,2—4,6, а также 13,5—16 мкм. Полоса слабого поглощения для озона расположена около длины волны 9,5 мкм.

### 9.9.7.3. КОНТРОЛЬ ЗА ПРОЦЕССАМИ СУШКИ И ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ

Энергетическая яркость солнца, а также инфракрасных нагревателей из-за их высоких температур в области длин волн более 8 мкм уже настолько мала, что возникающее в результате диффузного отражения поверхностью измеряемого объекта паразитное излучение пренебрежимо мало по сравнению с измеряемой энергетической яркостью. Поскольку, кроме того, полосы поглощения паров воды и углекислоты расположены вне диапазона длин волн 8—14 мкм, с помощью чувствительных в этом диапазоне пирометров можно контролировать многочисленные процессы сушки, формования и термофиксации, для которых используют инфракрасные «темные» и «светлые» излучатели<sup>1</sup>. При очень высоком содержании паров воды рекомендуется ограничивать полосу спектральной чувствительности пирометра диапазоном длин волн 9,5—11,5 мкм.

С помощью пирометров, чувствительных в этих областях спектра, можно также выполнять измерения открытых пространств без помех, обусловленных диффузно отражающимся солнечным светом, например от воды, от поверхности земли, а также от облаков. Так, с вертолета можно измерять температуру воды рек, чтобы зафиксировать недопустимый сток в них горячей воды. Кроме того,

<sup>1</sup> Темные излучатели — температурные излучатели, в которых доля видимого излучения в испускаемом спектре не превышает одного процента. Максимальная температура тела накала темного излучателя не превышает 1000° С. Светлые излучатели — температурные излучатели с температурой тела накала свыше 1000° С, в которых количественная доля видимого излучения в испускаемом спектре может доходить до нескольких десятых долей. (Прим. ред.)

пирометры можно использовать для отыскания утечек горячей воды в подземных теплотрассах, измеряя температуру земли вдоль трубопроводов. Для биологических исследований большое значение имеет измерение температуры растений, их цветов и листьев. С большой высоты можно также следить за лесными пожарами и их распространением.

Для измерения температуры воздуха на больших высотах можно использовать пирометры со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн 14—16 мкм. Этой области соответствует полоса поглощения углекислого газа, настолько ослабляющего излучение, что воздушный слой уже относительно небольшой толщины становится непрозрачным для излучения. В этом случае измеряемая температура соответствует температуре слоя воздуха, находящегося на некотором расстоянии от наблюдателя, которое определяется глубиной проникновения излучения в воздух, содержащий углекислый газ.

С помощью специального пирометра излучения (фирмы «Barnes»), так называемого «радиометра вертикального температурного профиля» (VTPR), с метеорологического искусственного спутника, удаленного на 30 км от Земли, можно определить температурный профиль атмосферы внутри некоторого телесного угла. Излучение узким пучком ( $2 \times 2^\circ$ ) попадает на вогнутое зеркало пирометра с помощью вращающегося зеркала. Зеркало вращается и одновременно перемещается ступенчато таким образом, что за одно перемещение совершает 24 оборота. Через второе зеркало и вращающийся фильтр излучение попадает на приемник излучения пирометра. Вращающийся фильтр состоит из восьми секторов с очень узкими спектральными полосами пропускания. Они расположены после, довертелно на крутых фронтах (или вблизи них) полос поглощения двуокиси углерода при длине волны 15 мкм (см. рис. 9.82). По сигналам, выдаваемым пирометром в этих диапазонах длин волн при каждом сканировании, можно очень быстро построить температурный профиль атмосферы со значительной высоты до поверхности Земли.

Измерение температуры с помощью пирометров излучения в астрофизике рассмотрено в работе [9.139].

#### 9.9.7.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИИ АЛЮМИНИЯ

При экструзии алюминия и его сплавов температура поверхности формируемого профиля зависит от скорости прессования. Слишком высокая температура может явиться причиной возникновения дефектов. Вследствие этого при точном контроле максимально допустимой температуры изделия в процессе экструзии скорость прессования можно увеличить. Для измерения температуры используют пирометры частичного излучения с диапазоном измерения 300—550° С или пирометры спектрального отношения. Используя в этих пирометрах приемники излучения из сульфида свинца, удалось наполовину ослабить влияние изменения излучательной способности объекта путем установки водяного фильтра толщиной 1 см перед приемником излучения. После этого стало возможным измерять температуру с точностью  $\pm 10$  К [9.140]. С помощью кремниевых фотоземленов в непрерывном режиме измерения удалось добиться точности измерения  $\pm 5$  К [9.141]. При этих измерениях корректировка показаний пирометра производилась по среднему значению излучательной способности для соответствующего сплава или использовалась температурная шкала измерительного прибора пирометра, выполненная с учетом этого среднего значения излучательной способности.

С помощью пирометра спектрального отношения с германиевыми фотодиодами проводили измерение температуры алюминиевых и магниевых слитков на выходе из индукционной печи. При измерении полированных ( $\epsilon = 0,2$ ), оксидированных или крашенных ( $\epsilon = 0,8—0,9$ ) поверхностей не было необходимости в какой-либо дополнительной корректировке показаний пирометра [9.142].

### 9.9.7.5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОНКИХ НИТЕЙ И ПРОВОЛОК

Для качественного изготовления текстильных нитей, нитей из искусственного волокна или лакированной проволоки необходимо измерять температуры до  $150^{\circ}\text{C}$  с помощью пирометров инфракрасного излучения. Если нити тоньше, чем требуемый для правильного измерения температуры минимальный поперечный размер измерительного поля пирометра, то вследствие влияния фонового излучения температура измеряется неправильно. Кроме того, в случае очень тонких нитей невозможна точная фиксация их положения в поле визирования пирометра и величина отклонения может составлять несколько диаметров нити. В этих условиях измерение температуры независимо от толщины нити и ее отклонений можно выполнять лишь тогда, когда температуры фона и нити равны. Для этого температуру фона необходимо регулировать таким образом, чтобы показания

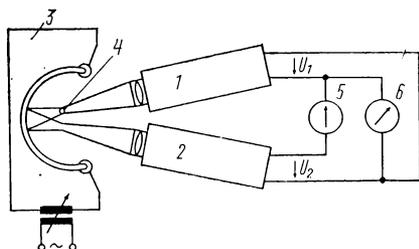


Рис. 9.83. Измерение температуры подвижных нитей [9.143]:

1, 2 — пирометры; 3 — обогреваемый фон; 4 — нить; 5 — нуль-индикатор; 6 — измерительный прибор

пирометра при отклонении нити не изменялись, а излучательные способности фона и нити должны быть равны.

На рис. 9.83 фоном является поверхность зачерненной изогнутой в форме полуцилиндра тонкой пластины небольшой массы, по которой протекает ток и температура которой при изменении тока очень быстро изменяется. Один из пирометров направлен на нить, другой на фон так, что оба измерительных поля перекрываются. Температура фона регулируется таким образом, чтобы показания обоих пирометров были одинаковы. Тогда оба пирометра будут показывать температуру нити.

Для измерения температуры нитей искусственного волокна или проволоки, покрытой синтетическим веществом, в первую очередь можно использовать пирометры излучения, спектральная чувствительность которых соответствует длинам волн, при которых искусственный материал имеет ярко выраженные полосы поглощения, т. е. является непрозрачным для излучения с длиной волны, например, 8 мкм. Разрешающая способность такого способа измерения температуры зависит, во-первых, от разрешающей способности пирометра при измерении температуры абсолютно черной поверхности ( $\epsilon = 1$ ), во-вторых, от степени ослабления излучения нитью и от излучательной способности нити. Ослабление излучения определяют экспериментально путем закрепления нити перед нагретым фоном, температура которого известна. При разрешающей способности пирометра  $\pm 0,5\text{ K}$  ослабление излучения нитью составляет 0,56; при излучательной способности нити 0,8 разрешающая способность способа измерения температуры нити будет равна  $0,5/(0,56 \cdot 0,8) = \pm 1,1\text{ K}$  [9.143].

При другом способе измерения нить, вытягиваемая через фильеру из расплава синтетического материала, проходит через излучение фона, температура которого изменяется. Фон жестко связан с инфракрасным пирометром, который периодически отклоняется в обе стороны от оси. Когда нить попадает в измерительное поле фона, достигающая пирометра энергетическая яркость лишь в том случае не изменяется, когда излучение фона равно излучению нити. В соответствии с этим должна регулироваться и измеряться температура фона [9.144].

Температуру поврежденных соединительных узлов высоковольтных линий электропередачи можно также определить с помощью измерения инфракрасного излучения. Для этого излучение соединительных узлов собирается параболическим зеркалом, в фокусе которого установлен высокочувствительный терморезистор. Работаящий по принципу модулированного излучения прибор был рассчитан таким образом, что влияние излучения неба было практически исключено [9.145].

### 9.9.7.6. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЦЕНТРИФУГ

Контроль за температурой роторов электродвигателей и генераторов также можно осуществлять с помощью пирометров инфракрасного излучения, что позволяет одновременно обнаруживать и устранять перегрузки. Для этого измерительная головка пирометра, в которой установлен приемник излучения, встраивается в соответствующую машину так, что ею воспринимается тепловое излучение лобовых частей обмотки ротора. В качестве приемника излучения было использовано полупроводниковое соединение  $\text{InSb—NiSb}$ , сопротивление которого зависит от температуры [9.146].

Частота вращения сверхскоростных центрифуг достигает 30 000—70 000 об/мин. Электродвигатель такой центрифуги работает в атмосфере водорода при давлении 20 лор. Возникающее в результате трения тепло отводится путем продувки. Температура ротора должна поддерживаться с точностью 0,1 К в диапазоне 0—60° С. С помощью яркостного инфракрасного пирометра измеряется энергетическая яркость ротора, которая, кроме температуры, зависит от излучательной способности поверхности ротора. Поскольку ее значение неизвестно, то измеренная с помощью контактного термометра температура корпуса приемника излучения доводится нагревом до температуры ротора, измеряемой пирометром. В этом случае независимо от излучательной способности поверхности ротора его температура практически равна температуре корпуса измерительной головки пирометра. Такая схема измерения позволила достичь разности температур ротора и измерительной головки пирометра менее 0,08 К [9.147].

### 9.9.7.7. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАЛАНДРОВЫХ ВАЛКОВ

В бумажной и текстильной промышленности необходимо тщательно следить за процессами сушки в каландровых машинах для того, чтобы готовая продукция после сушки имела требуемую влажность. Поэтому температуру поверхности бумаги или текстиля и температуру валков контролируют с помощью пирометров инфракрасного излучения. Поскольку гладкие валки имеют очень небольшие и сильно колеблющиеся по значению излучательные способности, поверхность валков, не соприкасающаяся с прокатываемым материалом, может быть покрыта непрозрачной для инфракрасного излучения пленкой синтетического материала. Благодаря незначительной теплоемкости синтетические пленки очень быстро воспринимают температуру валков. Аналогичным образом с помощью пирометров инфракрасного излучения можно также контролировать температуру каландровых валков для сушки тканей.

### 9.9.7.8. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА

Для медицинских измерений температуры поверхности тела можно использовать пирометры инфракрасного излучения с диапазоном измерения 23—42° С. Такое измерение может быть проведено с большой точностью и за короткое время, поскольку человеческая кожа обладает свойствами абсолютно черного тела. С помощью таких пирометров можно бесконтактным методом измерять температуру участка кожи диаметром всего лишь 1,5 мм с расстояния 15 мм от него или, диафрагмируя объектив, с расстояния 1 м. При больших расстояниях можно по различным значениям температуры отдельных участков тела получить среднюю температуру. Кроме того, в пределах всего диапазона измерения можно выделить растянутые поддиапазоны с шириной  $\pm 2$  К и началом отсчета, ступенчато перемещаемом от 25 до 40° С [9.150, 9.151].

### 9.9.7.9. ИНФРАКРАСНАЯ МИКРОПИРОМЕТРИЯ

В процессе разработки и при производстве интегральных микросхем необходимо контролировать степень нагрева их отдельных элементов. Другие измерения температуры на очень тонких объектах, например на нитях из синтетического материала толщиной около 20 мкм, следует проводить непосредственно при выходе из фильера; при этом нити в результате колебания не должны выходить из измерительного поля пирометра.

Созданные для таких целей инфракрасные микропирометры позволяют измерять температуры весьма малых объектов (диапазон измеряемых температур от 15 до более чем 600° С). С помощью индийсурьмяных приемников излучения, охлаждаемых жидким азотом, можно определять температурные градиенты величиной 0,05К при 300° С и 0,5К при 600° С на объектах, диаметры которых в зависимости от типа микропирометра могут быть от 8 до 36 мкм. При этом время отдельного измерения составляет лишь несколько мкс. Время измерения при помощи микропирометров с вакуумными термоэлектрическими термометрами или болометрами составляет 0,1—0,5 с. С их помощью можно измерять температуры объектов диаметром 15—400 мкм.

Микропирометр с инфракрасной оптикой может быть оснащен сменными линзами для изменения увеличения от 10 до 40. В нем установлен приемник излучения, а также система визуального наблюдения от источника света; подавать свет можно по световоду. С той же целью привод обтюлятора осуществляется через гибкий вал. Для проверки показаний микропирометра можно использовать небольшой источник черного излучения, вмонтированный в микропирометр с помощью полиэтиленовой пленки. Через корпус этого источника протекает термостатированная жидкость [9.148—9.149]. Такие микропирометры используют также для проведения биологических исследований на насекомых, бактериях и растениях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 9.1. *Ribaud, C.*: *Traité de Pyrométrie Optique*. Paris 1931.
- 9.2. *Hoffmann, F.*, *Tingwaldt, C.*: *Optische Pyrometrie*. Braunschweig 1938.
- 9.2a. *Henning, F.*: *Temperaturmessung*. 2. Aufl. Leipzig 1955.
- 9.3. *Pepperhoff, W.*: *Temperaturstrahlung*. Darmstadt 1956.
- 9.4. *Fuler, J.*; *Ludwig, R.*: *Arbeitsmethoden der optischen Pyrometrie*. Karlsruhe 1960.
- 9.4a. *Bezemer, J.*: *Spectral sensitivity corrections for optical standard pyrometers*. *Metrologia* 10 (1974), S. 47—52.
- 9.5. *Harrison, T. R.*: *Radiation Pyrometry and its underlying Principles of Radiant Heat Transfer*. New York. London 1960.
- 9.6. *Bauer, G.*: *Strahlungsmessung im optischen Spektralbereich*. Braunschweig 1962.
- 9.7. DIN 5496 Juli 1971 *Temperaturstrahlung*.
- 9.8. DIN 16160 Bl. 6 Jan. 1970 *Thermometer. Begriffe für Strahlungsthermometer*.
- 9.9. *Czerny, M.*; *Walter, A.*: *Tabellen der Bruchteillfunktionen zum Planckschen Strahlungsgesetz*. Berlin. Göttingen. Heidelberg 1961.
- 9.9a. *de Vos, J. G.*: *Emissivity of tungsten ribbon*. *Physica* 20 (1954). S. 690—714.
- 9.10. *Tingwaldt, C.*; *Kunz, H.*: *Optische Temperaturmessung in Landolt-Börnstein*, Bd. IV/4a, S. 47—147 (u. a. *Spektraler Emissionsgrad für  $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$* ).
- 9.11. *Gubareff, G. G.*; *Janssen, J. E.*; *Forborg, R. H.*: *Thermal radiation properties survey*. Honeywell Research Center, Minneapolis, Minnesota 1960.
- 9.11a. *Levignon, M.*: *Diskussion der Emissionsgradabhängigkeit von Gesamt-, Teilstrahl- und Quotientenpyrometern*. *Arch. techn. Messen* J 321—10 Juli 1974.
- 9.12. *Lieneweg, F.*: *Kennzeichnung des Emissionsfehlers von Strahlungs-pyrometern nach ihrem Verhalten bei Strahldichteschwächung durch charakteristische Wellenlängen*. *Z. Instr. Kde.* 75 (1967), S. 47—54.
- 9.13. *Lieneweg, F.*; *Schaller, A.*: *Ardonox, ein neues Ardometer*. *Siemens-Z.* 28 (1954), S. 67—73.
- 9.14. *Lieneweg, F.*; *Schaller, A.*: *Verbesserung der Meßeigenschaften des Ardometers*. *Siemens-Z.* 32 (1958), S. 331—335.
- 9.15a. *Lieneweg, F.*: *Fehler und Einflüsse bei der optischen Temperaturmessung mit Gesamtstrahlungs-, Teilstrahlungs- und Farbprometern*. *Arch. Eisenhüttenwes.* 35 (1964), S. 1145—1150.
- 9.15b. *Lieneweg, F.*: *Vergleichende Untersuchungen über Temperaturmessungen mit Strahlungs-pyrometern. Informationen zur Prozeßautomatisierung der Siemens u. Halske AG, Wernerwerk für Meßtechnik, Mai 1964, 3/2—3/6*.
- 9.16. *Mester, U.*: *Industrielle Strahlungs-pyrometer — Ausführungsformen und Einsatzmöglichkeiten*. VDI—Bericht Nr. 198 Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1973, S. 59—69.

- 9.17. *Liesegang, W.; Lusche, K.*: Einsatz des Farbpyrometers am Lepololfen. Zement—Kalk—Gips 17 (1964), S. 410—416.
- 9.18. *Kostkowski, H. I.; Lee, R. D.*: Theory and methods of optical pyrometry. Nat. Bur. Stand. Monograph 41 (1962); sowie in Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part I New York and London 1962, S. 449—481.
- 9.19. *Wanner, H.*: Photometrische Messung der Strahlung Schwarzer Körper. Ann. Phys. 2 (1900), S. 141—157.
- 9.20. *Holborn, L.; Kurlbaum, F.*: Über ein optisches Pyrometer. Ann. Phys. 10 (1903), S. 225—241.
- 9.21. *Mießing, H.*: Das Siemens — Glühfadenpyrometer. Siemens-Z. 5 (1925), S. 193—197; Das Glühfadenpyrometer. Meßtechn. 4 (1928), S. 175—181.
- 9.22. *Dike, P. H.; Gray, W. T.; Schroyer, F. K.*: Optical pyrometry. Leeds & Northrup Technic. Public. A1. 4000 (1966).
- 9.23. *Féry, Ch.*: Pyromètre a absorption. Journ. Physique 3 (1904), S. 32—37.
- 9.24. *Fairchild, C. O.; Hoover, W. H.*: Disappearance of the filament and diffraction effects in improved formes of an optical pyrometer. Journ. opt. Soc. Amer. 7 (1912), S. 543—579.
- 9.25. Organisation Internationale de Metrologie Légale (OIML): Recommendation internationale Nr. 18; Pyromètres optiques a filament disparaisant. Paris. Aug. 1970.
- 9.26. *Kunz, H.*: Prüfen technischer Strahlungs-pyrometer. VDI—Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 37—41 (mit zahlreichen Literaturhinweisen).
- 9.27. *Jagersberger, A.*: Meßgenauigkeit der technischen Teilstrahlungs-pyrometer. Bull. Schweiz. Elektrotechn. Verein 40 (1949), S. 179—186.
- 9.28. *Lovejoy, D. R.*: Accuracy of optical pyrometry in the range 800° C to 4000° C. Can. J. Phys. 36 (1958), S. 1397—1408.
- 9.29. *Geyer, E.*: Über die Verwendung der Wolframbandlampe als Strahlungsquelle bei der Einmessung von visuellen Teilstrahlungs-pyrometern. Feingerätetechn. 14 (1965), S. 71—75.
- 9.30. *Barber, C. R.; Power, E. B.; Quinn, T. J.*: A full-radiator lamp designed to replace the tungsten strip lamp as a pyrometric standard. Nature 202 (1964), S. 686.
- 9.30a. *Barber, C. R.*: Factors affecting the reproducibility of tungsten strip lamps for pyrometer standardization. J. Sci. Instr. 23 (1946), S. 238—242.
- 9.30b. *Quinn, T. J.; Barber, C. R.*: A Lamp as a reproducible source of near black-body radiation for precise pyrometry up to 2700° C. Metrologia 3 (1967), 1, S. 19—23.
- 9.31. *Crova, A.*: Mesure spectrométrique des hautes temperatures. C. R. Acad. Sciences 90 (1880), S. 252—254.
- 9.32. *Jagersberger, A.; Lieneweg, F.*: Strahlungs-pyrometer zur Farbtemperaturmessung. DRP 741510 (1943, Anmeld. 1939); DRP 760771 (1953, Anmeld. 1941); BRD-Pat. 882009 (1953, Anmeld. 1941); Jagersberger, A.: Strahlungs-pyrometer für Farbtemperaturmessung. DRP 714608 (1941, Anmeld. 1939).
- 9.33. *Lieneweg, F.*: Temperaturmessung. Krönert, J.: Handbuch der technischen Betriebskontrolle, Bd. 3 Physikalische Meßmethoden. 3. Aufl. Leipzig 1959, S. 162—376.
- 9.34. *Jagersberger, A.*: Verfahren zur Anzeigeberichtigung bei der Farbtemperaturmessung an nicht schwarz — oder grau strahlenden Körpern. BRD-Pat. 872662 (1953, Anmeld. 1941).
- 9.35. *Naeser, G.*: Über ein einfaches Farbpyrometer. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. II (1929), S. 373—385; Zur Farbpyrometrie. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. 12 (1930), S. 299—316; Ein neues kombiniertes Farbpyrometer mit Vergrätellung. Arch. Eisenhüttenwes; 9 (1935/36), S. 483—485; Ein verbessertes Farb-Helligkeitspyrometer und seine Anwendung. Stahl und Eisen 76 (1956), S. 968—970.
- 9.36. *Fornander, Sven.*: Ref. von Guthmann, K.: Der Einfluß des Farbsinnes bei Temperaturablesungen mit dem Farbpyrometer «Bioptix». Stahl und Eisen 61 (1941), S. 760—762 nach Fornander, S.: Om färgsinnet inverkan pa temperaturavläsningar med Bioptix-pyrometer. Jernkonters annaler 125 (1941), S. 67—80.
- 9.37. Richtlinie VDE/VDI 3511: Technische Temperaturmessungen. 4. Auflage, Düsseldorf 1967.
- 9.38. *Lieneweg, F.; Schaller, A.*: Neuere technische Strahlungs-pyrometer unter besonderer Berücksichtigung ihres optischen Aufbaues. Arch. techn. Messen Teil I J 321—8 Nov. 1960; Teil II J. 321—9 Dez. 1960.
- 9.39. *Jakobsen, A.; Rimkus, W.*: Faseroptik—Eigenschaften und Anwendung. Feinwerktechn. 71 (1967), S. 111—116.
- 9.40. *Lieneweg, F.*: Stand und Probleme der industriellen Strahlungs-pyrometrie. VDI-Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung, Düsseldorf 1966, S. 13—22.
- 9.41. *Kruse, P. W.; Mc Glauchin, L. D.; Mc Quistan, R. B.*: Elements of infrared technology: generation, transmission and detection. John Wiley & Sons, New York—London 1962.
- 9.42. *Lieneweg, F.; Menge, K.*: Das Farbpyrometer Ardocol. Siemens—Z. 37 (1963), S. 821—827.
- 9.43. *Lieneweg, F.*: Einrichtung zum Messen der Farbtemperatur von strahlenden Körpern. BRD-Pat. 1161701 (1964, Anmeld. 1956).
- 9.44. *Bauer, G.*: Der Begriff der «Empfindlichkeit» bei Strahlungsempfängern für den optischen Temperaturbereich. PTB-Mitteilungen 2 (1967), S. 116—123.
- 9.45. *Jones, R. C.*: Phenomenological description of the response and detecting ability of radiation detectors. Proc. Inst. Radio Eng. 47 (1959), S. 1495—1502.
- 9.46. *Putley, E. H.*: Solid state devices for infra-red detection. J. Sci. Instrum. 43 (1966), S. 857—868.

- 9.47. *Willardson, R. K.; Beer, A. C.*: Semiconductors and Semimetals. Bd. 5: Infrared detectors. Academic Press, New York and London 1970.
- 9.48. *Reed, A. W.*: Detection of an optical radiation detector. A brief survey of detectors responding to near ultraviolet, visible or near infra-red radiation. Measurement and Control 4 (1971), Febr. S. T15—T18.
- 9.49. *Jones, R. C.*: A new classification system for radiation detectors. J. opt. Soc. Amer. 39 (1949), S. 327—343; Factors of merit for radiation detectors. J. opt. Soc. Amer. 39 (1949), S. 344—356.
- 9.50a. *Kortum, H.*: Zum Leistungsfaktor sowie zur Konstruktion und optimalen Dimensionierung von Thermoelementen. Feingerätetechn. 13 (1964), S. 561—565.
- 9.50b. *Kortum, H.*: Zur Frage der Abhängigkeit der Empfindlichkeit und der Signalleistung von der Größe der Empfängerfläche bei Vakuumthermoelementen. Feingerätetechn. 14 (1965), S. 145—149.
- 9.50c. *Soa, E.—A.*: Einige Bemerkungen zur Entwicklung von Bolometern und Vakuumthermoelementen. Feingerätetechn. 21 (1972), S. 387—389.
- 9.51. *Paul, B.*: Optische Temperaturmessung bei niedrigen Temperaturen — Probleme und Lösungswege. Vortrag MNU—Hauptversammlung Saarbrücken am 31.3.1969 (Als Manuskript erhältlich von Siemens AG, Erlangen).
- 9.52. *Kortum, H.*: Über die Grenzen der Infrarotpyrometrie. Messen, Steuern, Regeln II (1968), S. 245—247.
- 9.53. *Lieneweg, F.*: In strahlungsdurchlässigen Kolben luftdicht eingeschlossenes Thermoelement, vorzugsweise für Strahlungsmessung. DRP 713145 (1940).
- 9.54. Philips ForschungsLaboratorium: Neue Strahlungsthermoelemente in Dünnschichttechnik. Meßtechnik 79 (1971), S. 241—242.
- 9.54a. *Cammerer, J. S.; Cammerer, Fr. C.; Fischer, G.*: Messung der Oberflächentemperaturen und der Wärmeabgabe großer industrieller Objekte von ungleichmäßiger Temperatur. Brennstoff—Wärme—Kraft 16 (1964), S. 120—126.
- 9.55. *Johansen, E. S.*: Über die Vakuum-Thermosäule als Strahlungsmesser. Ann. Phys. IV 33 (1910), S. 517—536.
- 9.56. *Becker, H.*: Ultrarot-Thermometrie VDI-Z 112 (1970), S. 7—13.
- 9.57. *Paul, B.*: Neuere Untersuchungen und Entwicklungen auf dem Gebiet der InSb-NiSb-Infrarotdetektoren. Vortrag Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Fachausschuß Halbleiter, Freudenstadt vom 6.4. bis II. 4. 1970. (Als Manuskript erhältlich von der Siemens AG-Erlangen).
- 9.58. *Böttger, H.*: Bericht über einen pneumatischen Strahlungsempfänger für das Gebiet mittel- und langwelliger Infrarotstrahlung. Exp. Techn. Physik 3 (1955), S. 83—88.
- 9.59. *Golay, M. J. E.*: Theoretical consideration in heat and infrared detection, with particular reference to the pneumatic detector. Rev. sci. Instrum. 18 (1947), S. 347—356; A pneumatic infra-red-detector. Rev. sci. Instrum. 18 (1947), S. 357—362; The theoretical and practical sensitivity of the pneumatic infra-red detector. Rev. sci. Instrum. 20 (1949), S. 816—820.
- 9.60. DIN 44020 Mai 1971 Bl. 1 Photoelektronische Bauelemente, Allgemeine Begriffe. DIN 44020 Juli 1969 Bl. 2 Photoelektronische Bauelemente, Begriffe für Photovervielfacher. DIN 44028 Nov. 1961 Bl. 1 Messung photoelektronischer Bauelemente, Meßbedingungen für Photozellen. DIN 44028 Nov. 1961 Bl. 2 Messung photoelektronischer Bauelemente, Meßbedingungen für Photovervielfacher. DIN 44028 Juni 1962 Bl. 3 Messung photoelektronischer Bauelemente, Meßbedingungen für Photoelemente. DIN 44028 Jan. 1975 Bl. 4 Messung photoelektronischer Bauelemente, Meßbedingungen für Photowiderstände.
- 9.61. *Hartmann, W.; Bernhard, F.*: Photovervielfacher und ihre Anwendung in der Kernphysik. Akademie-Verlag, Berlin 1957.
- 9.62. *Giesecking, F. H.*: Messungen über den Einfluß der Temperatur auf die spektralen Eigenschaften von Farbglasfiltern und Photovervielfachern. Meßtechnik 10 (1969), S. 240—243.
- 9.63. *Goldbach, G.*: Strahlungsempfänger, insbesondere Halbleiterempfänger Feingeräte. 20 (1971), S. 114—116.
- 9.64. *Görlich, P.; Krohs, A.; Lang, W.*: Photowiderstände, Photodioden und Phototransistoren. Arch. techn. Messen J. 394—1 Sept. 1958 J. 394—2 Nov. 1958; J. 394—3 Dez. 1958.
- 9.65. *Wiesner, R.*: Germanium-Photodioden und Phototransistoren. Radio Mentor 21 (1955), S. 630—635.
- 9.66. *Geist, D.*: Sperrschicht-Photoelemente I. Arch. techn. Messen J.; 392—2 Dez. 1954.
- 9.67. *Kellermann, A.*: Sperrschicht-Photoelemente II. Arch. techn. Messen J. 392—3 Febr. 1955.
- 9.68. *Hahn, H.*: Halbleiter-Meßfühler in Theorie und Praxis, Teil 2. Messen + Prüfen (1970), S. 211—218.
- 9.69. *Wiesner, R.; Nissi, F.*: Silicium-Photoelemente. Siemens-Z. 32 (1958), S. 128—134.
- 9.70. *Kuhn L.*: Halbleiter-Strahlungsdetektoren, Teil I und II Meßtechnik (1972), S. 313—321; 366—374.
- 9.71. *Paul, B.; Weiß, H.*: Anisotropic InSb—NiSb as an infrared detector. Solid-state electronics-Pergamon press II (1968), S. 979—981; Infrarot—Detektoren OEN-Serie, Druckschrift der Siemens AG E 48.
- 9.72. *Féry, M. Ch.*: Telescope pyrométrique. Physique 4. Série, T. 3 (1904), S. 701—704.
- 9.73. *Esser, F.*: Strahlungs-pyrometer mit Germanium—Photodioden als Strahlungsempfänger. Neue Hütte 9 (1964), S. 612—614.; Esser, F.; Heidenreich, H.: Entwicklung eines Strahlungs-pyrometers mit einer Germanium-Photodiode als Strahlungsempfänger. Messen—Steuern-Regeln 8 (1965), S. 128—133.

- 9.74a. *Warnke, G. F.*: Commercial pyrometers. In *Temperature, its measurement and control in science and industry*. Pittsburg 1973, Vol. IV, Part I, S. 505—517.
- 9.74b. *Mester, U.; Reinhold, H. D.*: Materialtemperatur unter IR—Strahlen jetzt berührungslos messen. *Elektrotechn.* 54 (1972), S. 10—13.
- 9.75. *Nutter, G. D.; Wike, R. B.; Bollermann, P. V.*: High precision automatic optical pyrometers. *Instr. Control Syst.* 40 (1967), 5, S. 96—101.
- 9.76. *Forstlering, H.*: Verteilungstemperatur, II Messung der Verteilungstemperatur. *Arch. techn. Messen V 435—2*; März 1954; Messung der Farbtemperatur. *Festschrift «50 Jahre VDI-Bezirksverein Nordbayern»*. VDE-Verlag Berlin 1961, S. 59—62.
- 9.77. *Arnods, F.*: Das objektive automatische Farbpyrometer. *Wärme* 73 (1967), S. 93—96.
- 9.78. *Menge, K.; Thieme, R.*: Farbpyrometer Ardocol mit temperaturlinearem Stromausgang. *Siemens-Z.* 47 (1973), S. 747—750.
- 9.79. *Hecht, G. J.*: A two wavelength near infrared pyrometer. In *Temperature, its measurement and control in science and industry*, Vol. III., Part 2 (1962—63), S. 407—417.
- 9.80. *Guilino, E.; Müller, P.*: Ein neues Quotientenpyrometer. *Arch. techn. Messen V 214—II*, Mai 1970; Pyrometer for use in Q-machines. *Rev. sci. Instr.* 41 (1970), S. 429—434.
- 9.80a. *Bach, J. H.; Street, P. J.; Twamley, C. S.*: Temperature measurement of particulate surfaces. *J. Phys. E: Sci. Instr.* 3 (1970), 4, S. 281—286.
- 9.80b. *Kühn, E.*: Temperaturmessung beim Widerstandsschweißen mit einem rasch ansprechenden Farbpyrometer. *Z. Schweißen u. Schneiden* 22 (1970), S. 258—262.
- 9.81. *Euler, K.-J.*: Messung der wahren Temperatur in der optischen Thermometrie. *Chem. Ing.-Techn.* 38 (1966), S. 154—159.
- 9.82. *Neuer, G.*: Verfahren zum Messen des Emissionsgrades fester Stoffe bei hohen Temperaturen. *VDI—Z.*; 114 (1972), S. 38—43.
- 9.83. *Busse, H.; Krüger, B.*: Möglichkeiten der Meßwertberichtigung in der optischen Pyrometrie und Farbtemperaturmessung an Drahtstrahlen und Rohrschweißanlagen. *Stahl und Eisen* 94 (1974), S. 1021—1027.
- 9.84. *Weiß, M.*: High temperature ultraviolet radiometer. *Instr. and Control Syst.* 37 (1964), 5, S. 95—99.
- 9.85. *Pepperhoff, W.*: Optische Pyrometrie im polarisierten Licht. *Z. angew. Phys.* 12 (1960), S. 168—171.
- 9.86. *Pastie, W. G.*: An emissivity-indepent radiation pyrometer. *J. opt. Soc. Am* 41 (1951), S. 872.
- 9.87. *Kelsall, D.*: An automatic emissivity-compensated radiation pyrometer. *J. sci. Instr.* 40 (1963), I, S. 1—4.
- 9.88. *Tingwaldt, C.*: Ein einfaches optisch-pyrometrisches Verfahren zur direkten Ermittlung wahrer Temperaturen glühender Metalle. *Z. Metallkde* 51 (1960), S. 116—119.
- 9.89. *Murray, T. P.*: Polaradiometer — a new instrument for temperature measurement. *Rev. sci. Instr.* 38 (1967) S. 791—797.
- 9.90. *Murray, T. P.; Readal, G. J.*: The polaradiometer-pyrometer. *Instr. and Control Syst.* 44 (1971), 2, S. 115—118.
- 9.91. *Tingwaldt, C.; Schley, U.*: Eine optische Methode zur direkten Ermittlung der wahren Temperatur glühender Metalle. *Z. Instrkde.* 69 (1961), S. 205—207.
- 9.92. *Euser, P.*: Compensation Pyrometer. *Instr. Control Syst.* 17 (1963), 5, S. 487—489.
- 9.93. *Drury, M. D.; Percy, K. P.; Land, T.*: Pyrometer for surface temperature measurement. *J. Iron Steel Inst.* 169 (1951), S. 245—250.
- 9.94. *Seumel, G.; Mester, U.*: Bestimmung und Redelung der Temperatur von Metallbänder mit einem Strahlungs-purometer. *Metall* 26 (1972), S. 342—364.
- 9.95. *Lieneweg, F.; Menge, K.*: Strahlungs-pyrometrische Messung der wahren Temperatur und Bestimmung des Emissionsgrades in Schmelzen. (Mit Diskussionsbeiträgen von Wübbenhorst, H.; Jürges, J.; Busse, H.) *Arch. Eisenhüttenwes.* 38 (1967), S. 199—209.
- 9.96a. *Hornbeck, G. A.*: A high-speed ratio pyrometer. In *Temperature, its measurement and control in science and industry*, Bd. III, Teil 2, S. 425—428; New York 1962.
- 9.96b. *De Witt, D. P.; Kunz, H.*: Theory and technique for surface temperature determination by measuring the radiance temperatures, and the absorbance ratio for two wavelengths. *Temperature, its measurement and control in Science and Industry*, Vol. IV, Part I, Pittsburgh 1973, S. 599—610.
- 9.97. *Hoffmann, F.; Meißner, W.*: Über die Helligkeit Schwarzer Strahlung beim Gold- und Palladiumschmelzpunkt. *Ann. Phys.* IV. Folge 60 (1919), S. 201—232.
- 9.98. *Tingwaldt, C.; Kunz, H.*: Über die Verwirklichung des Schwarzen Körpers am Gold- und am Silberpunkt bei pyrometrischen Temperaturmessungen. *Optik* 15 (1958), S. 333—342.
- 9.99. *Fischer, W.; Labs, D.*: Ein pyrometrischer Goldfixpunkt mit horizontaler Strahlrichtung. *Z. Instrkde.* 75 (1967), S. 226—228.
- 9.100. *Bojarski, L. A. und Mitarbeiter*: L'emploi de la methode pyroëlectrique pour les mesures précises dans le domaine de la pyrométrie optique. *Procès-Verbaux Comité. Int. Poids—Mesures* 26 — A, T 151 (1958).
- 9.101. *Jones, T. P.*: Tapping J: The relations of the IPTS 68 above 1064,43° C using the NSL-photoelectric pyrometer. *Metrologia* 8 (1972), I, S. 4—11.
- 9.102. *Kunz, H.*: Representation of the temperature scale above 1387, 58 K with photoelectric direct current pyrometers. *Metrologia* 5 (1969), 3, S. 88—102 sowie: Über ein photoelektrischen Normalpyrometer mit quasi konstanter Empfängerempfindlichkeit und Sektorschwächung für den Bereich 650 ... 3700° C. *Dissertation Techn. Hochschule Hannover* 1967.
- 9.103. *Magdeburg, H.; Wende, B.*: Über die Erzeugung Schwarzer Strahlung mit einer Wolfram—Lampe. *PTB-Mitteil.* 5/64, S. 431—434.

- 9.104. *Portsch, R.*: Verfahren zur Kalibrierung photoelektronischer Bauelemente im infraroten Spektralgebiet. Meßtechnik 6 (1972), S. 150—158.
- 9.105. *Groll, M.*: Ein Graphit-Hohlraumstrahler für hohe Temperatur mit ortsabhängiger ohmschen Heizung. VDI-Z. 114 (1972), S. 253—256.
- 9.106. *Dahm, U.*: Ein Schwarzer Strahler für hohe Temperaturen. PTB.—Mitt. 2/66, S. 107—109.
- 9.107. *Geyer, F. H.*; *Pieper, W.*: Schwarzer Strahler für hohe Temperaturen. Feingeräte-techn. 16 (1967), 4, S. 153—156.
- 9.108. *Heimke, W.*: Einbauvorrichtungen für Ardometer. Siemens-Z. 35 (1961), S. 150—153; ferner: Anbauarmaturen für Strahlungs-pyrometer und Rauchdichtemesser in der Eisenhüttenindustrie und in Glashütten. Siemens—Z. 41 (1967), S. 785—790; (s. auch Druckschriften der Hersteller).
- 9.109. *Bork, P.*: Betriebs-sichere und verzögerungsarme Temperaturmessung in Hochofen-Heißwindanlagen. Regelungstechnische Praxis II (1969), S. 150—153.
- 9.110. *Reinfeld, H.*: Betriebserfahrungen über das kontinuierliche Messen der Temperaturen in Eisenschmelzen mit modernen Strahlungs-pyrometern. Radex-Rundschau (1966), H. 4, S. 205—217.
- 9.111. *Busse, H.*: Stand und Probleme der Temperaturmessung in der Eisenhüttenindustrie. VDI—Berichte Nr. 112; Technische Temperaturmessung. Düsseldorf 1966, S. 63—72.
- 9.111a. *Gulthmann, K.*: Betriebsüberwachung in Gießereien. I. Temperaturüberwachung der Schmelzen; II. Temperaturüberwachung der Öfen. Arch. Tech. Messen V 8222—I Dez. 1942 und V 8222—2 Jan. 1943.
- 9.112. *Menge, K.*: Oberflächen-Temperaturmessung beim Stranggießen. Siemens—Z. 45 (1971), S. 640—642.
- 9.112a. *Terry, F.*; *Friedewald, W.*: Automatische Ofenführung beim Siemens-Martin-Prozess. Arch. Techn. Messen, Lieferung 298, Nov. 1960, S. R169 bis R175.
- 9.113. *Fischer, A.*: Kontinuierliche thermoelectrische Messung des Temperaturablaufs der Eisenschmelzen bei den Blasstahlverfahren. Stahl u. Eisen 82 (1962), S. 797—808.
- 9.114. *Naeser, G.*; *Pepperhoff, W.*: Verfahren zur Ermittlung der Schmelztemperatur im bläsenden Konverter. Stahl u. Eisen 70 (1950), S. 22—24.
- 9.115. *Wever, F.*; *Koch W.*; *Höfermann, N.*; *Steinkopf, B. A.*; *Knüppel, H.*; *Mayer, K. E.*; *Wielhoff, G.*: Die Überwachung und Steuerung der Temperaturstrahlung des Bades und des Spektrums der Konverterflamme. Stahl u. Eisen 75 (1955), S. 549—559.
- 9.116. *Naeser, G.*; *Pepperhoff, W.*: Die Flammenstrahlung des basischen Converters. Stahl u. Eisen 69 (1949), S. 391—398.
- 9.117. *Naeser, G.*; *Krächter, H.*: Überwachung des basischen Windfrischverfahren durch Messung der Strahlung der Konverterflamme. Stahl u. Eisen 62 (1942), S. 341—347.
- 9.118. Siemens-Druckschrift MP 105/7: Flammenstrahlungsmessung am Thomaskonverter und am Sauerstoff-Aufblaskonverter mit dem Farbpyrometer ARDOCOL. Bestell-Nr. 2—7805—005.
- 9.119. *Barber, B.*: Furnace load temperature measurement during the heating process. Industrial and Process Heating (1967), S. 24—28.
- 9.120. *Naeser, G.*; *Engels, G.*: Zur Strahlungsanalyse von flüssigem Stahl. Stahl und Eisen 69 (1949), S. 508—514.
- 9.121. *Orths, K.*: Gütevorbestimmung an Gußeisen- und Stahlschmelzen durch optische Temperaturmessungen. Arch. Eisenhüttenwes. 27 (1956), S. 289—295; ferner: Die Oberflächeneigenschaften von Eisen- und Stahlschmelzen als metallurgisches Merkmal. Arch. Eisenhüttenwes. 33 (1962), S. 77—79.
- 9.122. *Gulthmann, K.*: Temperaturüberwachung von Stahlschmelzen und beim Gießen. Radex-Rundschau (1955), S. 557—586.
- 9.122a. *Kreutzer, C.*: Neuere Betriebsüberwachung an Siemens-Martinöfen bei der Beheizung mit karburiertem Koksofengas. Stahl—Eisen 59 (1939), S. 1017—1027.
- 9.123. *Wieneck, H.*: Die Bedeutung der Meßtechnik für die Automatisierung in Hüttenwerken. Stahl u. Eisen 86 (1966), S. 189—200.
- 9.124. *Burley, B. W.*: Radiation pyrometers to measure the temperature of small objects. Instrum. Engineer (1965), 4, S. 33—37.
- 9.125. *Hill, W. E.*: Two color pyrometer; in Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. III, Part 2, New York 1962/63.
- 9.126. *Müller, H.*: Messungen an Lichtbogenöfen. Arch. techn. Messen V 8254—I März 1956.
- 9.127. *Westmeyer, H.*; *Förster, H.*: Über Temperaturmessungen in Schmelzen im Elektronenstrahl—Mehrkammerofen. Neue Hütte 9 (1964), S. 535—538.
- 9.128. *Deltmer, F.*: Temperaturüberwachung in der keramischen Industrie. Arch. techn. Messen V 2175—2, April 1941.
- 9.129. *Thies, G.*: Messung der Manteltemperatur an Zementdrehrohröfen mit einem längs des Drehrohrs bewegten Ardonox. Siemens-Z. 36 (1962), S. 879—880.
- 9.130. *Meister, R.*; *Weber-Klein, P.*; *Wefer, F.*; *Hardwig, J.*: Temperaturmessung in Glashütten. Fachauschub-Bericht Nr. 55 der deutschen Glastechn. Gesellschaft. F.—A. II, Frankfurt, Aug. 1955, S. 479—518.
- 9.130a. *Kolbow, P.*: a) Neue Strahlungs-pyrometer für Glasteperaturmessungen. Sprechsal 102 (1969), S. 9—12. b) Temperaturmessungen in Glashütten. Sprechsal 102 (1969), S. 116—121.
- 9.131. *Pape, H.*: Probleme der Temperaturmessung in der Glasindustrie. In VDI-Berichte, Düsseldorf 1973, Techn. Temperaturmessung Nr. 198, S. 111—115.
- 9.132. Land—Pyrometers Ltd, Sheffield: Land Gaspyrometer, Liste P 12.
- 9.133. *Land, T.*; *Barber, R.*: Transact. Soc. Instrum. Technology (1963), 3, S. I—II.
- 9.134. *Volkman, H.*; Handbuch der Infrarot Spektroskopie. Weinheim 1972.

- 9.135. Jaminson, J. A.; *Infrared physics and Engineering*. New York, Toronto, London 1963.
- 9.136. *Brügel, W.*: Einführung in die Ultrarotspektroskopie. 4. Auflage, Darmstadt 1969.
- 9.137. *Noakes, W.*: a) Thermometry by radiation—factors affecting desing. b) Thermometry by radiation—usage on plastics materials. c) Thermometry by radiation—measuring Glass temperature. d) Thermometry by radiation—general application areas. *Control and Instrum.* 3 (1971), a) H. 9, S. 45—47; b) H. 10, S. 42—43; c) H. II, S. 34—35; d) H. 12, S. 30—31.
- 9.138. *Mester, U.*; *Glockmann, W.*: Contactless determination of low temperatures by infrared radiation thermometers and temperature measurement on transparent materials. Conference on infrared techniques, Sept. 1971, University of Reading, Institution of Electronic and radio Engineers.
- 9.139. *Labs, D.*: Temperaturmessung in der Astrophysik. VDI—Berichte Nr. 198; Technische Temperaturmessung. Düsseldorf 1973, S. 37—49.
- 9.140a. *Young, R. S.*: A new infrared radiation pyrometer. *J. sci. Instrum.* 44 (1967), S. 988—992.
- 9.140b. Temperature measurement of aluminium on an extrusion press using the new BACO radiation pyrometer. *J. sci. Instrum.* (2) EI (1968), S. 332—336.
- 9.141. *Black, P. J. S.*: Ein Pyrometer zur kontinuierlicher Messung der Temperatur von Aluminium—Strangpreßprofilen. *Aluminium* 43 (1967), S. 572—574.
- 9.142. *Поккавэй А. А.* — «Цветные металлы», 1963, № 3, с. 76—79.
- 9.143. *Mester, U.*; *Glockmann, W.*: Ein neues Verfahren zur Temperatur an laufenden Fäden. *Zs. Textilbetrieb* (1973), H. 1/2, S. 43—45.
- 9.144. *Köhler, P.*: Berührungslose Bestimmung von Temperaturen und Durchmesser an einem aus der Schmelze gesponnenen Faden. *Chem. Ing.—Techn.* 43 (1971), S. 274—278.
- 9.145. *Leslie, J. R.*; *Wait, J. R.*: Bolometer detection of line temperatur rise. *Electr. Engng.* (1949), II, S. 969—973.
- 9.146. Siemens Druckschrift: Direkte Läufer temperaturüberwachung für Hochspannungsmotoren mit Käfigläufer. Bestell—Nr. E 215/1370; 2316Sb6711. Siehe auch: Infrarot Strahlungspyrometer mißt berührungslos. *Arch. Techn. Messen*, Lieferung/423, April 1971, R. 40/104.
- 9.147. *Küng, R.*: Berührungslose Messung der Temperatur des Rotors einer Ultrazentrifuge. *Brown Boweri Mitt.* 53 (1966), Nr. 1/2, S. 90—99.
- 9.148. *Kortum, H.*; *Müller, J. E.*: Über Mikropyrometer für Forschung und Betriebsmeßtechnik. *Feinwerktechn.* 18 (1969), S. 339—342.
- 9.149. *Barnes, Stamford*: Druckschriften: Infrared microscope model RM—2A und RM—2B.
- 9.150. Heimann GmbH Druckschrift: Pyrometer KT 41, Zur thermischen Exploration des menschlichen Körpers. 1/1973.
- 9.151. *Priebe, L.*: Temperaturmessung in Medizin und Biologie. VDI—Berichte Nr. 198; Technische Temperaturmessung. Düsseldorf 1973, S. 141—147.

## 10. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕН

Используемые для измерения температуры пламен методы в основном уже известны из других областей применения. В общем случае эти методы дают результаты, которые, исходя из закономерностей теплообмена и физических свойств пламени, могут быть пересчитаны на искомую его температуру. Требуемые теорией измерений условия часто, однако, могут быть соблюдены лишь приблизительно, так что измеренная или рассчитанная температура может отличаться от действительной на 50—100 К. При выборе способа измерения руководствуются уровнем температуры, желательной точностью и типом пламени. Адиабатическая температура горения городского газа, природного газа, жидкого топлива и угля находится ниже 2100° С; температура в пламени в зависимости от условий теплообмена и нагрева воздуха или горящего вещества достигает 1600—1900° С. (В особых случаях, например, в сварочной горелке, могут достигаться температуры более 3000° С.) Наиболее распространенный тип пламени — турбулентное диффузионное пламя с пространственным температурным полем, которое из-за турбулентных потоков и процессов перемешивания может меняться во времени. Трудности при измерении связаны большей частью с этими временными и пространственными температурными градиентами.

Средства измерения температуры пламен подразделяются на две основные группы: пирометры излучения и контактные термометры.

### 10.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПИРОМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Область применения оптических методов измерения простирается до самых высоких температур, поэтому эти методы преимущественно используются в теплотехнике и технике топливоиспользования. Разумеется, речь идет о пламени, т. е. о частично прозрачной среде, излучение которой не может быть объяснено, как у твердых тел, свойствами поверхности, а сводится к взаимодействию всех элементарных объемов пламени. Измерение температуры пирометрами излучения сводится поэтому к пространственному усреднению температуры вдоль оси визирования пирометра. Поэтому необходимо также иметь ясное представление о положении излучающих компонентов — это прежде всего двуокись углерода и водяные пары, а также сажа и другие твердые частицы, содержащиеся в пламени. Кроме того, имеет значение выбор области длин волн, воспринимаемых пирометром. Яркостный пирометр, работающий в видимой области спектра, можно применять лишь в случае светящегося или окрашенного пламени. Неизлучающие горячие или холодные либо воздушные, либо газовые зоны принципиально не могут быть охвачены без специальных приемов (окрашивание). При этом необходимо отметить, что различие в спектрах может быть выгодно использовано для раздельного измерения температур газов и твердых тел.

Применительно к пламени используются уже известные из раздела 9 способы пирометрии излучения.

Ниже рассматривается применение этих способов для измерения температуры пламен с указанием важнейших ограничений и источников возможных погрешностей.

#### 10.1.1. ПИРОМЕТРИЯ ПОЛНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Энергетический пирометр полного излучения показывает радиационную температуру, которая лишь для черных тел ( $\epsilon = 1$ ) совпадает с действительной температурой. Температура пламени определяется из закона Стефана—Больцмана:

$$T_{Fl} = T_t / \sqrt[4]{\epsilon_{Fl}} \quad (10.1)$$

При этом разумеется, что излучательная способность  $\epsilon_{Fl}$  должна быть известна [ср. уравнение (9.23)]. На рис. 10.1 показаны типичные значения излучательной способности пламен при сжигании мазута, природного газа и городского газа, в зависимости от расстояния от очага горения. В зависимости от горящего вещества, типа горения и других параметров значение излучательной способности  $\epsilon$  изменяется от 0,2 до 0,95. Действительная температура, таким образом, может быть в 1,5 раза выше измеренной по излучению пламени.

Быстродействие пирометра полного излучения незначительно. Вследствие требований к постоянству спектральной чувствительности в широком волновом диапазоне в качестве приемников излучения могут применяться термометры, болометры и др., инерционность которых в большинстве случаев составляет несколько секунд. Таким образом, пирометры полного излучения дают результаты, которые усреднены по пространству, времени и длинам волн.

В заключение опишем опыты, с помощью которых могут быть измерены излучательные способности, а следовательно, и действительная температура пламени.

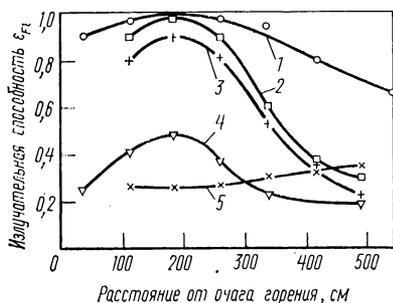


Рис. 10.1. Излучательная способность пламени в зависимости от расстояния от очага горения:

1 — угольная пыль; 2 — каменноугольный пек; 3 — мазут; 4 — природный газ; 5 — коксовый газ

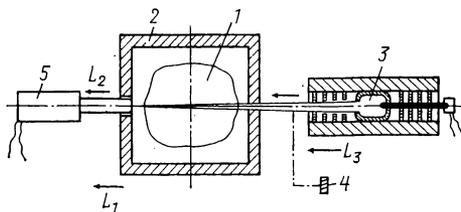


Рис. 10.2. Установка для измерения температуры пламени по методу Шмидта (схема):

1 — пламя; 2 — камера сгорания; 3 — горячий задний фон; 4 — холодный задний фон; 5 — пирометр полного излучения

Метод Шмидта [10.1], разработанный первоначально применительно к излучению частиц, основан на сравнении излучения пламени с излучением определенного тела, помещенного за пламенем. При помощи пирометра с малым угловым раскрытием могут быть измерены три величины (рис. 10.2):

$L_1$  — энергетическая яркость излучения только самого пламени; при таком измерении излучающий задний фон (например, нагретую стену печи) закрывают черной охлаждаемой пластинкой, на которую визируют пирометр через толщу пламени;

$L_2$  — сумма энергетических яркостей излучения пламени и горячего тела, расположенного за пламенем (например, стенки печи);

$L_3$  — энергетическая яркость излучения только одного заднего фона.

Имеются следующие соотношения (индекс «3» относится к заднему фону):

$$L_1 = \epsilon_{Fl} \frac{\sigma}{\pi} T_{Fl}^4; \quad (10.2a)$$

$$L_2 = L_1 + (1 - \alpha_{Fl}) L_3; \quad (10.2б)$$

$$L_3 = \epsilon_3 \frac{\sigma}{\pi} T_3^4, \quad (10.2в)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана.

Из уравнения (10.2б) получаем коэффициент поглощения пламени:

$$\alpha_{Fl} = 1 - (L_2 - L_1)/L_3. \quad (10.3a)$$

Из определений понятий излучательной способности  $\epsilon$  и коэффициента поглощения  $\alpha$  вытекают условия, при которых закон Кирхгоффа справедлив не только для спектральных ( $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$ ), но и интегральных величин ( $\epsilon_{Fl} = \alpha_{Fl}$ ), вследствие чего можно считать, что:

- а) пламя дает серое излучение или
- б) нагретый задний фон дает либо серое, либо черное излучение с температурой, равной температуре пламени.

Из уравнения (10.2а) следует:

$$T_{Fl} = \sqrt[4]{L_1 \pi / \epsilon_{Fl} \sigma}, \quad (10.3б)$$

где излучательная способность определяется из уравнения (10.3а).

Излучающее пламя с высоким значением излучательной способности может быть принято как серое. С достаточной точностью это применимо к мазутному пламени. Хотя спектральный коэффициент поглощения  $k_\lambda$ , величина которого определяется из оптических свойств сажи, уменьшается с длиной волны примерно пропорционально  $1/\lambda^{1,2}$  [10.2], излучательная способность связана с величиной  $k_\lambda$  следующим соотношением:

$$\epsilon_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda c_R d}, \quad (10.4)$$

где  $d$  — толщина слоя сажи;  $c_R$  — концентрация сажи.

При высоких концентрациях сажи эту величину, таким образом, можно приблизительно рассматривать как независимую от длины волны.

Согласно теории Ми [10.2], излучение пылеугольного пламени является серым. Вследствие относительно больших размеров частиц угольной пыли в сравнении с длиной волны излучение заднего фона будет не только поглощаться частицами, но в определенной мере и рассеиваться ими [10.3]. В этом случае будет относительно большой коэффициент поглощения и соответственно измеренная температура окажется заниженной.

Вследствие четко выраженного селективного характера газового излучения предположение о сером излучении несветящегося пламени может привести к большим погрешностям. Необходимо, чтобы выполнялось второе из упомянутых выше условий. Если температура заднего фона слишком велика, то и измеренная температура пламени окажется завышенной, и наоборот [10.4].

На практике при точном измерении энергетической яркости  $L_3$  встречаются трудности, связанные с изменением температуры заднего фона. В исследовательских целях этот метод, однако, применялся часто [10.5]. Среди преимуществ метода отметим возможность измерения не только температуры, но также излучательной способности и энергии излучения.

## 10.1.2. ЯРКОСТНАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Температуры светящегося и несветящегося пламени могут быть измерены двумя сходными методами: методом Курлбаума [10.6] или методом обращения линий [10.7]. Оба метода очень сходны с методом Шмидта и основаны на сравнении излучения пламени с излучением расположенного за ним черного тела в ограниченном интервале длин волн. Таким образом, к пламени должен быть доступ с двух противоположных сторон. В методе Курлбаума излучение сажи сравнивается с излучением заднего фона. Во втором методе несветящееся пламя окрашивается добавкой какой-либо соли (например, NaCl), что приводит к линейчатому спектру. Во время измерения температура, а следовательно, и яркость свечения черного излучателя должны так изменяться, чтобы изображение, наблюдаемое при помощи спектрометра сквозь пламя, исчезало при наблюдении пламени. Визуальное сравнение с помощью спектрометра в методе обращения линий правомерно, однако субъективно. Вместо сравнения яркостей может быть произведено сравнение энергетических яркостей излучения с помощью фотоумножителя [10.8].

Ввиду того, что наблюдение ограничено малым диапазоном длин волн, может быть применен закон Кирхгоффа  $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ , тогда из уравнения (10.2б) при  $L_2 = L_3$

следует  $T_3 = T_{Fl}$ . Температура заднего фона определяется по градуировочной кривой *температура заднего фона — ток нагрева*. Схема измерительного устройства приведена на рис. 10.3.

Точность при сравнении яркостей свечения может быть несколько повышена, если пламя не слишком сильно мерцает и его яркость не меняется. Кроме того, пламя не должно быть оптически очень толстым, так как иначе  $\alpha_{Fl} \rightarrow 1$  и задний фон через пламя не будет различаться. Те же условия должны соблюдаться при энергетическом сравнении [ср. уравнение (10.26)]. В этих случаях рекомендуется определять температуру из соотношения

$$\frac{1}{T_{Fl}} = \frac{1}{T_3} + \frac{\lambda_e}{c_2} \ln \frac{L_1 + L_3 - L_2}{L_1}, \quad (10.5)$$

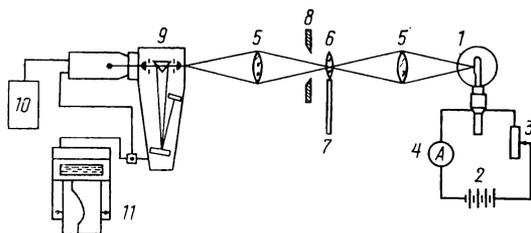
где  $\lambda_e$  — эффективная длина волны.

Трудности при сравнении яркостей возникают также при сильных температурных градиентах по оптической оси измерительного устройства. Сравнение энергий приводит в этом случае к температуре, усредненной по соответствующему объему.

При толковании результатов измерений следует всегда иметь в виду, излучения каких компонент пламени измерены. Как правило, температура сажи совпадает с точностью до нескольких градусов с температурой окружающего

Рис. 10.3. Схема измерительного устройства по методу обращения линий [10.9]:

1 — эталонный излучатель; 2 — источник тока; 3 — переменное сопротивление; 4 — амперметр; 5 — линза; 6 — окрашенное пламя; 7 — горелка; 8 — диафрагма; 9 — спектрофотометр; 10 — фотоумножитель; 11 — самопишущий измерительный прибор



газа. При известных условиях температура сажи может, однако, значительно превосходить температуру газа из-за освобождения теплоты рекомбинации [10.9]. В случае несветящегося пламени измеряется температура окрашенных слоев методом обращения линий. Результат зависит от того, каким образом добавляется красящее вещество. Рекомендации на этот счет можно найти в работе [10.8]. Энергия излучения паров красящего вещества обуславливает понижение температуры пламени на несколько градусов.

В том случае, когда к пламени имеется доступ лишь с одной стороны, описанные выше способы неприменимы. Поскольку пламя является оптически достаточно плотным, можно измерять температуру пламени в видимой области спектра посредством яркостного пирометра с исчезающей нитью. Так как в этой спектральной области излучательная способность оптически толстого пламени примерно равна единице, действительная температура пламени лишь на несколько градусов превышает измеренную.

### 10.1.3. ЦВЕТОВАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Преимущество цветовой пирометрии состоит в том, что цветовая температура для серого излучателя ( $\epsilon(\lambda) = \text{const}$ ) независимо от значения излучательной способности равна его действительной температуре. Сажа в светящемся пламени имеет цветовую температуру [10.9], по которой, зная яркостную температуру и степень дисперсии сажи, можно рассчитать действительную температуру:

$$\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_s} = \frac{\lambda_e}{c_2} \left[ \ln(1 - e^{-D}) - \frac{nD}{e^D - 1} \right]; \quad (10.6a)$$

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_F} = \frac{\lambda_e}{c_2} \frac{nD}{e^D - 1}, \quad (10.66)$$

где  $D$  — оптическая толщина пламени, определенная из соотношения  $\alpha_{\lambda_e} = 1 - e^{-D}$ ;  $n$  — степень дисперсии сажи;  $\lambda_e$  — эффективная длина волны.

Уравнения (10.6а) и (10.6б) могут быть представлены в виде диаграммы (рис. 10.4), из которой можно определить действительную температуру. Для сажи большинства промышленных пламен для измерений принята эффективная длина волны  $\lambda_e = 0,58$  мкм [10.10].

Если известно отношение  $q$  энергетических яркостей пламени для двух близколежащих длин волн, то, используя закон Планка, можно рассчитать цветовую температуру  $T_r$  из соотношения [10.11]

$$q = \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \left[ \frac{c_2}{T_r} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] = \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \times \left[ \frac{c_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right]. \quad (10.7)$$

При сером излучении в рассматриваемой области длин волн цветовая температура  $T_r$  равна температуре  $T$ , что можно видеть из преобразования (10.7):

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_r} + \left[ c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right]^{-1} \ln \frac{\epsilon_{\lambda_2}}{\epsilon_{\lambda_1}}$$

[ср. с уравнением (9.27)].

В современных исследованиях для измерения температуры пламени используют технику телевидения [10.12]. С помощью чувствительной к инфракрасному излучению телекамеры получают телевизионное изображение пламени, яркость свечения которого пропорциональна энергетической яркости излучения пламени. Таким образом, может быть получено мгновенное распределение яркостных температур по поверхности пламени. Растровые системы обычной телевизионной аппаратуры дают разрешение примерно 320 000 световых точек на изображение.

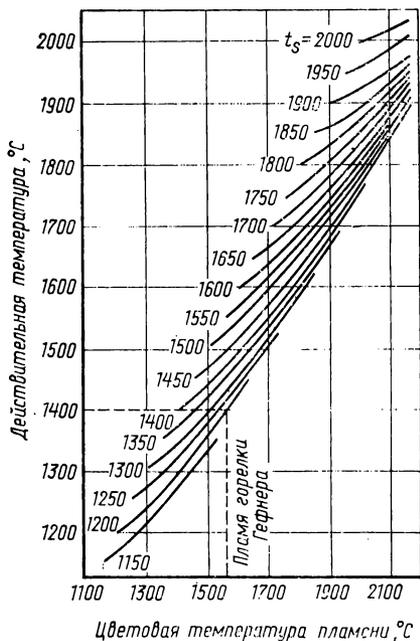


Рис. 10.4. Диаграмма для определения действительной температуры свящихся пламен в зависимости от цветовой и яркостной температур ( $\lambda_e = 0,58$  мкм)

лучают телевизионное изображение пламени, яркость свечения которого пропорциональна энергетической яркости излучения пламени. Таким образом, может быть получено мгновенное распределение яркостных температур по поверхности пламени. Растровые системы обычной телевизионной аппаратуры дают разрешение примерно 320 000 световых точек на изображение.

## 10.2. ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Один из недостатков измерений оптическими методами заключается в том, что с их помощью получают средние значения измеряемой величины вдоль оптической оси и нельзя точно определить, к какой точке пламени результаты относятся. В противоположность этому температурное поле может быть определено путем введения датчика в точно заданное место пламени.

Можно указать два основных способа определения локальной температуры в пламени:

- определение температуры помещенного в пламя твердого тела;
- отсасывающая термометрия (см. 8.1).

## 10.2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ

Один из простейших методов измерения температуры заключается в том, что вводят в пламя небольшой по размерам термоэлектрический термометр. Температура такого термометра может, однако, существенно (на 100—200° С) отличаться от температуры газа, так как она определяется из теплового баланса:

$$\Phi_k + \Phi_{kat} - \Phi_L - \Phi_{Str} = 0, \quad (10.8)$$

где  $\Phi_k$  — тепло, переданное от пламени к термометру через конвекцию;  $\Phi_{kat}$  — тепло каталитического горения на термоэлектродах термометра;  $\Phi_L$  — тепло, отведенное через термоэлектроды и соединительные провода;  $\Phi_{Str}$  — тепло, излучаемое термометром в окружающую среду.

Специальными мерами (см. ниже) стремятся обратить в нуль величины  $\Phi_{kat}$  и  $\Phi_L$ . Тогда уравнение (10.8) сведется к условиям уже рассмотренным в разделе 7.1 и потребуются только установить закономерности для  $\Phi_k$  и  $\Phi_{Str}$ .

Величина  $\Phi_{Str}$  зависит от температуры термоэлектродных проволок, пламени, стенок, а также от диаметра проволоки и излучательной способности участвующих в лучистом теплообмене элементов. Мысленно можно разложить  $\Phi_{Str}$  на две компоненты, соответствующие теплообмену излучением между проволокой и стенками печи.

Для конвекционного потока тепла  $\Phi_k$  исходное значение критерия Нуссельта зависит, помимо прочего, от диаметра проволоки.

Для соблюдения условий, заложенных в основу теории прохождения потока через цилиндр, диаметр рабочего саяа термопары термометра должен в возможно большей степени соответствовать диаметру термоэлектродной проволоки; соединительные провода должны быть расположены в направлении наименьшего температурного градиента. При соблюдении этих условий можно считать, что тепловой поток от рабочего саяа в подводящие провода пренебрежимо мал ( $\Phi_L \rightarrow 0$ ).

На основании изложенного выше можно рассчитать действительную температуру пламени по результатам измерений одним термометром. Обзор исследованных в этой области можно найти в работе [10.13]. Вследствие того, что формулы содержат величины, дающие добавочную информацию о пламени (скорость, излучательная способность и др.), получили развитие способы измерения температуры, основанные на зависимости между показаниями термометра и диаметра термоэлектродной проволоки: в определенное место пламени один за другим вводят два (или более) термометра с разной толщиной термоэлектродов и исходя из результатов измерений рассчитывают действительную температуру пламени. Некоторые из таких способов описаны в работе [10.13]. Согласно [10.14], имеем

$$T = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\sqrt{\frac{d_2}{d_1} \frac{T_2^4 - T_w^4}{T_1^4 - T_w^4} - 1}}, \quad (10.9)$$

где  $d$  — диаметр термоэлектродной проволоки; индекс «1» относится к тонкому термоэлектроду, индекс «2» — к толстому, индекс  $w$  — к стенке.

Этот, а также и большинство других методов с использованием двух термометров не учитывают обмена излучением между термометром и пламенем. Пренебрежение этим обменом в случае несветящегося пламени не приводит к большой погрешности измерения. В случае светящегося оптически толстого пламени обменом излучением между термоэлектродной проволокой и стенкой можно пренебречь по сравнению с обменом между термоэлектродной проволокой и пламенем. Вследствие сильной абсорбции пламени термометр «не видит» стенку. В этом случае применение уравнения (10.9) не приводит к полезным результатам. Естественно, что влияние излучения стенки или пламени зависит также и от места измерения.

При практическом применении метода двух термометров часто возникают погрешности измерения того же порядка, что и рассчитанные [дробь в уравнении (10.9)]. Поэтому автором предложено измерять температуру лишь одним,

возможно более тонким термоэлектрическим термометром, а поправку примерно оценивать из зависимостей, приведенных на рис. 10.5 [10.14, рис. 2]. Последовательность расчетов следующая. Из уравнения (10.8) имеем

$$\Phi_k = \alpha F_{Th} (T - T_1) \approx \bar{\sigma} \epsilon F_{Th} (T_1^4 - T_w^4) = \Phi_{Str},$$

где  $\bar{\epsilon}$  — излучательная способность;  $F_{Th}$  — поверхность термометра. После несложных преобразований получим

$$T \approx T_1 + K_{So} (T_1^4 - T_w^4). \quad (10.10)$$

Коэффициент  $K_{So}$  рассчитывается из уравнения (10.10) и рис. 10.5, который соответствует  $T_w = 300$  К (рис. 10.6 — зависимость коэффициента  $K_{So}$  от измеренной температуры). Действительная температура приблизительно дается уравнением (10.10), в которое вводятся измеренные значения  $T_1$  и  $T_w$  и значения  $K_{So}$ ,

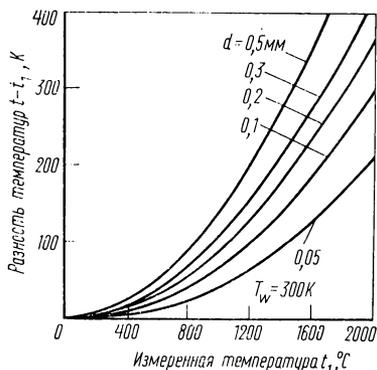


Рис. 10.5. Разность  $(t - t_1)$  между истинной и измеренной температурами при различных диаметрах  $d$  термоэлектродной проволоки в зависимости от измеренной температуры

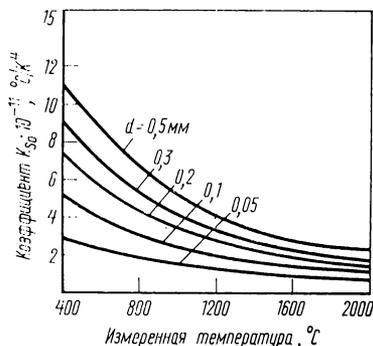


Рис. 10.6. Коэффициент  $K_{So}^*$  для расчета действительной температуры по уравнению (10.10) в зависимости от измеренной термоэлектрическим термометром температуры  $t_1$

определенные для данной  $T_1$  и диаметра проволоки  $d$ . Области применения приведены в работе [10.14].

Газовое пламя может быть окислительным и восстановительным; платиновые термометры ведут себя при горении водорода как катализаторы. Поэтому термоэлектродная проволока должна быть соответствующим образом защищена. При точных измерениях не следует применять керамических трубок из-за их большого диаметра и связанных с этим увеличенных потерь тепла на излучение. Из литературы известно использование защитных чехлов из кварца [10.9; 10.15] и смеси окиси бериллия с хлоридом иттрия [10.16]. Надежно защищает гексаметилдисилоксан, образуемый в результате осаждения на термометр окиси кремния  $\text{SiO}_2$  при температуре 1500—1600° С [10.17]. Однако кремний может при высоких температурах, особенно в восстановительной атмосфере, повлиять на т. э. д. с. термометры [10.18].

Вследствие своей массы термоэлектрические термометры при высокочастотных турбулентных колебаниях температуры пламени не могут точно за ними следовать и дают средние значения температуры, полученные интегрированием первой степени температуры по времени. При сравнении этих средних значений с температурами излучения по Шмидту и Курлбауму следует иметь в виду, что пирометр полного излучения интегрирует пропорционально  $T^4$ . Временные средние значения колеблющейся температуры при измерении пирометром излучения будут поэтому принципиально выше, чем при измерении термоэлектрическим термометром.

Возможность измерения колебаний температуры с помощью термоэлектрических термометров обсуждается в работе [10.19]. Расчет поведения термоэлектрических термометров во времени рассмотрен в работе [10.20].

## 10.2.2. ОТСАСЫВАЮЩИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Погрешности, связанные с теплообменом излучением, исключаются при применении отсасывающих термозондов (ср. 8.1.6). При их использовании для измерения температуры пламени следует иметь в виду два обстоятельства: процесс должен быть изокинетическим и имеется опасность последствия зонда.

Отсасывающие зонды предназначены для локальных измерений. Исследования [10.21] показали, что для достаточного подавления теплообмена излучением необходимо, чтобы скорость потока превосходила 150 м/с. Однако точные локальные измерения возможны лишь тогда, когда процесс изокинетический, т. е. отсос ведет со скоростью невозмущенного газа пламени [10.22].

При чересчур быстром отсосе и несимметричном профиле скоростей отсос из областей с малой скоростью идет интенсивнее, что приводит к ощутимому сдвигу температурного профиля. Эти погрешности можно уменьшить применением тонких заостренных отсасывающих трубок [10.22].

При отсосе распределенной в пламени горючей микросмеси могут возникнуть погрешности измерения температуры. Турбулентность, связанная с высокими скоростями потока в зонде, ведет к молекулярному перемешиванию компонентов и, таким образом, делает возможным дальнейшее сжигание смеси внутри зонда. Превышение измеряемой температуры над действительной может достичь 200 К.

На нарушения, возникающие из-за неправильных скоростей отсоса и изменения характеристик зондов, указывалось ранее. У краев пламени профили потоков и температур выравниваются и доля несгоревшего газа уменьшается.

Дальнейшие подробности и особые случаи измерения температуры пламен изложены в следующей литературе: [10.23, 10.24] — отсасывающие термометры; [10.25] — оптический и термоэлектрический методы; [10.26] — измерения с одним термоэлектрическим термометром; [10.27] — оптические методы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 10.1. *Schmidt, H.*: Prüfung der Strahlungsgesetze der Bunsenflamme. *Annalen d. Physik* 29 (1909), S. 971—1028.
- 10.2. *Mie, G.*: Beiträge zur Optik trüber Medien *Annalen d. Physik* 25 (1908), S. 377 ff.
- 10.3. *Hein, K.; Lowes, T.*: Beitrag zum Strahlungswarmübergang in feststoffbeladenen Gasströmen. *VDI—Ber.* 179 (1972), S. 13—18.
- 10.4. *Tietze, H.; Günther, R.*: Strahlungsmessungen an Gas- und Ölflecken. *VDI—Berichte* 211 (1973), S. 152—159.
- 10.5. *Thring, M. W. u. a.*: The radiation from turbulent jet diffusion flames of liquid fuel/coal gas mixtures. *J. Inst. Fuel* 29 (1956), S. 23—44.
- 10.6. *Kuribaum, F.*: Über eine einfache Methode, die Temperatur leuchtender Flammen zu bestimmen. *Phys. Z.* 3. Jg. Nr. 9 (1902).
- 10.7. *Féry, Ch.*: Thermométrie sur la température des flammés. *Comptes Rendus.* Vol. 137 (1903), S. 909.
- 10.8. *Russmann, H.*: Vergleich verschiedener Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Temperaturfelder in laminaren Vormischflammen. *Diss. TH Aachen*, 1967.
- 10.9. *Rößler, F.*: Optische Bestimmung der wahren Temperatur von leuchtenden Flammen. *Z. angew. Physik* 2 (1950), S. 161—166.
- 10.10. *Näser, G.; Pepperhoff, W.*: Optische Temperaturmessung an leuchtenden Flammen. *Arch. Eisenhüttenw.* 22 (1951), S. 9—14.
- 10.11. *Hill, W. E.*: Two-color pyrometry. In: *Temperature*, Vol. 3, part 2, Reinhold Publishing Corporation (1962), S. 419—423.
- 10.12. *Härtel, W.*: Flammenpyrometer auf der Basis der Fernsehtechnik. *VDI—Berichte* 211 (1973), S. 74—78.
- 10.13. *Kremer, H.; Rußmann, H.*: Beitrag zur Temperaturmessung in laminaren Vormischflammen mittels Thermoelementen. *VDI—Berichte* 146 (1970), S. 165—172.
- 10.14. *Fischer, S.*: Zur Messung hoher Temperaturen in strömenden Gasen mit Thermoelementen. *Die Technik*, 23. Jg. Heft 1, Januar 1968, S. 29—33.
- 10.15. *Kaskan, W. E.*: The dependence of flame temperature on mass burning velocity. 6. *Symp. (Int.) on Comb.* (1956), S. 134. *Reinhold Publ. Comp.*

- 10.16. *Kent, J. H.*: A non catalytic coating for platinum rhodium thermocouples. *Comb. and Flame* 14 (1970), S. 279—282.
- 10.17. *Cookson, R. A. u. a.*: Non catalytic coatings for thermocouples. *Comb. and Flame* 8 (1964), S. 168—170.
- 10.18. *Hougen, O. A.*; *Miller, B. L.*: Contamination of Thermocouples. *Chem. and Metall. Engineering* 29 (1923), No. 15, S. 662—663.
- 10.19. *Shepard, E.*; *Warshawsky, I.*: Electrical technique for compensation of thermal time lag of thermocouples and resistance thermometer elements. NACA Technical Note 2703 (1952).
- 10.20. *Hatami, R.*: Übertragungsverhalten von turbulenten Diffusionsflammen in Brennkammern. Diss. TH Karlsruhe (1973).
- 10.21. *Chédaille, J.*; *Braud, Y.*: Mesure des Températures. IFRF, Ijmuiden, Doc. Nr. K20/a/33; 4.7. 1966.
- 10.22. *Lenze, B.*: Probenentnahme und Analyse von Flammgasen. CIT, 42. Jg. Heft 5 (1970), S. 287—292.
- 10.23. *Bücker, H. W.*: Zur Meßtechnik des Industrieofens. VDI—Bildungswerk, BW 1953 (1972).
- 10.24. *Leuckel, W.*; *Chédaille, J.*: Temperaturmessung an Flammen. VDI—Bericht 112, Techn. Temperaturmessung, Düsseldorf (1966), S. 73—80.
- 10.25. *Thring, M. W.*; *Beer, J. M.*: Theory and practice of methods for measurement of temperatures for industrial-sized flames. IFRF Ijmuiden; Doc. Nr. K20/a/2; 15.2. 1962.
- 10.26. *Buhr, E.*; *Haupt, R.*: Ein Verfahren zur Messung von Temperaturen in Gasströmungen mit Thermoelementen. GWI 23 (1974), Nr. 9, s. 339—341.
- 10.27. *de Graaf, J. G. A.*: Die optische Bestimmung der Temperatur in Flammen. Ol-u. Gasfeuerung, Jg. 10 (1965), S. 36—43.

# 11. ТЕРМОГРАФИЯ

Человеческий глаз является чрезвычайно чувствительным органом, реагирующим на очень малую интенсивность света. К сожалению, его чувствительность ограничена узкой полосой спектра, соответствующей длинам волн 0,4—0,8 мкм. Постоянно на нас воздействующее, но не замечаемое нами излучение с большими длинами волн, называемое инфракрасным (ИК) излучением, несет важную информацию о химическом составе и физическом состоянии окружающих нас тел.

Поэтому уже вскоре после его открытия сэром Вильямом Хершелем в 1800 г. возникло стремление преобразовать это невидимое излучение в видимое. Спустя 40 лет его сыну, сэру Джону В. Хершелю, удалось с помощью тонких масляных пленок сделать видимым изображение в инфракрасных лучах. При поглощении тонкой масляной пленкой инфракрасного излучения происходит ее локальный разогрев, который вызывает изменение поверхностного натяжения и соответственно толщины пленки. Благодаря интерференции цвет пленки изменяется в соответствии с интенсивностью излучения. На этом принципе работал описанный в 1929 г. Черны [11.1] эвапорограф, с которого началось развитие современной термографии. Дальнейшим развитием эвапорографа с маслянопленочным детектором является прибор ночного видения «Паникон» фирмы «Gretag», Швейцария [11.2].

## 11.1. ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕРМОГРАФИИ

В настоящее время известен целый ряд приборов для ИК-термографии, в которых используются различные физические принципы [11.3].

### 11.1.1. ФОТОГРАФИЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

#### 11.1.1.1. ФОТОГРАФИЯ

Благодаря применению фотографии для наблюдения температурного поля впервые удалось зафиксировать и объективно оценить распределение температуры. Этот способ позволяет воспринимать температуры выше 800° С. Различная энергетическая яркость вызывает различное потемнение пленки, которое может быть оценено фотометрическими методами [11.4].

Удалось изготовить фотоэмульсию, чувствительную к коротковолновой части ИК-излучения с длиной волны до 1,3 мкм [11.5]. Уже в 1930 г. с помощью чувствительной к ИК-излучению фотопленки были получены фототермометрические снимки паропровода высокого давления с температурой до 350° С [11.6].

В последнее время ИК-фотография находит применение для атмосферных снимков и для исследований, в которых не требуется моментальная оценка.

#### 11.1.1.2. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Известные примерно с 30-х годов преобразователи изображения, работающие по принципу электронно-оптического усиления и визуализации фотоэлектронов, имеют спектральный диапазон чувствительности до длины волны 1,3 мкм [11.7]. С их помощью можно наблюдать распределение температур выше 400° С. Эти приборы используются в основном в сочетании с инфракрасными прожекторами в качестве активных приборов ночного видения.

## 11.1.2. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ

### 11.1.2.1. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ПРИЕМНЫЕ ТРУБКИ-ВИДИКОНЫ

Видикон — небольшая телевизионная приемная трубка с полупроводниковыми фоторезистивным слоем (фотоболометром), который сканируется пучком медленных электронов (рис. 11.1). В трубках, чувствительных к инфракрасному излучению, применяют пленки из окиси свинца или сульфида окиси свинца, чувствительные к излучению с длиной волны до 2 мкм. В необлучаемом состоянии полупроводниковый слой имеет очень высокое электросопротивление и принимает отрицательный потенциал катода.

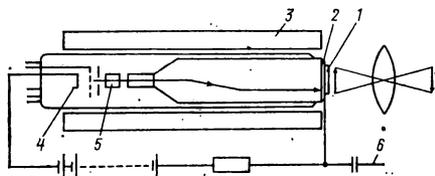


Рис. 11.1. Приемная телевизионная трубка—видикон:

1 — изображение в инфракрасных лучах; 2 — фоторезистивный слой; 3 — отклоняющая катушка; 4 — катод; 5 — электронная пушка; 6 — к усилителю

Сканирующий пучок электронов отталкивается отрицательным потенциалом и не попадает на слой. Когда на фоторезистивный слой падает ИК-излучение, он становится проводящим и принимает положительный по отношению к катоду потенциал. Сканирующий луч разряжает слой и возвращает его потенциал к потенциалу катода. Быстрая разрядка фоторезистивного слоя электронным лучом вызывает на обратной стороне слоя разрядный импульс, который воспринимается усилителем.

Большим преимуществом видиконов является то, что в период между двумя опросами электронного луча происходит интегрирование или запоминание зарядов, так как освещение фоторезистивного слоя во время сканирования не прекращается. Этим объясняется высокая чувствительность видиконов, которые поэтому называются также трубками с памятью изображения.

Чувствительная телекамера, снабженная чувствительным к ИК-излучению видиконом, делает возможным наблюдение поверхностных температур примерно до 250° С [11.8].

### 11.1.2.2. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВИЗОРЫ

Многообещающей новой разработкой в области телевизионных приемных трубок для инфракрасного излучения в широком спектральном диапазоне является пироэлектрический тепловизор, известный под названиями пиротрон [11.9], пирикон [11.10] или пироэлектрический видикон [11.11].

Этот прибор представляет собой видикон, у которого фоторезисторный слой заменен сканируемой поверхностью пироэлектрического кристалла ТГС (триглицинсульфата).

Спектральная чувствительность трубки ограничена только пропускающей способностью оптики и простирается далеко в инфракрасную область вплоть до  $\lambda = 40$  мкм (см. раздел 9.7.3.2.2.3).

В настоящее время только технологические трудности препятствуют широкому применению пироэлектрических тепловизоров.

### 11.1.2.3. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Все предлагаемые в настоящее время для промышленного применения ИК-камеры для создания видимого изображения распределения температуры снабжены оптико-механическими системами развертки, как в ранний период развития телевидения [11.12]. Развертка изображения осуществляется остроумными системами вращающихся или колеблющихся зеркал или призм, которые последовательно разлагают изображение в ряд точек. Эти точки изображения воспринимаются

дискретным детектором, электрический сигнал которого пропорционален яркости точки. Сигнал после усиления синхронно с разверткой создает на экране электронно-лучевой трубки или на фотопластинке изображение, воспринимаемое человеческим глазом.

Постоянная времени детектора ограничивает скорость развертки и вместе с тем частоту кадров и число точек изображения. Качество изображения на экране обычного размера ИК-камеры может считаться удовлетворительным, если оно содержит не менее 10 000 отдельных элементов. Вместе с тем ясно, что частота кадров камеры не может быть выбрана как угодно большой.

Изготавливают ИК-камеры с неохлаждаемыми термическими детекторами [11.13]; отличаются они равномерной спектральной чувствительностью в широком инфракрасном диапазоне длин волн. Однако их постоянная времени сравнительно велика, так что для развертки одного изображения требуется по меньшей мере 30 с. При такой скорости развертки изображение невозможно наблюдать непосредственно на экране, необходимо использовать фотографический метод.

Поэтому преимущественно используют фотоэлектрические детекторы из антимонида индия, охлаждаемые жидким азотом до  $-196^{\circ}\text{C}$  ( $77\text{ K}$ ). Одно наполнения сосуда Дьюара жидким азотом хватает для работы в течение 4 ч. Спектральная чувствительность этих детекторов простирается до граничной длины волны около 5,5 мкм. Постоянная времени составляет только 1 мкс, так что в зависимости от необходимого геометрического разрешения может быть реализована частота кадров от 0,5 до 60 Гц. Благодаря этому возможно непосредственное наблюдение и оценка изображения на светящемся экране (см. 9.7.3.2.3.2.1; табл. 9.9).

Улучшение геометрического разрешения изображения или повышение частоты кадров может быть достигнуто применением нескольких детекторов, соединенных в одну строку или детекторную матрицу [11.14]. При этом, конечно, возрастают затраты на точную балансировку детекторных элементов и соответствующих усилителей.

Обычно усиленный сигнал детектора используют для модуляции интенсивности электронного луча трубки, т. е. для управления яркостью светящейся точки на экране. Области объекта с более высокой температурой на экране выглядят более светлыми, с низкой температурой — более темными.

Так как различение оттенков черно-белого изображения часто затруднительно, все ИК-камеры дают возможность выделять области равной температуры, т. е. изотермы. Это достигается с помощью электроники благодаря тому, что усиливаются и дают изображение на экране только сигналы определенной, устанавливаемой с помощью регулятора, величины. Все остальные сигналы, соответствующие более низкой или более высокой температуре, подавляются. Регуляторы, имеющие точную шкалу и позволяющие осуществлять тонкую регулировку, делают возможным непрерывный сдвиг изотерм внутри выбранного диапазона. Таким образом, могут быть последовательно получены изотермы, соответствующие различным температурам.

Нагляден и изящен метод преобразования инфракрасного изображения в видимое цветное изображение. Были проведены эксперименты, в которых отдельные инфракрасные диапазоны длин волн преобразовывались в определенные цвета видимого спектра [11.15]. Результаты, однако, оказались разочаровывающими из-за низкой контрастности получаемого изображения, за исключением известной квазицветной фотографии в ближнем ИК-диапазоне. Поэтому принято преобразовывать в различные видимые цвета инфракрасное излучение с различной энергетической яркостью, но с одинаковым спектральным распределением.

Очень просто можно получить цветное изображение распределения температуры путем фотографирования различных изотерм с экрана ИК-камеры. Для каждой изотерма фотографируется через отдельный цветной светофильтр и все снимки накладываются на один кадр цветной фотопленки. На фотоснимке можно различить до восьми изотерм, представленных различными цветами.

Кроме того, непосредственное преобразование ИК-изображения в цветное, содержащее до 10 цветовых оттенков, возможно на некоторых моделях ИК-камер при подключении дополнительного цветового монитора.

## 11.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ИК-КАМЕР

Поток электромагнитного излучения каждого тела  $\Phi$  ( $W$ ) является функцией его температуры  $T$ , излучательной способности  $\epsilon$ , длины волны излучения  $\lambda$  и температуры окружающего пространства  $T_u$ :

$$\Phi = f(T, \epsilon, \lambda, T_u). \quad (11.1)$$

Выходной сигнал  $S_A$  детектора ИК-камеры пропорционален потоку падающего на него излучения  $\Phi$ . В диапазоне длин волн, определяемом спектральной чувствительностью ИК-камеры, выходной сигнал детектора может быть рассчитан из общего уравнения пирометрии излучения [см. уравнение (9.36e)]:

$$S_A = \epsilon S + (1 - \epsilon) S_u. \quad (11.2)$$

В отличие от обычных пирометров излучения ИК-камеры чаще всего не позволяют производить непосредственный отсчет выходного напряжения  $S_A$ . Однако с помощью регулятора для установки изотерм, снабженного точной шкалой, можно достаточно точно определять разность выходных напряжений при визировании двух различных точек объекта. Поэтому, измеряя последовательно величину выходного сигнала при визировании объекта и какого-либо эталона с известными температурой и излучательной способностью, можно точно определить абсолютную температуру измеряемого объекта.

Если действительная температура объекта  $T_1$  и излучательная способность  $\epsilon_1$ , а температура и излучательная способность эталона соответственно  $T_2$  и  $\epsilon_2$ , то разность выходных напряжений равна

$$\Delta S_A = \epsilon_1 S_1 + (1 - \epsilon_1) S_u - [\epsilon_2 S_2 + (1 - \epsilon_2) S_u], \quad (11.3)$$

откуда следует

$$\Delta S_A = \epsilon_1 (S_1 - S_u) - \epsilon_2 (S_2 - S_u). \quad (11.4)$$

На практике часто требуется определить распределение температуры на поверхности объекта. Если известна температура какого-либо участка поверхности объекта, например измерена с помощью обычного пирометра излучения, то этот участок можно использовать в качестве эталона. Так как излучательную способность поверхности объекта в большинстве случаев можно считать постоянной, т. е.  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ , то уравнение (11.4) упрощается:

$$\Delta S_A = \epsilon (S_1 - S_2). \quad (11.5)$$

При таком измерении результат не зависит от температуры окружающего пространства  $T_u$ . При известной излучательной способности разность температур  $\Delta T = T_1 - T_2$  может быть быстро и удобно определена с помощью экспериментально построенной градуировочной кривой или номограммы по измеренной разности выходных сигналов для изотерм  $\Delta S_A$ .

В качестве примера можно привести распределение температуры на фасаде жилого дома (рис. 11.2). Черно-белый снимок на рис. 11.3 дает общее представление о распределении температуры. На фоне равномерно нагретой стены ясно различим ряд мест с более высокой температурой, так называемых тепловых течей. Для количественной оценки распределения температуры установлены изотерма наиболее теплых мест (рис. 11.4) и с помощью пирометра излучения определена температура одного из таких мест ( $20,5^\circ \text{C}$ ).

Для съемок выбран диапазон температур 5 (верхняя шкала) при положении изотермы  $+0,8$  делений (нижняя шкала). Из номограммы для данной камеры с учетом кажущейся излучательной способности кирпичной кладки  $\epsilon = 0,8$  при расстоянии до объекта более 5 м определяем, что  $0,1$  деления разности изотерм соответствует  $1,0 \text{ K}$ .

На рис. 11.5 показана та же самая стена при установке изотермы на деление  $+0,45$ . Разность температур между участками, изображенными на рис. 11.4 и 11.5, равна  $3,5 \cdot 1 \text{ K} = 3,5 \text{ K}$ , т. е. температура участков, показанных на рис. 11.5,

Рис. 11.2. Фотография одноквартирного дома

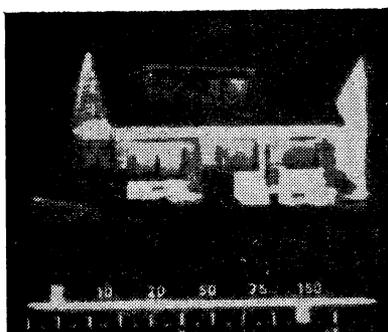
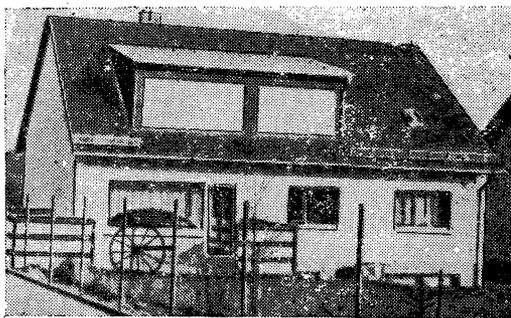


Рис. 11.3. Тепловая картина того же дома в черно-белых тонах

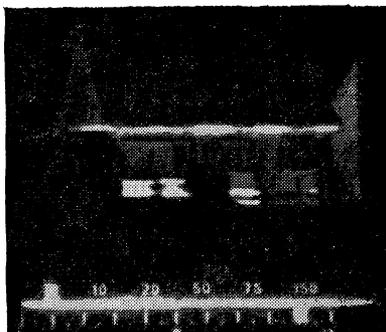


Рис. 11.4. Изотермы наиболее теплых мест того же дома. Положение изотермы  $+0,8$  деления шкалы, соответствующее  $20,5^{\circ}\text{C}$

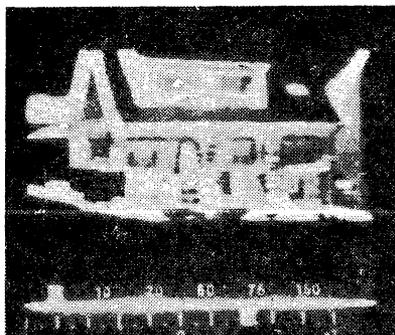


Рис. 11.5. Изотерма средних температур того же дома. Положение изотермы,  $+0,45$  деления шкалы, соответствующее  $17^{\circ}\text{C}$



Рис. 11.6. Изотерма наиболее холодного места крыши того же дома. Положение изотермы  $-0,25$  деления шкалы, соответствующее  $10^{\circ}\text{C}$

равна  $17^{\circ}\text{C}$ . Изотерма на рис. 11.6 соответствует наиболее холодным участкам фасада дома.

Калибровка дает отсчет  $-0,25$  деления, т. е. разницу в  $-1,05$  или  $-10,5$  по сравнению с рис. 11.4. Следовательно, изотерма рис. 11.6 соответствует температуре  $20,5 - 10,5 = 10^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, из приведенного примера ясно, что с помощью последовательной съемки изотерм можно определить действительную температуру и ее распределение по поверхности измеряемого объекта.

### 11.3. МОДЕЛИ ИК-КАМЕР

В табл. 11.1 приведены, по данным изготовителей, технические характеристики наиболее известных ИК-камер, выпускаемых в промышленном масштабе в последнее время. Данные табл. 11.1 не претендуют на полноту и не содержат сведений о дополнительных приспособлениях для решения специальных задач.

Спектральный диапазон чувствительности камеры, как было указано выше, определяется в первую очередь типом применяемого детектора.

Параметры оптической системы определяют поле зрения камеры. Оптика выполняется в виде системы зеркал или линз из специальных материалов, пропускающих инфракрасное излучение, таких как германий и кремний. Благодаря наличию сменных объективов с различным фокусным расстоянием возможно согласование поля зрения с задачами измерения.

Частота кадров изображения является критерием пригодности камеры для наблюдения стационарных температурных полей или динамики тепловых процессов. Частота кадров всех известных в настоящее время камер недостаточна для наблюдения быстро движущихся объектов.

Как уже указывалось, частота кадров тесно связана через постоянную времени детектора с достижимым геометрическим разрешением ИК-камеры. Число ячеек изображения является наглядным критерием величины минимально различимых деталей изображения. 100 ячеек для квадратного изображения при современном уровне техники представляют нижнюю границу приемлемого качества изображения.

Температурное разрешение обычно характеризуется минимальной определяемой разностью температур  $\Delta T_{\min}$  черного излучающего тела ( $\epsilon = 1$ ) при комнатной температуре ( $25^{\circ}\text{C}$ ) [см. уравнение (9.44)]. Температурное разрешение соответствует такой разности температур, которая вызывает на детекторе сигнал, равный по величине собственным шумам камеры. Поэтому его называют разностью температур, эквивалентной шумам, NETD. Величина  $\Delta T_{\min} \approx \text{NETD}$  связана с удельной избирательностью  $D^*$  и эквивалентной мощностью рассеянного излучения  $\text{NEP} = \sqrt{A}/D^*$  (см. раздел 9.7.3.2.1.2).

Масса комплекта камер с блоком воспроизведения характеризует мобильность камеры и ее эксплуатационные возможности.

Наиболее совершенна и пригодна для разнообразного применения камера системы AGA — термовизиян 680. Последняя разработка этой системы — переносная камера AGA — термовизиян 750 с питанием от батареек.

Кроме описанных камер, предназначенных для снимков с расстояния от 20 см до бесконечности, существуют камеры с микроскопной оптикой, позволяющие получать увеличенное изображение от очень малых объектов. Сменные объективы позволяют изменять увеличение в широких пределах. Сопоставление трех наиболее известных инфракрасных микроскопов, дающих наглядное изображение распределения температуры, дано в табл. 11.2.

### 11.4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

ИК-камеры в последние годы нашли применение в медицине для ранней диагностики рака легких, для оценки степени ожогов и обморожений, при исследовании воспалительных процессов и кровоизлияний, для изучения кро-

Т а б л и ц а 11.1  
Инфракрасные камеры

Тип	Детектор	Область спектра, $\mu\text{м}$	Поле зрения	Частота кадров	Число строк	Разре- шение по темпе- ратуре, $^{\circ}\text{C}$	Масса, кг
Варнес М1В	Термисторный боло- метр без охлаждения	2—16	$10 \times 15^{\circ}$ или $10 \times 20^{\circ}$	90 с/изображение или 180 с/изображение	90	0,1	227
Варнес Т-6	Пирозлектрический без охлаждения	1,8—15	$10 \times 10^{\circ}$	30 с/изображение	100	0,1	21,7
АСА Термовизин 680	InSb, охлаждение	2—5,6	$10 \times 10^{\circ}$ , дополнитель- ная оптика $8 \times 8^{\circ}$ , $25 \times 25^{\circ}$ , $45 \times 45^{\circ}$ , $20 \times 20^{\circ}$ ;	16 Гц	210 (через стро- ку) 1600 Гц	-0,2	37,2
АСА Термовизин 750	То же	2—5,6	дополнитель- ная оптика $7 \times 7^{\circ}$	25 Гц	280 (через стро- ку) 2500 Гц	0,2	9,5 *
Вовфс IRCD-3	»	1—5,5	$12,5 \times 25^{\circ}$ или $12,5 \times 12,5^{\circ}$	3,3 или 2 Гц	95	0,1	41
ЕМ1 Термоскэн	»	3—5,5	$21 \times 8^{\circ}$	0,5 или 2 Гц	100	0,2	34,4
Дайнарэд, модель 200	»	2—5,4	$10 \times 10^{\circ}$	60 или 30 Гц, 15 Гц	25 100	0,3	17,6
Rank Thermographic System	10 элементов InSb, Охлаждение азотом	2—5,5	$28 \times 34^{\circ}$	46 Гц	200, 400 170	0,2	44

\* С батареями.

Т а б л и ц а 11.2

**Инфракрасные камеры с микроскопной оптикой**

Тип	Детектор	Область спектра, мкм	Увеличение объектива
Barnes RU-50	InSb, азотное охлаждение	1,8—5,5	100 40 10 3
AGA Термовизиян 680 с микрорисставкой	InSb, азотное охлаждение	2—5,6	125 50 15
Eltro Микротермоскоп D20-1	InSb, азотное охлаждение	1—5,5	36 15

веносной системы и в разнообразных клинических исследованиях [11.16; 11.17, 11.18].

Хотя в настоящее время большие потенциальные возможности применения ИК-камер в исследованиях и в промышленности вообще не раскрыты, эти камеры уже успели зарекомендовать себя в разнообразных технологических процессах.

С большим успехом ИК-камеры были применены для проверки теплоизоляции зданий [11.19]. Дефекты теплоизоляции на оштукатуренных фасадах и внутренних стенах незаметны для невооруженного глаза. Изображение здания в ИК-излучении позволяет легко выявить места с недостаточной теплоизоляцией, температура которых часто значительно отличается от температуры окружающего пространства (см. раздел 11.2).

Очень эффективными оказались ИК-камеры для выявления перегретых контактов высоковольтных переключателей и изоляторов в энергосиловых установках, а также при поиске мест повреждений в электрических сетях [11.20].

При изготовлении электронных схем встречаются дефекты, обнаружение которых при обычных функциональных испытаниях невозможно. Например, плохой контакт, некачественное соединение элементов схемы или нарушение сплошности металлизированных слоев, как правило, не вызывают нарушений функционирования схемы при испытаниях, однако при длительной эксплуатации в результате повышенного тепловыделения могут привести к выходу схемы из строя. Контроль температурного поля электронных схем с помощью ИК-камер позволяет обнаружить подобные дефекты на стадии изготовления [11.21].

Интересной областью применения ИК-камер являются геологические и климатические температурные исследования земной поверхности [11.22, 11.23], которые приобретают особую актуальность в рамках мероприятий по защите окружающей среды [11.24].

Тепловые снимки с борта вертолета или самолета позволяют быстро получить надежные данные о распределении температуры на обширных площадях, что невозможно при использовании обычных методов.

В космической технике ИК-камеры применяются для исследования теплового баланса моделей искусственных спутников [11.25] и исследования ракет в сверхзвуковых аэродинамических трубах.

В обширной области исследования материалов в первую очередь следует упомянуть о применении ИК-камер для изучения тепловых процессов при электрическом пробое изоляционных материалов [11.26]. Быстрое изменение температуры и малая теплоемкость материала совершенно исключают возможность измерений с помощью контактных термометров.

Поле зрения, мм	Геометрическое разрешение, мкм	Частота кадров, Гц	Число строк	Разрешение по температуре, К	Масса, кг
0,64×0,65	10	1	64	0,1	40,8
1,63×1,63	25	или	128	0,15	
6,4×6,4	100				0,5
25×25	10	16	(через строку) 1600 Гц	0,15	
0,65×0,65					30
1,6×1,6	100	1	100 Гц	1 (при 100° С)	~30
6×6	10				
∅ 0,5	25	или	0,33		
∅ 1,2					

В производстве синтетических материалов контроль и поддержание теплового режима процессов имеют решающее значение для качества продукции. Необходимость определения распределения температуры в инструменте, экструдированной пленке при прохождении ее через охлаждающие валки и разглаживающие каландры в процессе производства, в прессованных изделиях и резиновых профилях предоставляет широкие возможности для использования ИК-камер [11.27].

В металлургической промышленности ИК-камеры служат эффективным средством термографического контроля доменных печей, конвертеров и определения износа фурм горячего дутья [11.28].

Термография с помощью ИК-камер — ценное и интересное дополнение к обычным методам измерения температуры в исследованиях и промышленности. Особенно перспективным представляется возможность постоянного наблюдения и регистрации температурно-зависимых процессов на обширных площадях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 11.1. Czerny, M.: Über Photographie im Ultraroten. Z. Phys. 53 (1929), S. 1—12.
- 11.2. Horch, P. M.: Sichtbare Wärmestrahlung. Elektrizitätsverwertung, Zürich 49 (1974), 4, S. 112—117.
- 11.3. Wormser, E. M.: Sensing the invisible world. Applied Optics, 7 (1968), 9, S. 1667—1672.
- 11.4. Gulthmann, K.: Entwicklung und Stand der metallurgischen Meßtechnik des Auslandes in den letzten zehn Jahren. Stahl u. Eisen 69 (1949), I, S. 8—19.
- 11.5. Infrared and ultraviolet photography. Veröffentlichung Nr. M—3 der Eastman Kodak Co. Rochester, N. Y. (1961).
- 11.6. Hencky, K.; Neubert, P.: Die Photographie von temperaturstrahlenden Körpern als Grundlage einer Photothermometrie. Naturwiss. 18 (1930), S. 392—393.
- 11.7. Klein, M. W.: Image converters and intensifiers for military and scientific use. Proc. IRE 47 (1959), S. 904.
- 11.8. Heimann, W.: Sehen im ultravioletten und ultraroten Licht. Umschau 6U (1961), 16, S. 484—487.
- 11.9. Steinhage, P. W.: Pyroelektrische Strahlungsempfänger und Thermografiesysteme. Interne Veröffentlichung der Heimann GmbH, Wiesbaden (1971).
- 11.10. Datenblatt der Thomson—CSF Elektronenröhren GmbH, Frankfurt am Main (1974).
- 11.11. Watton, R., et. al.: Performance of the pyroelectric vidicon for thermal imaging in the 8—14 micron band. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED—21 (1974), 8, S. 462—469.
- 11.12. Dreier, H.; Jäger, J.; Kunz, H.: Infrarot Aufzeichnung von Temperaturfeldern. VDI—Vericht Technische Temperaturmessung, Nr. 198, Düsseldorf (1973), S. 71—80.
- 11.13. Astheimer, R. W.; Schwarz, F.: Thermal imaging using pyroelectric detectors. Applied Optics 7 (1968), 9, S. 1687—1695.
- 11.14. Heftman, G.: A multiple sensor thermographic imaging system. IERE Conference Proc., University of Reading 22 (1971), 9, S. 321—327.

- 11.15. *Nichols, L. W.; Lamar, J.*: Conversion of infrared images to visible in color. *Applied Optics* 7 (1968), 9, S. 1757—1762.
- 11.16. Thermography and its clinical applications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 121, Art. 1 (1964), S. 1—304.
- 11.17. *Barnes, R. B.*: Diagnostic thermography. *Applied Optics* 7 (1968), 9, S. 1673—1685.
- 11.18. *Ganssen, A.*: Medizinische Thermographie. *Röntgenpraxis* 24 (1971), 5, S. 97—109.
- 11.19. *Edingshaus, L.*: Wärmefotos, Infrarotkamera zur Lokalisierung von Bauschäden. *Der Deutsche Baumeister* BdB 35 (1974), 8, S. 558—559.
- 11.20. *Waring, R. H.; Sage, I. E.*: The use of infrared cameras mounted in a helicopter for the detection of overheating transmission line joints and fittings. Transmission Department, South Western Region, C. E. G. B., Bristol, März 1970.
- 11.21. *Griffin, D. D.*: Infrared techniques for measuring temperature and related phenomena of microcircuits. *Applied Optics* 7 (1968), 9, S. 1749—1756.
- 11.22. *Blythe, R., Kurath, E.*: Infrared images of natural subjects. *Applied Optics* 7 (1968), 9, S. 1769—1777.
- 11.23. *Adams, Wm., et. al.*: Coastal and urban surveys with ir. *Photogrammetric Engineering* 36 (1970), 2, S. 173—180.
- 11.24. *Glück, F., Lorenz, D.; Miosga, G.*: Wärmebilder und Registrierung der Bodenoberflächentemperatur in der Region Untermain. Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfur am Main, Arbeitsbericht 1970, 2, Auflage S. 12—15.
- 11.25. *Janes, M.; Aalders, B. G. M.*: Über die Verwendung einer Infrarot—Kamera zur Lösung spezieller Probleme in der Raumfahrttechnik. *Raumfahrtforschung* 13 (1969), 1, S. 5—11.
- 11.26. *Winkelkemper, H., Kalkner, W.*: Untersuchungen über den Temperaturanstieg vor dem Durchschlag in festen polymere Isolierstoffe, ETZ—A 95 (1974), 4, S. 261—265.
- 11.27. *Hensel, H.*: Berührungslose Messung installationärer Temperaturfelder in der Kunststofftechnik mit Hilfe einer Ultrarot—Thermovisionskamera. *Gummi Asbest Kunststoffe* 25 (1973), 4, S. 264—270.
- 11.28. *Johannson, R.*: Die Verwendung der AGA Thermovision für quantitative Beurteilung des Verschleißes der feuerfesten Ausmauerung in gewissen Öfen und Pfannen. Interner Applikationsbericht der AGA AB, 74-01-05 EIMB (1974).

## **12. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР**

### **12.1. РАЗГРАНИЧЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ**

Область сверхвысоких температур начинается примерно с 5000 К — температуры, при которой при нормальном давлении не существует твердых или жидких тел, а все вещества переходят в газообразное состояние. Эта температурная граница является наивысшей температурой, которая может быть достигнута за счет тепловыделения при химических реакциях в газах и парах. При температуре около 4000 К в газах происходят принципиальные изменения. Химические связи разрушаются и образующиеся свободные атомы с повышением температуры постепенно теряют свои электроны.

При сверхвысокой температуре могут начаться реакции между оставшимися ядрами атомов. Сверху область сверхвысоких температур не ограничена. Исследование области сверхвысоких температур является задачей физики плазмы.

#### **12.1.1. ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ**

К нижней области сверхвысоких температур (от 5000 до 10 000 К) относятся температуры слаботочной электрической дуги, газоразрядной лампы, сварочной дуги в воздухе или защитном газе и ударных волн. При возвращении космических ракет в земную атмосферу температура на их тепловом щите поднимается примерно до  $10^4$  К.

В стационарных электрических дугах и сверхзвуковых потоках плазмы температура достигает  $10^6$  К. При кратковременных электрических разрядах (пинч, фокус плазмы) температуру оценивают величиной порядка  $10^8$  К.

Такие же сверхвысокие температуры имеют место при ядерных реакциях внутри солнца и звезд. Еще более высокие температуры возникают при неуправляемых термоядерных реакциях (водородная бомба).

#### **12.1.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ**

Описанные в гл. 9 методы измерений с помощью пирометров излучения могут применяться для измерения температур примерно до 4000 К. Если при этих температурах излучение вызвано в основном колебаниями атомов в кристаллической решетке твердых тел или колебательным и вращательным движением молекул газов, то при более высоких температурах действуют другие механизмы излучения, на которых основаны многообразные методы измерения температуры (см. 12.2.2). Основная часть методов измерения сверхвысоких температур связана со спектроскопией плазмы. Точность методов определяется погрешностями эталонов излучения, применяемых для градуировки и поверки. В качестве эталонного излучателя используют главным образом анодное фокусное пятно слаботочной дуги с максимально достижимой для твердого графита температурой сублимации, приблизительно равной 4000 К [12.1, 12.2]. Температура, полученная из абсолютного измерения спектральной энергетической яркости (см. 12.4.2), несмотря на большую предельную погрешность эталона излучения, составляющую около  $\pm 5\%$ , может быть определена с точностью не хуже 1%, так как спектральная энергетическая яркость в нижней области высоких температур экспоненциально зависит от температуры (см. далее рис. 12.3).

Величина, определяемая ДИН 5496 «Температурное излучение» как спектральная энергетическая яркость, в физике плазмы и в астрофизике называется

спектральной интенсивностью излучения или интенсивностью излучения, отнесенной к единице длины волны или частоты [12.3].

Кроме описанных выше пассивных методов измерения, при которых процесс измерения не воздействует на измеряемую величину, можно облучать измеряемую плазму внешним электромагнитным излучением и использовать для определения температуры характеристики поглощения, преломления и рассеяния этого излучения плазмой. Влиянием внешнего излучения на плазму не всегда можно пренебречь. Прежде чем рассматривать отдельные методы, целесообразно определить собственно измеряемую величину — температуру и связанное с ней понятие термодинамического равновесия.

## 12.2. ТЕМПЕРАТУРА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

### 12.2.1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Термодинамическое состояние замкнутой системы (газа, плазмы) зависит, кроме объема и давления, от параметра состояния, называемого температурой. Опыт показывает, что эти параметры состояния замкнутой системы в отсутствие в течение длительного времени внешних возмущений принимают постоянные значения, т. е. приходят в равновесие. Если равновесную систему привести во взаимодействие с другой равновесной системой, имеющей параметры состояния, отличные от первой, то параметры состояния изменятся. Энергия из системы с большим энергосодержанием будет переходить в систему с меньшим энергосодержанием (тепловой поток) до тех пор, пока через достаточно длительное время обе системы не примут новое состояние равновесия. Параметром состояния, при котором может установиться новое равновесие, является общая для всех видов частиц первоначально разделенных систем температура.

### 12.2.2. ТИПЫ ЧАСТИЦ И ИХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ

Рассмотрим плазму, состоящую в основном из следующих частиц: молекул, атомов, положительных ионов и электронов.

#### *Молекулы*

Молекулы состоят из двух или нескольких атомов, вращающихся вокруг общего центра тяжести. Любое изменение этого вращения приводит к излучению

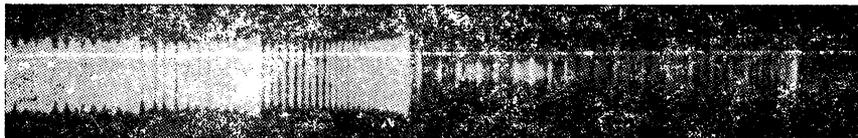


Рис. 12.1. Полосчатый (многолинейчатый) спектр. Слева: полосы молекул азота. Справа: полосы молекул циана (CN). По Г. Мэкеру [12.4]

или поглощению энергии и появлению или исчезновению линии в длинноволновой инфракрасной области спектра. Интенсивность этих спектральных линий вращения связана с *температурой вращения*. Атомы молекулы могут одновременно

колебаться относительно друг друга и генерировать излучение, линии которого расположены в ближней инфракрасной области. Эти колебательные линии из-за вращения молекулы расщепляются на систему линий, так называемую полосу (рис. 12.1). Интенсивность линий колебания зависит от *температуры колебаний*. Кроме того, молекулы, как и атомы, могут переходить в возбужденное электронное состояние, т. е. они в этом случае состоят из более или менее возбужденных атомов. При переходе из возбужденного в нормальное состояние молекулы излучают, вследствие чего в спектре возникают линии в видимой и ультрафиолетовой его областях; из-за осцилляции и вращения молекул эти линии образуют квазинепрерывную систему линий, являющуюся наложением нескольких полос. Интенсивность линий электронного возбуждения связана с температурой возбужденных электронных состояний.

При достаточно высокой температуре молекулы диссоциируют на атомы, причем этот процесс описывается *температурой диссоциации*.

### *Атомы*

Атомы состоят из положительно заряженного ядра и электронов, которые в атомной модели Бора вращаются вокруг ядра на устойчивых орбитах. Электроны могут переходить только с одной орбиты на другую (из одного энергетического состояния в другое) и излучать при этом электромагнитную энергию, вследствие чего возникают спектральные линии, распределенные по всему спектру. Интенсивность этих спектральных линий связана с *температурой возбуждения* энергетических состояний атома. При достаточно высокой температуре энергия возбуждения валентных электронов может быть такой большой, что превысит энергию связи с атомом и электроны станут свободными (ионизация). В результате атом превращается в положительный ион, т. е. в атом, несущий положительный заряд из-за недостатка электронов. Это равновесное состояние ионизации описывается *температурой ионизации*. Газ, в котором сосуществуют свободные электроны и положительно заряженные ионы, называется *плазмой*.

### *Положительные ионы*

Возбуждение и ионизация положительных ионов происходят так же, как и атомов. Оставшиеся вблизи ядра электроны могут снова переходить в дискретные возбужденные состояния и излучать, создавая спектральные линии, интенсивность которых связана с *температурой возбуждения*. При очень высокой энергии возбуждения положительные ионы ионизируются еще раз, т. е. от атома отщепляется и становится свободным второй электрон, и в результате возникает дважды ионизированная частица. Двукратная ионизация также характеризуется *температурой ионизации*. Принципиально возможно столько степеней ионизации, сколько электронов содержит атом.

### *Электроны*

Свободные электроны в плазме притягиваются положительно заряженными ионами и могут снова рекомбинировать в нейтральный атом. Так как электроны обладают энергией, соответствующей их кинетической энергии, при рекомбинации, помимо энергии ионизации, освобождается кинетическая энергия электронов. Эта энергия может передаваться другим частицам или излучаться, при этом возникает непрерывный спектр (рекомбинированный или свободно связанный континуум). При пролете электронов мимо положительных ионов их траектории из-за притяжения искривляются, в результате их кинетическая энергия уменьшается. Энергия, теряемая при искривлении траектории, излучается, при этом та же возникает непрерывный спектр (свободный — свободный континуум). Интенсивность непрерывного спектра описывается через *электронную температуру*.

### 12.2.3. ПРЕДПОСЫЛКИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

#### *Равновесие степеней свободы частиц*

Термодинамическое равновесие требует такой жесткой связи различных степеней свободы определенных частиц, что все степени свободы могут быть описаны единой температурой частиц. Следовательно, температуры вращений, колебаний и температура электронного возбуждения молекул связаны таким образом, что все они вместе с температурой диссоциации могут быть описаны одной молекулярной температурой. Для описания состояния атомов и положительных ионов требуется единая температура возбуждения и ионизации, температура атомов и ионов. Эти требования выполняются тогда и только тогда, когда заняты все энергетические уровни рассматриваемой термодинамической системы по Больцману. Для частиц, возникающих при диссоциации молекул, должен выполняться закон действующих масс. Отношение числа частиц, возникающих при ионизации, к числу исходных частиц описывается уравнением Саха [см. уравнение (12.8)].

#### *Взаимное равновесие различных частиц*

Частицы различных типов и их термодинамические параметры (молекулярная температура, атомная и ионная температура, электронная температура) должны находиться в равновесии между собой. Первые три температуры тесно связаны и относятся к температуре тяжелых частиц или температуре газа. Все частицы вместе должны иметь общую температуру плазмы. Распределение скоростей всех частиц должно описываться по Максвеллу с помощью этой температуры (распределение Максвелла).

#### *Равновесие излучения*

Электромагнитное излучение, создаваемое и поглощаемое различными частицами плазмы, должно находиться в равновесии с температурой плазмы и описываться законом излучения Планка. Количество актов излучения при этом должно быть компенсировано количеством актов поглощения.

### 12.2.4. РАВНОВЕСНОЕ И НЕРАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

#### *Абсолютно черное тело*

Описанные выше условия термодинамического равновесия на практике выполняются только для черного тела, т. е. для полого излучателя. Так как реальное черное тело связано с нагретым твердым телом, для области сверхвысоких температур оно не реализуется.

#### *Стационарная плазма*

Плазма с температурой выше 4000 К не может быть заключена в какой-либо сосуд с такой же высокой температурой стенок, поэтому внутри сосуда не может быть единой температуры. Несмотря на это, в лабораторных условиях путем пропускания тока через плазму (электрическая дуга) удается получить в средней части разряда высокотемпературную стационарную плазму (с температурой до 50 000 К) [12.5]. При этом неизбежно должен возникать температурный градиент от середины разряда к холодным стенкам, т. е. постоянный во времени температурный профиль. Подводящая электрическая энергия частично излучается и частично отводится охлаждаемыми стенками. Поэтому требование равновесия излучения плазмы или не выполняется вообще, или выполняется лишь в пределах нескольких линий.

### *Локальное термодинамическое равновесие*

Для того чтобы можно было, несмотря на перечисленные ограничения, термодинамически описать реальную плазму, достаточно выполнения требований локального термического равновесия. Рассматривают достаточно малый элементарный объем, в котором выполняется требование единой температуры плазмы для всех типов частиц и их спектроскопических степеней свободы. Для этого соударения частиц должны происходить так часто, чтобы их было достаточно для выравнивания температуры внутри элементарного объема.

При таком допущении, выполняемом при достаточно высоком давлении, процессами обмена энергией путем излучения можно пренебречь по сравнению с соударениями второго рода, так как необходимый набор дискретных энергетических уровней по Больцману достигается практически только через соударения, но не через поглощение излучения. Поэтому требование равновесия излучения при большой плотности частиц может быть опущено.

Если существует большой градиент температур по направлению к стенкам, то локальное термическое равновесие поддерживается в том случае, если изменение температуры на длине свободного пробега частиц мало по сравнению с самой температурой  $T$ , т. е. если выполняется условие

$$\lambda |\text{grad } T| \ll T. \quad (12.1)$$

### *Нестационарная плазма*

Для возможности описания нестационарной плазмы, существующей в течение очень короткого времени (ударные волны, импульсные лампы, пинч) с помощью локального термического равновесия, она должна существовать так долго, чтобы время  $\tau$  развития плазменных процессов (ионизация, рекомбинация и т. д.) было мало по сравнению с периодом существенного изменения температуры, т. е. если

$$\tau (dT/dt) \ll T. \quad (12.2)$$

### *Парциальное локальное термодинамическое равновесие*

Электроны в плазме приобретают дополнительную энергию благодаря ускорению в электрическом поле разряда и передают ее при соударениях тяжелым частицам. При низком давлении (низкотемпературный разряд) и малой степени ионизации (слаботочная дуга) количества соударений недостаточно для того, чтобы установилась единая температура плазмы. Поэтому электронная температура превышает температуру газа. Несмотря на это, такую плазму можно описать количественно, если измерить обе температуры отдельно или по одной измеренной рассчитать другую. Спектроскопическое измерение дает сведения о температуре возбуждения и с помощью распределения Больцмана через электронные соударения — об электронной температуре. Измерить температуру газа только спектроскопически очень трудно, однако можно, например, используя измерения ротационной структуры молекул или определяя доплеровское уширение спектральных линий. Поэтому в нижеследующем описании методов измерений постоянно указывается, какая именно температура измеряется.

Если плазма излучает очень интенсивно, то соответствующие энергетические уровни могут быть так сильно обеднены электронами, что возбуждение через соударения окажется недостаточным для выполнения распределения Больцмана. Если в плазме наблюдается такое переполнение основного состояния (незаполненность возбужденных состояний) и снижение кинетической температуры тяжелых частиц (газовой температуры) ниже электронной температуры, то говорят о *парциальном локальном термодинамическом равновесии* [12.6].

Такое неравновесное состояние может быть еще достаточно хорошо описано путем введения поправочного коэффициента в уравнение Больцмана, а также при введении соотношения, описывающего обе температуры.

При разряде в очень разреженных газах (разряд низкого давления) возможно повышенное рассеяние значений газовой и электронной температур. Некоторые электронные группы могут иметь различные кинетические температуры. Энергетические уровни могут быть незаселены (инверсия плазмы при возникновении лазерного излучения). Распределение Больцмана не выполняется. Имеет место неравновесное распределение, при котором каждый энергетический уровень должен описываться своей собственной температурой. Количественное описание такой плазмы с помощью частных уравнений реализуется с большими трудностями.

Если распределение скоростей частиц в плазме не описывается распределением Максвелла, то понятие температуры теряет смысл.

## 12.3. ПИРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В обсуждавшихся в разделе 9.1.7. пирометрических методах измерения серое непрерывное излучение нагретого тела сравнивали с таким же серым непрерывным излучением тела с известной температурой или измеряли с помощью градуированного соответствующим образом приемника излучения. Плазма в основном не является серым излучателем, т. е. она оптически прозрачна, ее спектр излучения состоит преимущественно из линий, и лишь относительно малую часть его составляет непрерывный спектр, так что прямая пирометрия неприменима. Излучение плазмы при определенной длине волны  $\lambda$  находится в равновесии с поглощением излучения с той же длиной волны.

Согласно уравнениям (9.5) и (9.6) теоремы Кирхгофа, для оптически плотных тел справедливо

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) L_{\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) L_{\lambda s}(\lambda, T),$$

где  $\alpha(\lambda)$  и  $\varepsilon(\lambda)$  — чисто относительные числа.

У оптически неплотных сред изменение интенсивности излучения в слое бесконечно малой толщины  $dx$   $dL_{\lambda}/dx$  пропорционально интенсивности излучения абсолютно черного тела  $L_{\lambda s}$ , так что для излучающей и поглощающей среды теорема Кирхгофа принимает форму

$$\frac{dL_{\lambda}(\lambda, T)}{dx} = K_{\lambda}(\lambda, T) L_{\lambda s}(\lambda, T) = \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T). \quad (12.3)$$

Коэффициент пропорциональности  $K_{\lambda}$ , называемый коэффициентом поглощения, показывает степень поглощения излучения слоем единичной толщины. Изменение интенсивности излучения  $dL_{\lambda}/dx$ , отнесенное к единичной толщине слоя, по аналогии с  $K_{\lambda}$ , называют коэффициентом излучения  $\varepsilon_{\lambda}$ . В отличие от излучательной способности  $\varepsilon(\lambda)$  коэффициент излучения  $\varepsilon_{\lambda}$  представляет собой интенсивность излучения.

Таким образом,  $K_{\lambda}$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  являются размерными величинами.

Если измерить исторгнутое и поглощенное плазмой излучение абсолютным методом, то без дополнительной информации о плазме можно рассчитать ее температуру из приведенных выше соотношений.

Решить, является ли измеренная температура плазмы электронной или газовой температурой, можно только в том случае, если известны механизм возникновения излучения с длиной волны  $\lambda$  и то, что его можно приписать легким или тяжелым частицам.

В этом и далее описанных методах следует учитывать, что измеряемое излучение испускается не одним слоем с однородной температурой, а излучение горячих слоев накладывается на излучение более холодных слоев, через которые оно проходит. При цилиндрической симметрии и оптически тонком слое по измерению исходящего с одной стороны излучения как функции радиуса сосуда

можно с помощью интегральных уравнений Абеля построить действительный температурный профиль в плоскости, проходящий через ось цилиндра. Если плазма измеряется в направлении оси, то для наблюдения слоев с одинаковой температурой следует выбрать оптимально малый угол раскрытия входного отверстия.

## 12.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

### 12.4.1. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЛИНИИ

Интенсивность  $I_L$  линии молекулярной полосы пропорциональна в основном плотности  $n_j$  вращательных состояний с квантовым числом  $J$ , т. е. кривая интенсивности полосы отражает характер распределения плотности состояний вращения.

Точно так же, как и для обсуждаемых далее интенсивностей линий атомов и положительных ионов, для интенсивности молекулярных линий существует следующая связь с температурой:

$$I_L \sim n_j \sim g_m A_n^m e^{-E_m/kT} g. \quad (12.4)$$

При этом  $T_g$  является газовой температурой, которую с хорошим приближением можно идентифицировать с температурой вращения;  $g_m$  — статистический вес высших вращательных состояний  $m$ , который связан с ротационным квантовым числом соотношением  $g_m = 2J + 1$ ;  $A_n^m$  — вероятность перехода из высшего состояния вращения  $m$  в низшее состояние  $n$ ;  $E_m$  — энергия возбуждения ротационного состояния  $m$ ;  $k$  — постоянная Больцмана.

Величина  $E_m$  определяется из выражения

$$E_m = [J(J+1)h^2]/8\pi\theta, \quad (12.5)$$

где  $\theta$  — момент инерции молекулы, принимаемой за жесткий ротор;  $h$  — квант действия Планка.

Отсюда для интенсивности молекулярной линии получаем

$$I_L \sim (2J+1) A_n^m e^{-J(J+1)h^2/8\pi\theta kT}. \quad (12.6)$$

Если построить в полулогарифмических координатах график зависимости измеренной интенсивности молекулярной линии  $I_L$ , деленной на  $A_n^m g_m$  от квадрата [точнее от  $J(J+1)$ ] вращательного квантового числа, то получится прямая, наклон которой обратно пропорционален температуре  $T$ . Пример такого построения показан на рис. 12.2 [12.7]. При этом по оси абсцисс отложен не  $J^2$ , а отличающаяся от него только на постоянный множитель энергия вращательного движения  $E_m$ .

Переходы между энергетическими уровнями колебательного движения точно так же могут быть использованы для определения температуры, однако достигаемая точность при этом ниже.

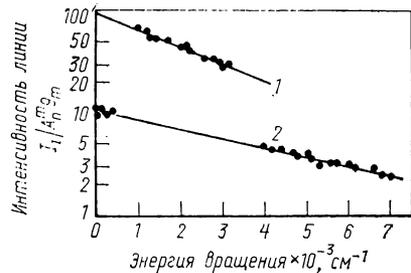


Рис. 12.2. Измерение температуры по распределению интенсивности линий полосы по Бринкману [12.7]:

1 — полоса А10 (3750 К); 2 — полоса СN (6750 К)

## 12.4.2. АТОМНЫЕ И ИОННЫЕ ЛИНИИ

### Интенсивность линии и температура

Взаимосвязь между измеренной абсолютной интенсивностью спектральной линии  $I_L$  и температурой возбужденного состояния имеет вид

$$I_L = \frac{1}{4\pi} A_n^m n_r \frac{g_{r,m}}{Z_r} h\nu l e^{-E_{r,m}/kT} e. \quad (12.7)$$

В этом выражении  $A_n^m$  — вероятность перехода между энергетическими уровнями  $m$  и  $n$ ;  $n_r$  — числократно ионизированных частиц в единице объема;  $g_{r,m}$  — статистический вес [ $g_{r,m} = (2J_{r,m} + 1)$  с орбитальным квантовым моментом  $J_{r,m}$  верхнего уровня  $m$ ];  $E_{r,m}$  — энергия возбуждения квантового состояния  $m$

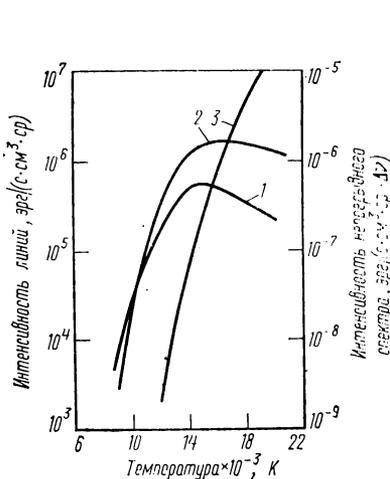


Рис. 12.3. Абсолютная интенсивность двух линий азота и непрерывного спектра при атмосферном давлении для слоя толщиной 1 см в зависимости от температуры. По Берхорну [12.8]:

1 — линия NI 4935 Å; 2 — линия NII 3996 Å; 3 — интенсивность непрерывного спектра

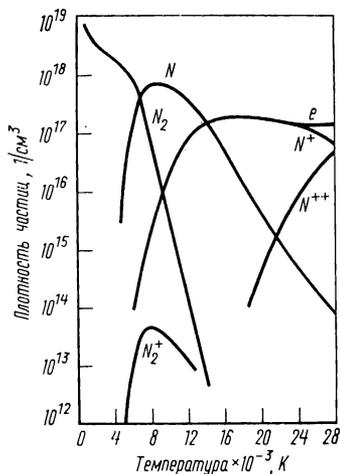


Рис. 12.4. Диаграмма плотности частиц для азота при атмосферном давлении. По Берхорну [12.8]

в  $r$ -кратно ионизированной частице;  $Z_r$  — сумма состояний ( $Z_r = \sum_i g_{r,i} e^{-E_{r,i}/kT}$ ;

суммирование производится по всем  $i$  энергетическим уровням  $r$ -кратно ионизированной частицы;  $h$  — квант действия Планка;  $\nu$  — частота линии;  $l$  — протяженность однородного газового слоя;  $T_e$  — температура возбужденного состояния или электронная температура. Кроме слабо зависящих от температуры суммы состояний и плотности частиц соответствующей степени ионизации  $n_r$ , все остальные присутствующие в уравнении атомные постоянные зависят от температуры. Рис. 12.3 показывает взаимосвязь между абсолютной интенсивностью спектральных линий азота и электронной температурой [12.8]. Экспоненциальное возрастание интенсивности при низких температурах сменяется снижением при высокой температуре из-за сильного уменьшения плотности частиц. Это показано непосредственно расчетом плотности частиц.

## Ионизация и плотность частиц

Равновесная концентрация молекул в зависимости от температуры описывается законом действующих масс. Возникающие при более высокой температуре свободные атомы распадаются на положительные ионы и электроны. Закон действующих масс для этих процессов ионизации выражается так называемым уравнением Эггерта—Заха. Обозначая через  $n_e$  плотность электронов, через  $n_r$  и  $n_{r+1}$  — плотность частиц в двух последовательных степенях ионизации, получаем следующее выражение для связи плотности частиц с ионизационной температурой, которая при плотной плазме соответствует электронной температуре:

$$\frac{n_{r+1}}{n_r} n_e = 2 \frac{Z_{r+1}}{Z_r} \frac{(2\pi m k T)^{3/2}}{h^3} e^{-E_r/kT_e} \quad (12.8)$$

Здесь  $E_r$  означает эффективную энергию ионизации  $r$ -кратно ионизированных частиц;  $Z_r$  и  $Z_{r+1}$  — сумму состояний обеих степеней ионизации. Если учитывать квазинейтральность плазмы (число положительных зарядов равно числу отрицательных зарядов) и закон Дальтона, то имеющихся уравнений вместе с уравнениями Заха достаточно для расчета плотности частиц — молекул, атомов, ионов и электронов — как функции температуры плазмы при заданном давлении. На рис. 12.4 в качестве примера приведена расчетная зависимость плотности частиц азота от температуры (диаграмма плотности частиц) при атмосферном давлении [12.8].

### Определение температуры по абсолютной интенсивности спектральной линии

Плотность частиц, излучающих так, что создается одна определенная спектральная линия, согласно диаграмме плотности частиц (см. рис. 12.4), при заданном давлении является функцией только температуры плазмы. Вследствие этого удается с помощью уравнения (12.7) рассчитать эту плотность в зависимости от температуры (см. рис. 12.3). Плавный подъем кривой до максимума делает возможным очень точное измерение температуры возбуждения или электронной температуры через абсолютную интенсивность соответствующей атомной или ионной спектральной линии.

С помощью релаксационных методов [12.6, 12.9] для PLTE-плазмы (плазмы в состоянии парциального локального термодинамического равновесия) можно по измерениям интенсивности одной спектральной линии определить не только электронную, но и газовую температуру. Если при разряде через газ ток очень быстро возрастает или спадает, то на основе различных постоянных времени процессов плазмы строят кривые нарастания или затухания колебаний, из которых может быть рассчитана газовая температура. При прекращении разряда, например, интенсивность непрерывного спектра монотонно снижается с постоянной времени рекомбинации. Интенсивность линий PLTE-плазмы, наоборот, скачкообразно возрастает на определенную величину и только потом начинает снижаться, как и интенсивность непрерывного спектра. В то время как электронная температура очень быстро спадает до значения газовой температуры ( $10^{-8}$  с), плотность электронов остается еще постоянной. Но так как изменение заселенности верхних состояний в случае PLTE-плазмы следует за электронной температурой, т. е. тесно связана с состоянием свободных электронов, возникает перенаселенность связанных состояний, т. е. скачок интенсивности и вместе с тем отношения электронной температуры к газовой.

Градуировка применяемых для измерения приемников излучения (например, фотопластинок или фотоумножителей) осуществляется с помощью эталона излучения. Для этого используется положительный кратер слаботочной угольной электрической дуги [12.1, 12.2] или градуированная температурная лампа с ленточной вольфрамовой нитью накала (см. 9.7.1.2 и 9.8.3). При сравнительных измерениях следует обратить внимание на то, чтобы излучение от эталонного источника имело точно то же направление, что и исследуемое излучение.

### Определение температуры по относительной интенсивности спектральных линий

Температурную зависимость имеет не только абсолютная интенсивность линий. Относительная интенсивность спектральных линий какой-либо из степеней ионизации также может быть использована для измерения температуры. Логарифмируя уравнение (12.7) и преобразуя его, получаем

$$\lg \left( \frac{I_L}{A_n^m g_{r,m} \nu} \right) = \frac{1}{T_e} \frac{E_{r,m}}{k} + \lg \left( \frac{n_r}{4\pi Z_r h l} \right). \quad (12.9)$$

Если построить для возможно большего числа линий одной из степеней ионизации график зависимости левой половины этого уравнения от энергии возбуждения  $E_{r,m}$  линий, то получатся прямые с углом наклона, пропорциональным  $1/T$ . Этот метод аналогичен описанному методу измерения температуры с помощью линий молекулярной полосы (см. 4.1) и пригоден для контроля распределения Больцмана. Точность метода, однако, относительно низка.

Точность метода может быть существенно повышена, если есть возможность использовать для относительных измерений линии различных степеней ионизации. Комбинация уравнения для интенсивности линии (12.7) с уравнением Саха (12.8) дает следующее выражение для отношения интенсивностей двух линий двух последовательных степеней ионизации (обозначенных индексами 1 и 2):

$$\frac{I_{L_1}}{I_{L_2}} = \frac{C (kT)^{3/2}}{n_e} e^{-(E_{m_2} - E_{m_1} + E_J)/kT}, \quad (12.10)$$

где  $C$  — постоянная (в действительности в  $C$  входит сумма состояний, т. е.  $C$  слабо зависит от температуры);  $E_J$  — энергия ионизации элемента. Величина  $n_e$  определяется из диаграммы плотности частиц (см. рис. 12.4), так что температура входит еще и в  $n_e$ . Вследствие этого отношение  $I_{L_1}/I_{L_2}$  сильно зависит от температуры.

### Определение температурного профиля по относительной интенсивности линии и метод Ларенца

Если исследуемую плазму спроектировать на входную щель спектрографа, то радиус разряда однозначно соответствует высоте спектральной линии в плоскости приемника излучения. Поскольку температура разряда зависит от радиуса разряда, высота спектральной линии соответствует определенной температуре плазмы.

Из уравнения для интенсивности линии (12.7) следует выражение для отношения интенсивностей  $I(T)$  и  $I(T_1)$  одной и той же линии при двух температурах  $T$  и  $T_1$  на геометрически соответственных расстояниях от оси  $r$  и  $r_1$ :

$$\frac{I(T)}{I(T_1)} = \frac{n(T) Z_r(T_1)}{n(T_1) Z_r(T)} e^{-E_{m/k}(T-T_1)}. \quad (12.11)$$

Если известна температура  $T_1$ , то, используя соотношение внутри спектральной линии  $I_r/I_{r_1} = I(T)/I(T_1)$ , по относительному распределению интенсивности по длине спектральной линии можно рассчитать полный температурный профиль.

Этот метод был модифицирован Ларенцем [12.10] в абсолютный метод. При достаточно высокой температуре интенсивность линии переходит через максимум, который становится заметным также и в распределении интенсивности по длине линии. Местоположению максимума интенсивности можно по рис. 12.3 отнести некоторую температуру (нормированную температуру). Тогда оценка распределения интенсивности по длине даст полный температурный профиль.

### Оптически плотные линии

При очень высокой плотности частиц (т. е. при высоком давлении) и больших толщинах однородных слоев интенсивность спектральных линий достигает функции Планка, что может быть определено по уплотнению вершины линии. При этом пирометрическим методе измерения произведение коэффициента поглощения и толщины слоя намного больше единицы, т. е.  $I(\lambda, T) = L_{\lambda_s}(\lambda, T)$ . Абсолютная интенсивность линии при оптически плотных линиях выше функции Планка дает непосредственно температуру излучения.

### Определение температуры по профилю линии

Во всех обсуждавшихся до сих пор способах форма используемых спектральных линий не имела значения, все зависело только от интенсивности излучения измеряемой спектральной линии, интегрированной по всему диапазону частот. Если можно разделить эффекты, приводящие к уширению линий, то температура может быть определена из полуширины или из профиля линии. Наиболее часто используемым эффектом является эффект уширения чувствительных линий из-за напряженности микрополей положительных ионов.

У водорода расщепление возрастает линейно с увеличением напряженности поля, которая увеличивается с плотностью ионов. В возрастающей части (см. рис. 12.4) плотность ионов и электронов является очень чувствительной функцией электронной температуры.

Можно также путем примешивания «следов» водорода к плазме другого состава по форме водородных линий определить электронную плотность и тем самым электронную температуру общей плазмы.

При очень высоких температурах эффект уширения возникает в первую очередь из-за доплеровского смещения. При этом из-за теплового движения светящихся частиц плазмы частота создаваемого излучения смещается из-за эффекта Доплера. Если излучающие частицы имеют максвелловское распределение скоростей, то соответствующая спектральная линия уширяется в форме кривой Гаусса. Половина полуширины такой линии пропорциональна корню квадратному из газовой температуры, вследствие чего чувствительность метода низка. Применимость метода ограничена температурами выше  $10^5$  К.

## 12.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА

### Абсолютная интенсивность непрерывного излучения

Взаимодействие между свободными электронами в плазме и существующими ионами приводит к «свободно — свободно» и «свободно — связанному» непрерывному излучению (см. 12.2.2). Теория непрерывного излучения была разработана Крамерсом и Унсельдом, однако она точна только для водорода. Для других элементов должны быть введены поправочные коэффициенты. Отнесенная к единице частоты интенсивность непрерывного «свободно — связанного» излучения, доминирующего в видимой спектральной области, имеет следующую зависимость от температуры:

$$I_{\nu} \sim \frac{n_i n_e}{\sqrt{kT}} l, \quad (12.12)$$

где  $n_i$  — плотность ионов;  $l$  — протяженность излучающего слоя.

Так как  $n_i n_e = n_e^2$  и электронная плотность сильно возрастает с электронной температурой (см. рис. 12.4), приведенное соотношение оказывается очень удобным для определения температуры путем измерения абсолютной интенсивности непрерывного «свободно — связанного» излучения (см. рис. 12.3).

## Относительная интенсивность линий и непрерывного излучения

По измерению отношения интенсивности линий и интенсивности непрерывного спектра, согласно разделам 12.4.2 и 12.5, может быть точно так же определена электронная температура.

## 12.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ

При определении температуры по абсолютной интенсивности непрерывного спектра уже была использована плотность электронов; необходимо рассмотреть еще методы, в которых для определения температуры газа используются прямые измерения плотности тяжелых частиц.

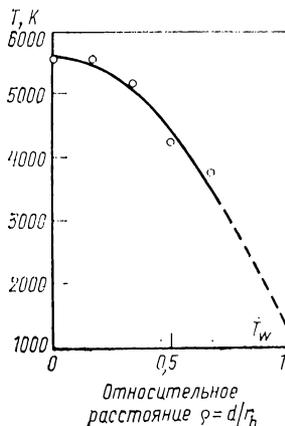


Рис. 12.5. Температурный профиль электрической дуги в парах ртути, измеренный с помощью мягкого рентгеновского излучения. По Коху [12.11].

$T_w$  — температура стенок;  
 $d$  — расстояние от середины дуги до измеряемого места;  $r_b$  — радиус цилиндра дуги

и поэтому может быть использован для определения температуры в холодных, несветящихся зонах плазмы. Показатель преломления измеряют или с помощью интерферометра, когда отсчитывают смещение интерференционных полос, или с помощью теневой аппаратуры (ширрен-метод). При этом методе определяется градиент показателя преломления по углу отклонения светового пучка в теневом приборе, а затем путем интегрирования определяется показатель преломления [12.12]. Разработан также новый метод определения показателя преломления и температуры газа с помощью голографии [12.13].

### Рассеяние лазерного излучения

Применение лазера в качестве источника света в интерферометрии и в теневых измерениях не внесло существенные изменения в принципы измерений при определении температуры газа. При этом лазер как источник излучения высокой

### Поглощение рентгеновских, $\alpha$ - и $\beta$ -излучений

Поглощение рентгеновских,  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучений подчиняется закону:

$$I = I_0 e^{-k(n)d}. \quad (12.13)$$

В этом уравнении  $I_0$  и  $I$  означают интенсивность излучения до и после прохождения поглощающего слоя толщиной  $d$  с поглощающей способностью  $k$ . Величина  $k$  пропорциональна только плотности частиц  $n$ , т. е. снижение интенсивности  $I_0 - I$  в поглощающем слое  $d$  является непосредственной мерой плотности частиц. Тем самым с помощью диаграммы плотности частиц (см. рис. 12.4) определяется температура газа. На рис. 12.5 показан измеренный с помощью мягкого рентгеновского излучения температурный профиль цилиндрического дугового разряда в парах ртути [12.11].

### Измерение показателя преломления

В холодных зонах плазмы показатель преломления имеет еще достаточную величину, чтобы быть измеренным оптическим методом. Показатель преломления пропорционален плотности частиц через температурнезависимую постоянную

интенсивности и малой дивергенции пучка излучения сделал возможным развернутую по времени диагностику плазмы с помощью рассеяния излучения. При этом температура и давление плазмы могут варьироваться в широких пределах и измерения можно проводить в тех областях, где спектроскопические и интерференционные методы оказываются непригодными. Так, с помощью лазерного излучения были измерены температура и плотность в ионосфере, в пинч-установках, в стационарных и пульсирующих электрических дугах, в ударных волнах и в установках Токамак. При этом не требовались сведения о равновесном состоянии такой плазмы.

При методе рассеяния лазерного излучения плоская электромагнитная волна проходит сквозь плазму и рассеивается на свободных электронах и ионах. Зависимость сечения рассеяния от массы позволяет пренебречь прямым рассеянием на ионах по сравнению с рассеянием на электронах. Однако электростатическое взаимодействие ионов с электронами заметно сказывается на рассеянии на электронах. Поэтому спектр рассеяния монохроматического излучения состоит из доли рассеяния свободных (невозмущенных) электронов и доли рассеяния электронов, сильно взаимодействующих с ионами. Для того чтобы мог наблюдаться спектр рассеянного излучения, должны существовать колебания плотности пространственного распределения электронов, так как в противном случае из-за временной когерентности фаз всех центров рассеяния в плоскости приемника излучения происходит гашение излучения. Спектры рассеяния могут быть разделены на три типа.

Если взаимодействие между электронами и ионами мало, имеет место только томпсоновское рассеяние на свободных электронах. Для максвелловского распределения скоростей электронов спектр рассеяния имеет профиль гауссовской кривой, из полуширины которой может быть определена температура электронов. Поскольку здесь на уширение линии оказывает влияние эффект Допплера (см. 12.4.2), половина полуширины опять пропорциональна квадратному корню из температуры электронов. Дополнительно по интенсивности рассеянного излучения, которая зависит от плотности рассеивающих частиц, можно определить плотность электронов.

С усилением взаимодействия между электронами и ионами рассеивают также возмущенные электроны, и в спектре рассеяния содержатся, кроме центральной линии (ионной компоненты), еще два спутника (электронная компонента). Профиль спутников уже не соответствует гауссовской кривой, он модифицирован колебаниями плотности электронов (плазмонами). Однако наибольшая интенсивность находится еще в электронной компоненте. Если центральная линия разрешима, то можно, кроме плотности и температуры электронов, определить еще и температуру ионов.

При очень сильном взаимодействии между заряженными частицами все сильнее становятся коллективные эффекты, и наибольшая интенсивность рассеянного излучения снова приходится на центральную линию. Электронная часть рассеяния состоит из широко раздвинутых спутников (дублета) с очень малой интенсивностью. С усилением взаимодействия электронная часть становится нерегистрируемой. В этом случае может быть определена температура ионов.

Так как эффективное сечение рассеяния мало, необходимо работать с высокой интенсивностью рассеиваемого излучения. Однако она должна быть достаточно малой, чтобы исключить влияние на плазму лазерного излучения (разогрев). Минимальная интенсивность рассеянного излучения должна быть по меньшей мере такой величины, чтобы не перекрывать собственную светимость плазмы и не превышать значения  $10^{-10}$  Вт, тогда будет возможной регистрация доступными в разумных пределах средствами. Тем самым ограничивается температурный диапазон измерения. Однако путем выбора лазеров с различной длиной волны эти пределы могут быть изменены.

Кроме импульсных лазеров (рубиновый лазер и др.), для этих методов диагностики плазмы применяются также ионные лазеры с непрерывным излучением. В этом случае от собственного свечения плазмы с помощью корреляционного анализа (метод запираания) должен быть отделен на четыре порядка меньший рассеянный сигнал. Теорию рассеяния можно найти в новых учебниках [12.14—12.17], в которых подробно описаны упомянутые здесь методы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- 12.1. *Euler, J.*: Der Graphitbogen als spektralphotometrisches Strahllichtnormal im Gebirgt von 0,25 ... 1,8. Ann. Phys. 6. Folge, 11 (1953), S. 203—224.
- 12.2. *Magdeburg, H.*; *Schleg, U.*: Spektralphotometrische Eigenschaften des Niederstrom-Kohlebogens. Z. angew. Phys. 20 (1966), S. 465—473.
- 12.3. *Unsold, A.*: Physik der Sternatmosphären. 2. Auflage, S. 1, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968.
- 12.4. *Maecker, H.*: Messung höchster Temperaturen. In VDI—Berichte Nr. 112: Technische Temperaturmessung Düsseldorf 1966, S. 23—28.
- 12.5. *Burhorn, F.*, *Maecker, H.*; *Peters, T.*: Temperaturmessungen an wasserstabilisierten Hochleistungsbogen. Z. Phys. 131 (1951), S. 28—40.
- 12.6. *Richter, J.*: Partial thermodynamic equilibria in plasmas 10. Int. Conf. Phen. Ionised Gases, Oxford England 13—18. 9. 1971, Book of Invited Papers, S. 37—58 Donald Persons Co. Ltd. Publisher, 6, Brewer Street Oxford Oxl IQP England.
- 12.7. *Brinkman, H.*: Optical study of the electric arc. Dissertation Utrecht, Amsterdam 1937.
- 12.8. *Burhorn, F.*: Berechnung und Messung der Wärmeleitfähigkeit von Stickstoff bis 13 000 K. Z. Phys. 155 (1959), S. 42—58.
- 12.9. *Aleksandrow, V. Ya.*, *Gurevich, D. B.*; *Podmoshenski, I. V.*: A Study of the mechanism of excitation and energy by means of the nonequilibrium emission spectra produced by a pulsed electric field in a thermal plasma. Opt. Sperry, 18 (1969), S. 107—110.
- 12.10. *Larenz, R. W.*: Über ein Verfahren zur Messung sehr Hoher Temperaturen in nahezu durchlässigen Bogensäulen. Z. Phys. 129 (1951), S. 327—342. Ferner: Temperaturmessungen in der Säule eines Gerdienbogens. Z. Phys. 129 (1951), S. 343—364.
- 12.11. *Koch, O.*: Messung der radialen Temperaturverteilung im wandstabilisierten Quecksilberhochdruckbogen. Z. Phys. 126 (1949), S. 507—521.
- 12.12. *Behringer, K.*, *Kollmar, W.*; *J.*: Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff zwischen 2000 K und 7000 K. Z. Phys. 21 5 (1958), S. 127—151.
- 12.13. *Ineichen, B.*, *Kogelschatz, U.*, *Dandlker, R.*: Schlieren diagnostics and interferometry of arc discharge using pulsed holography. Appl. Opt. 12 (1973), S. 2554—2556.
- 12.14. *Lochte—Holtgreven, W.*: Plasma diagnostics. Kap. 9: Kunze, H. J.: The laser as tool for plasma diagnostics, S. 550—616. North Holl. Publ. Co., Amsterdam 1968.
- 12.15. *Griem, H. R.*: Plasma spectroscopy. McGraw—Hill Book Comp., New York, San Francisco, Toronto, London, 1964.
- 12.16. *Neumann, W.*: Spektroskopische Methoden der Plasmadiagnostik In Rompe, R., Steenbeck, M.: Ergebnisse der Plasmaphysik und der Gaselektronik. Band. I. Akademieverlag Berlin 1967, S. 1—395.
- 12.17. *Tourin, R. H.*: Spectroscopic gas—temperature measurement, pyrometry of hot gases and plasmas. Elsevier, Publ. Co. Amsterdam, London, New York, 1966.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

(издания общего характера)

- A.1. Temperature, Vol. I. its measurement and control in science. and industry. New York, 1941.
- A.2. Temperature, Vol. 11, edited by Wolfe, H. C.: New York and London 1955.
- A.3. Temperature, Vol. 111, edited by Herzfield, Ch. M.:
  - A. 3.1. Part 1. Basic Concepts, Standards and Methods. New York and London 1962.
  - A. 3.2. Part 2. Applied Methods and Instruments. New York and London 1962.
  - A.3.3. Part 3. Biology and Medicine. New York and London 1963.
- A.4. Temperature, Vol. IV, Part 1—3, edited by Plumb, H. H., Instrum. Soc., Amer., Pittsburgh 1973.
- A.5. *Henning, F.*: Temperaturmessung 2. Aufl. Leipzig 1955.
- A.6. *Baker, H. D.*; *Ryder, E. A.*, *Baker, N. H.*: Temperature measurement in engineering, Vol. I, New York and London 1953; Vol. II, New York and London 1961.
- A.7. *Lieneweg, F.*: Temperaturmessung. In Krönert, J.: Handbuch der technischen Betriebskontrolle, Bd 3, Physikalische Meßmethoden, 3. Aufl. Leipzig 1959, S. 162—376.
- A.8. *Goux, C.*: Guide de thermometrie. Paris 1959.
- A.9. *Alegre, R.*, *Ancey, M.*; *Kissel, R.*; *Lacroix, R.*; *Monnot, G.*; *Moutet, A.*; *Riviere, M.*; *Urbain, G.*: Etudes de pyrometrie pratique, Paris 1959.
- A.10. *Winkler, O.*: Temperaturmessung. In Hengstenberg, J.; Sturm, B.; Winkler, O.: Messen und Regeln in der Chemische Technik, 2. Aufl. Berlin—Göttingen—Heidelberg 1964.
- A.11. *Hall, J. A.*: The measurement of temperature, London 1966.
- A.12. VDI—Berichte: Technische Temperaturmessung, Nr. 112 (1966) und Nr. 198 (1973), Düsseldorf.
- A.13. *Terny, M.*: La mesure des temperatures au laboratoire et dans l'industrie, Paris, 1962.
- A.14. *Hunsinger, W.*: Temperaturmessung in Flügge, S.: Handbuch der Physik Bd 23, Berlin, Heidelberg, New York 1966, S. 373—456.
- A.15. Richtlinie VDE/VDI 3511: Technische Temperaturmessung, 4. Aufl., Düsseldorf 1967.
- A.16. Richtlinie VDE/VDI 3512, Bl. 2: Meßanordnungen für Temperaturmessungen, Düsseldorf 1972.
- A.17. *Lindorf, H.*: Technische Temperaturmessungen, 3. Aufl. Essen 1968.

- A.18 *Liebers, A.*: Temperaturmessungen. In Reihe Automatisierungs—technik Bd. 27, VEB—Verlag Berlin 1965.
- A.19. *Keinath, G.*: Elektrische Temperature—Meßgeräte, München—Berlin 1923.
- A.20. *Burges, G. K.; le Chatelier, H.*: Die Messung hoher Temperaturen, Berlin 1913.
- A.21. Richtlinie VDI/VDE 2600 Metrologie (Meßtechnik)  
 Bl.2 Grundbegriffe, Nov. 73.  
 Bl.3. Gerätetechnische Begriffe, Nov. 73.  
 Bl.4. Begriffe zur Beschreibung von Meßeinrichtungen, Nov. 73.  
 Bl.5. Begriffe zur Darstellung der Wirkungsweise, Nov. 73.  
 Bl.6. Benennung von Meßeinrichtungen, Nov. 73.
- A.22. Normen, allgemein  
 DIN 1319 Grundbegriffe der Meßtechnik  
 Bl.1.11.68. Messen, Prüfen, Zählen  
 Bl.2.12.68. Begriffe für die Anwendung von Meßgeräten  
 Bl. 3. 12.68. Begriffe für die Fehler beim Messen  
 DIN 1345 9.75. Technische Thermodynamik, Formelzeichen, Einheiten  
 DIN 1301 11.71. Einheitsnamen, Einheitszeichen  
 DIN 16180 Bl. 1.70. Thermometer, Allgemeine Begriffe  
 Bl.2. 1.70. Thermometer, Begriffe für Stabausdehnungs- und Bimetallthermometer  
 Bl.3. 5.68 Thermometer, Begriffe für Flüssigkeits—Glasthermometer  
 Bl.4.11.68 Thermometer, Begriffe für Flüssigkeits— und Dampfdruck—Federt hermometer  
 Bl.5. 1.70. Thermometer, Begriffe für elektrische Thermometer  
 Bl.6. 1.70. Thermometer, Begriffe für Strahlungsthermometer
- A.23. Berichte über Arbeiten auf dem Gebiete der Temperaturmeßtechnik  
 1. *Birr, H.*: Übersicht über die neuesten Arbeiten auf dem Gebiet der Temperaturmeßtechnik, Z. Messen Streuern, Regeln (1963), S. 87—92.  
 2. Fachgebiete der Technik in Jahresberichten der VDI-Z. a) *Birr, H.*: VDI-Z. 106 (1964), S. 1791—1997 und 107 (1965), S. 1471—1473.  
 b) *Becker, H.*: VDI-Z. 109 (1967), S. 901—904, 110 (1968), S. 713—722, 111 (1969), S. 719—730, 113 (1971), S. 193—204; 115 (1973), S. 187—194.  
 3. Fortschrittsberichte im Auftrag der VDE/VDI—Fachgruppe «Elektrisches und wärmetechnisches Messen». Temperaturmessung» im Arch. Techn. Messen Liene-  
 weg, F.: Arch. techn. Messen V 210—E1 Febr. 1962; V 210—F<sub>2</sub> Okt. 1865; V 210—F<sub>3</sub>  
 Dez. 1965.  
*Becker, H.*: Arch. techn. Messen V 210—F<sub>4</sub> Nov. 1975

Ряды основных величин наиболее часто применяемых термопар и термометров сопротивления

1а. Основные величины т. э. д. с. для термопары Cu—CuNi (по ДИН 43710) (медь—константан)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-200	-5,70	0,019	70	2,91	0,044	340	17,31	0,061
-190	-5,51	0,019	80	3,35	0,045	350	17,92	0,061
-180	-5,32	0,020	90	3,80	0,045	360	18,53	0,061
-170	-5,12	0,021	100	4,25	0,046	370	19,14	0,062
-160	-4,91	0,022	110	4,71	0,047	380	19,76	0,062
-150	-4,69	0,023	120	5,18	0,048	390	20,38	0,062
-140	-4,46	0,025	130	5,65	0,049	400	21,00	0,062
-130	-4,21	0,026	140	6,13	0,050	410	21,62	0,063
-120	-3,95	0,027	150	6,62	0,051	420	22,25	0,063
-110	-3,68	0,028	160	7,12	0,052	430	22,88	0,063
-100	-3,40	0,030	170	7,63	0,052	440	23,51	0,064
-90	-3,11	0,031	180	8,15	0,053	450	24,15	0,064
-80	-2,81	0,032	190	8,67	0,054	460	24,79	0,065
-70	-2,50	0,033	200	9,20	0,055	470	25,44	0,065
-60	-2,18	0,035	210	9,74	0,056	480	26,09	0,066
-50	-1,85	0,036	220	10,29	0,057	490	26,75	0,066
-40	-1,50	0,037	230	10,85	0,058	500	27,41	0,067
-30	-1,14	0,038	240	11,41	0,059	510	28,08	0,067
-20	-0,77	0,039	250	11,98	0,060	520	28,75	0,068
-10	-0,39	0,040	260	12,55	0,061	530	29,43	0,068
±0	±0	0,040	270	13,13	0,062	540	30,11	0,069
10	0,40	0,041	280	13,71	0,063	550	30,80	0,069
20	0,80	0,042	290	14,30	0,064	560	31,49	0,070
30	1,21	0,043	300	14,90	0,065	570	32,19	0,070
40	1,63	0,044	310	15,50	0,066	580	32,89	0,071
50	2,05	0,045	320	16,10	0,067	590	33,60	0,071
60	2,48	0,046	330	16,70	0,068	600	34,31	0,072

1б. Основные величины т. э. д. с. для термопары Cu—CuNi (по IEC 65В.8) (медь—константан)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-200	-5,603	0,016	±0	0	0,039	210	9,820	0,054
-190	-5,439	0,018	10	0,391	0,040	220	10,360	0,055
-180	-5,261	0,019	20	0,789	0,041	230	10,905	0,055
-170	-5,069	0,020	30	1,196	0,042	240	11,456	0,056
-160	-4,865	0,022	40	1,611	0,043	250	12,011	0,056
-150	-4,648	0,023	50	2,035	0,044	260	12,572	0,057
-140	-4,419	0,024	60	2,467	0,045	270	13,137	0,057
-130	-4,177	0,025	70	2,908	0,046	280	13,707	0,058
-120	-3,923	0,027	80	3,357	0,047	290	14,281	0,058
-110	-3,656	0,028	90	3,813	0,048	300	14,860	0,059
-100	-3,378	0,029	100	4,277	0,049	310	15,443	0,059
-90	-3,089	0,030	110	4,749	0,050	320	16,030	0,060
-80	-2,788	0,031	120	5,227	0,051	330	16,621	0,060
-70	-2,475	0,032	130	5,712	0,052	340	17,217	0,061
-60	-2,152	0,033	140	6,204	0,053	350	17,816	0,061
-50	-1,819	0,034	150	6,702	0,054	360	18,420	0,062
-40	-1,475	0,035	160	7,207	0,055	370	19,027	0,062
-30	-1,121	0,036	170	7,718	0,056	380	19,638	0,062
-20	-0,757	0,037	180	8,235	0,057	390	20,252	0,063
-10	-0,383	0,038	190	8,757	0,058	400	20,869	0,063
			200	9,286	0,059			

2а. Основные величины т. э. д. с. для термопары Fe—CuNi  
(по ДИН 43710) (железо—константан)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
—200	—8,15		170	9,27		540	30,17	
—190	—7,86	0,029	180	9,83	0,056	550	30,75	0,058
—180	—7,56	0,030	190	10,39	0,056	560	31,33	0,058
—170	—7,25	0,031	200	10,95	0,056	570	31,91	0,058
—160	—6,93	0,032	210	11,51	0,056	580	32,49	0,058
—150	—6,60	0,033	220	12,07	0,056	590	33,08	0,059
—140	—6,26	0,034	230	12,63	0,056	600	33,67	0,059
—130	—5,90	0,036	240	13,19	0,056	610	34,26	0,059
—120	—5,53	0,037	250	13,75	0,056	620	34,85	0,059
—110	—5,15	0,038	260	14,31	0,056	630	35,44	0,059
—100	—4,75	0,040	270	14,88	0,057	640	36,04	0,060
—90	—4,33	0,042	280	15,44	0,056	650	36,64	0,060
—80	—3,89	0,044	290	16,00	0,056	660	37,25	0,061
—70	—3,44	0,045	300	16,56	0,056	670	37,85	0,060
—60	—2,98	0,046	310	17,12	0,056	680	38,47	0,062
—50	—2,51	0,047	320	17,68	0,056	690	39,09	0,062
—40	—2,03	0,048	330	18,24	0,056	700	39,72	0,063
—30	—1,53	0,050	340	18,80	0,056	710	40,35	0,063
—20	—1,02	0,051	350	19,36	0,056	720	40,98	0,063
—10	—0,51	0,051	360	19,92	0,056	730	41,62	0,064
±0	±0	0,051	370	20,48	0,056	740	42,27	0,065
10	0,52	0,052	380	21,04	0,056	750	42,92	0,065
20	1,05	0,053	390	21,60	0,056	760	43,57	0,065
30	1,58	0,053	400	22,16	0,056	770	44,23	0,066
40	2,11	0,053	410	22,72	0,056	780	44,89	0,066
50	2,65	0,054	420	23,29	0,057	790	45,55	0,066
60	3,19	0,054	430	23,86	0,057	800	46,22	0,067
70	3,73	0,054	440	24,43	0,057	810	46,89	0,067
80	4,27	0,054	450	25,00	0,057	820	47,57	0,068
90	4,82	0,055	460	25,57	0,057	830	48,25	0,068
100	5,37	0,055	470	26,14	0,057	840	48,94	0,069
110	5,92	0,055	480	26,71	0,057	850	49,63	0,069
120	6,47	0,055	490	27,28	0,057	860	50,32	0,069
130	7,03	0,056	500	27,85	0,057	870	51,02	0,070
140	7,59	0,056	510	28,43	0,058	880	51,72	0,070
150	8,15	0,056	520	29,01	0,058	890	52,43	0,071
160	8,71	0,056	530	29,59	0,058	900	53,14	0,071
		0,056			0,058			

26. Основные величины т. э. д. с. для термопары Fe—CuNi  
(по IEC 65B.8) (железо—константан)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-200	-7,890	0,023	270	14,663	0,055	740	41,647	0,064
-190	-7,659	0,026	280	15,217	0,055	750	42,283	0,064
-180	-7,402	0,028	290	15,771	0,055	760	42,922	0,064
-170	-7,122	0,030	300	16,325	0,055	770	43,563	0,064
-160	-6,821	0,032	310	16,879	0,055	780	44,207	0,065
-150	-6,499	0,034	320	17,432	0,055	790	44,852	0,065
-140	-6,159	0,036	330	17,984	0,055	800	45,498	0,065
-130	-5,801	0,038	340	18,537	0,055	810	46,144	0,065
-120	-5,426	0,039	350	19,089	0,055	820	46,790	0,064
-110	-5,036	0,040	360	19,640	0,055	830	47,434	0,064
-100	-4,632	0,042	370	20,192	0,055	840	48,076	0,064
-90	-4,215	0,043	380	20,743	0,055	850	48,716	0,064
-80	-3,785	0,044	390	21,295	0,055	860	49,354	0,063
-70	-3,344	0,045	400	21,846	0,055	870	49,989	0,063
-60	-2,892	0,046	410	22,397	0,055	880	50,621	0,063
-50	-2,431	0,047	420	22,949	0,055	890	51,249	0,063
-40	-1,960	0,048	430	23,501	0,055	900	51,875	0,062
-30	-1,481	0,049	440	24,054	0,055	910	52,496	0,062
-20	-0,995	0,049	450	24,607	0,055	920	53,115	0,061
-10	-0,501	0,050	460	25,161	0,056	930	53,729	0,061
± 0	0	0,051	470	25,716	0,056	940	54,341	0,061
10	0,507	0,051	480	26,272	0,056	950	54,948	0,061
20	1,019	0,052	490	26,829	0,056	960	55,553	0,060
30	1,536	0,052	500	27,388	0,056	970	56,155	0,060
40	2,058	0,053	510	27,949	0,056	980	56,753	0,060
50	2,585	0,053	520	28,511	0,056	990	57,349	0,059
60	3,115	0,053	530	29,075	0,057	1000	57,942	0,059
70	3,649	0,054	540	29,642	0,057	1010	58,533	0,059
80	4,186	0,054	550	30,210	0,057	1020	59,121	0,059
90	4,725	0,054	560	30,782	0,057	1030	55,708	0,059
100	5,268	0,054	570	31,356	0,058	1040	60,293	0,058
110	5,812	0,055	580	31,933	0,058	1050	60,876	0,058
120	6,359	0,055	590	32,513	0,058	1060	61,459	0,058
130	6,907	0,055	600	33,096	0,059	1070	62,039	0,058
140	7,457	0,055	610	33,683	0,059	1080	62,619	0,058
150	8,008	0,055	620	34,273	0,060	1090	63,199	0,058
160	8,560	0,055	630	34,867	0,060	1100	63,777	0,058
170	9,113	0,055	640	35,464	0,060	1110	64,355	0,058
180	9,667	0,056	650	36,066	0,061	1120	64,933	0,058
190	10,222	0,056	660	36,671	0,061	1130	65,510	0,058
200	10,777	0,056	670	37,280	0,061	1140	66,087	0,058
210	11,332	0,056	680	37,893	0,062	1150	66,664	0,058
220	11,887	0,056	690	38,510	0,062	1160	67,240	0,058
230	12,442	0,056	700	39,130	0,062	1170	67,815	0,058
240	12,998	0,056	710	39,754	0,063	1180	68,390	0,058
250	13,553	0,056	720	40,382	0,063	1190	68,964	0,057
260	14,108	0,056	730	41,013	0,063	1200	69,536	

3. Основные величины т. э. д. с. для термопары NiCr—Ni  
(по ДИН 43710 и IEC 65B.8)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-200	-5,891		330	13,456		860	35,718	
-190	-5,730	0,016	340	13,874	0,042	870	36,121	0,040
-180	-5,550	0,018	350	14,293	0,042	880	36,524	0,040
-170	-5,354	0,020	360	14,712	0,042	890	36,925	0,040
-160	-5,141	0,021	370	15,132	0,042	900	37,325	0,040
-150	-4,912	0,023	380	15,552	0,042	910	37,724	0,040
-140	-4,669	0,024	390	15,974	0,042	920	38,122	0,040
-130	-4,410	0,026	400	16,395	0,042	930	38,519	0,040
-120	-4,138	0,027	410	16,818	0,042	940	38,915	0,040
-110	-3,852	0,029	420	17,241	0,042	950	39,310	0,040
-100	-3,553	0,030	430	17,664	0,042	960	39,703	0,039
-90	-3,242	0,031	440	18,088	0,042	970	40,096	0,039
-80	-2,920	0,032	450	18,513	0,043	980	40,488	0,039
-70	-2,586	0,033	460	18,938	0,043	990	40,879	0,039
-60	-2,243	0,034	470	19,363	0,043	1000	41,269	0,039
-50	-1,889	0,035	480	19,788	0,044	1010	41,657	0,039
-40	-1,527	0,036	490	20,214	0,043	1020	42,045	0,039
-30	-1,156	0,037	500	20,640	0,043	1030	42,432	0,039
-20	-0,777	0,038	510	21,066	0,043	1040	42,817	0,039
-10	-0,392	0,039	520	21,493	0,043	1050	43,202	0,039
±0	0	0,040	530	21,919	0,043	1060	43,585	0,038
10	0,397	0,040	540	22,346	0,043	1070	43,968	0,038
20	0,798	0,040	550	22,772	0,043	1080	44,349	0,038
30	1,203	0,041	560	23,198	0,043	1090	44,729	0,038
40	1,611	0,041	570	23,624	0,043	1100	45,108	0,038
50	2,022	0,041	580	24,050	0,043	1110	45,486	0,038
60	2,436	0,041	590	24,476	0,043	1120	45,863	0,038
70	2,850	0,041	600	24,902	0,043	1130	46,238	0,038
80	3,266	0,042	610	25,327	0,043	1140	46,612	0,037
90	3,681	0,042	620	25,751	0,042	1150	46,985	0,037
100	4,095	0,041	630	26,176	0,043	1160	47,356	0,037
110	4,508	0,041	640	26,599	0,042	1170	47,726	0,037
120	4,919	0,041	650	27,022	0,042	1180	48,095	0,037
130	5,327	0,041	660	27,445	0,042	1190	48,462	0,037
140	5,733	0,041	670	27,867	0,042	1200	48,828	0,037
150	6,137	0,040	680	28,288	0,042	1210	49,192	0,036
160	6,539	0,040	690	28,709	0,042	1220	49,555	0,036
170	6,939	0,040	700	29,128	0,042	1230	49,916	0,036
180	7,338	0,040	710	29,547	0,042	1240	50,276	0,036
190	7,737	0,040	720	29,965	0,042	1250	50,633	0,036
200	8,137	0,040	730	30,383	0,042	1260	50,990	0,035
210	8,537	0,040	740	30,799	0,042	1270	51,344	0,035
220	8,938	0,040	750	31,214	0,042	1280	51,697	0,035
230	9,341	0,040	760	31,629	0,042	1290	52,049	0,035
240	9,745	0,041	770	32,042	0,041	1300	52,398	0,035
250	10,151	0,041	780	32,455	0,041	1310	52,747	0,035
260	10,560	0,041	790	32,866	0,041	1320	53,093	0,034
270	10,969	0,041	800	33,277	0,041	1330	53,439	0,034
280	11,381	0,040	810	33,686	0,041	1340	53,782	0,034
290	11,793	0,041	820	34,095	0,041	1350	54,125	0,034
300	12,207	0,041	830	34,502	0,041	1360	54,466	0,034
310	12,623	0,042	840	34,909	0,041	1370	54,807	0,034
320	13,039	0,042	850	35,314	0,040			

4. Основные величины т. э. д. с. для термопары NiCr—CuNi  
(по IEC 65B.8)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-200	-8,824		210	14,161	0,075	610	45,891	0,081
-190	-8,561	0,026	220	14,909	0,075	620	46,697	0,081
-180	-8,273	0,029	230	15,661	0,076	630	47,502	0,080
-170	-7,963	0,031	240	16,417	0,076	640	48,306	0,080
-160	-7,631	0,033	250	17,178	0,076	650	49,109	0,080
-150	-7,279	0,035	260	17,942	0,076	660	49,911	0,080
-140	-6,907	0,037	270	18,710	0,077	670	50,713	0,080
-130	-6,516	0,039	280	19,481	0,077	680	51,513	0,080
-120	-6,107	0,042	290	20,256	0,078	690	52,312	0,080
-110	-5,680	0,043	300	21,033	0,078	700	53,110	0,080
-100	-5,237	0,044	310	21,814	0,078	710	53,907	0,080
-90	-4,777	0,046	320	22,597	0,078	720	54,703	0,080
-80	-4,301	0,048	330	23,383	0,079	730	55,498	0,079
-70	-3,811	0,049	340	24,171	0,079	740	56,291	0,079
-60	-3,306	0,051	350	24,961	0,079	750	57,083	0,079
-50	-2,787	0,052	360	25,754	0,079	760	57,873	0,079
-40	-2,254	0,053	370	26,549	0,080	770	58,663	0,079
-30	-1,709	0,055	380	27,345	0,080	780	59,451	0,079
-20	-1,151	0,056	390	28,143	0,080	790	60,237	0,079
-10	-0,581	0,057	400	28,943	0,080	800	61,022	0,078
±0	0	0,058	410	29,744	0,080	810	61,806	0,078
10	0,591	0,059	420	30,546	0,080	820	62,588	0,078
20	1,192	0,060	430	31,350	0,080	830	63,368	0,078
30	1,801	0,061	440	32,155	0,081	840	64,147	0,078
40	2,419	0,062	450	32,960	0,081	850	64,924	0,078
50	3,047	0,063	460	33,767	0,081	860	65,700	0,077
60	3,683	0,064	470	34,574	0,081	870	66,473	0,077
70	4,329	0,065	480	35,382	0,081	880	67,245	0,077
80	4,983	0,066	490	36,190	0,081	890	68,015	0,077
90	5,646	0,066	500	36,999	0,081	900	68,783	0,077
100	6,317	0,067	510	37,808	0,081	910	69,549	0,077
110	6,996	0,068	520	38,617	0,081	920	70,313	0,076
120	7,683	0,069	530	39,426	0,081	930	71,075	0,076
130	8,377	0,069	540	40,236	0,081	940	71,835	0,076
140	9,078	0,070	550	41,045	0,081	950	72,593	0,076
150	9,787	0,071	560	41,853	0,081	960	73,350	0,075
160	10,501	0,071	570	42,662	0,081	970	74,104	0,075
170	11,222	0,072	580	43,470	0,081	980	74,857	0,075
180	11,949	0,073	590	44,278	0,081	990	75,608	0,075
190	12,681	0,074	600	45,085	0,081	1000	76,358	0,075
200	13,419	0,074						

5. Основные величины т. э. д. с. для термопары PtRh10—Pt  
(по ДИН 43710 и IEC 65B.8)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
0	0		590	5,135		1180	11,707	
+10	+0,055	0,0055	600	5,237	0,0102	1190	11,827	0,0120
20	0,113	0,0058	610	5,339	0,0102	1200	11,947	0,0120
30	0,173	0,0060	620	5,442	0,0103	1210	12,067	0,0120
40	0,235	0,0062	630	5,544	0,0103	1220	12,188	0,0121
50	0,299	0,0064	640	5,648	0,0103	1230	12,308	0,0120
60	0,365	0,0066	650	5,751	0,0103	1240	12,429	0,0121
70	0,432	0,0067	660	5,855	0,0104	1250	12,550	0,0121
80	0,502	0,0070	670	5,960	0,0105	1260	12,671	0,0121
90	0,573	0,0071	680	6,064	0,0104	1270	12,792	0,0121
100	0,645	0,0072	690	6,169	0,0105	1280	12,913	0,0121
110	0,719	0,0074	700	6,274	0,0105	1290	13,034	0,0121
120	0,795	0,0076	710	6,380	0,0106	1300	13,155	0,0121
130	0,872	0,0077	720	6,486	0,0106	1310	13,276	0,0121
140	0,950	0,0078	730	6,592	0,0106	1320	13,397	0,0121
150	1,029	0,0079	740	6,699	0,0107	1330	13,519	0,0122
160	1,109	0,0080	750	6,805	0,0106	1340	13,640	0,0121
170	1,190	0,0081	760	6,913	0,0107	1350	13,761	0,0121
180	1,273	0,0083	770	7,020	0,0108	1360	13,883	0,0121
190	1,356	0,0083	780	7,128	0,0108	1370	14,004	0,0121
200	1,440	0,0084	790	7,236	0,0108	1380	14,125	0,0121
210	1,525	0,0085	800	7,345	0,0109	1390	14,247	0,0121
220	1,611	0,0086	810	7,454	0,0109	1400	14,368	0,0121
230	1,698	0,0087	820	7,563	0,0109	1410	14,489	0,0121
240	1,785	0,0087	830	7,672	0,0109	1420	14,610	0,0121
250	1,873	0,0088	840	7,782	0,0110	1430	14,731	0,0121
260	1,962	0,0089	850	7,892	0,0110	1440	14,852	0,0121
270	2,051	0,0089	860	8,003	0,0111	1450	14,973	0,0121
280	2,141	0,0090	870	8,114	0,0111	1460	15,094	0,0121
290	2,232	0,0091	880	8,225	0,0111	1470	15,215	0,0121
300	2,323	0,0091	890	8,336	0,0111	1480	15,336	0,0121
310	2,414	0,0091	900	8,448	0,0112	1490	15,456	0,0120
320	2,506	0,0092	910	8,560	0,0112	1500	15,576	0,0120
330	2,599	0,0093	920	8,673	0,0113	1510	15,697	0,0121
340	2,692	0,0093	930	8,786	0,0113	1520	15,817	0,0120
350	2,786	0,0094	940	8,899	0,0113	1530	15,937	0,0120
360	2,880	0,0094	950	9,012	0,0113	1540	16,056	0,0120
370	2,974	0,0094	960	9,126	0,0114	1550	16,176	0,0119
380	3,069	0,0095	970	9,240	0,0114	1560	16,296	0,0120
390	3,164	0,0095	980	9,355	0,0115	1570	16,415	0,0119
400	3,260	0,0096	990	9,470	0,0115	1580	16,534	0,0119
410	3,356	0,0096	1100	9,585	0,0115	1590	16,653	0,0119
420	3,452	0,0096	1010	9,700	0,0115	1600	16,771	0,0118
430	3,549	0,0097	1020	9,816	0,0116	1610	16,890	0,0119
440	3,645	0,0096	1030	9,932	0,0116	1620	17,008	0,0118
450	3,743	0,0098	1040	10,048	0,0116	1630	17,125	0,0117
460	3,840	0,0097	1050	10,165	0,0117	1640	17,243	0,0118
470	3,938	0,0098	1060	10,282	0,0117	1650	17,360	0,0117
480	4,036	0,0098	1070	10,400	0,0118	1660	17,477	0,0117
490	4,135	0,0099	1080	10,517	0,0117	1670	17,594	0,0117
500	4,234	0,0099	1090	10,635	0,0118	1680	17,711	0,0117
510	4,333	0,0099	1100	10,754	0,0119	1690	17,826	0,0115
520	4,432	0,0099	1110	10,872	0,0118	1700	17,942	0,0116
530	4,532	0,0100	1120	10,991	0,0119	1710	18,056	0,0114
540	4,632	0,0100	1130	11,110	0,0119	1720	18,170	0,0114
550	4,732	0,0100	1140	11,229	0,0119	1730	18,282	0,0112
560	4,832	0,0100	1150	11,348	0,0119	1740	18,394	0,0112
570	4,933	0,0101	1160	11,467	0,0119	1750	18,504	0,0110
580	5,034	0,0101	1170	11,587	0,0120	1760	18,612	0,0108

6. Основные величины т. э. д. с. для термопары PtRh13—Pt  
(по ДИН 43710 и IEC 65B.8)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
-50	-0,226		550	5,021		1150	12,532	
-40	-0,188	0,004	560	5,132	0,011	1160	12,669	0,014
-30	-0,145	0,004	570	5,244	0,011	1170	12,808	0,014
-20	-0,100	0,005	580	5,356	0,011	1180	12,946	0,014
-10	-0,051	0,005	590	5,469	0,011	1190	13,085	0,014
±0	0	0,005	600	5,582	0,011	1200	13,224	0,014
10	0,054	0,006	610	5,696	0,011	1210	13,363	0,014
20	0,111	0,006	620	5,810	0,012	1220	13,502	0,014
30	0,171	0,006	630	5,925	0,012	1230	13,642	0,014
40	0,232	0,006	640	6,040	0,012	1240	13,782	0,014
50	0,296	0,007	650	6,155	0,012	1250	13,922	0,014
60	0,363	0,007	660	6,272	0,012	1260	14,062	0,014
70	0,431	0,007	670	6,388	0,012	1270	14,202	0,014
80	0,501	0,007	680	6,505	0,012	1280	14,343	0,014
90	0,573	0,007	690	6,623	0,012	1290	14,483	0,014
100	0,647	0,008	700	6,741	0,012	1300	14,624	0,014
110	0,723	0,008	710	6,860	0,012	1310	14,765	0,014
120	0,800	0,008	720	6,979	0,012	1320	14,906	0,014
130	0,879	0,008	730	7,098	0,012	1330	15,047	0,014
140	0,959	0,008	740	7,218	0,012	1340	15,188	0,014
150	1,041	0,008	750	7,339	0,012	1350	15,329	0,014
160	1,124	0,008	760	7,460	0,012	1360	15,470	0,014
170	1,208	0,008	770	7,582	0,012	1370	15,611	0,014
180	1,294	0,009	780	7,703	0,012	1380	15,752	0,014
190	1,380	0,009	790	7,826	0,012	1390	15,893	0,014
200	1,468	0,009	800	7,949	0,012	1400	16,035	0,014
210	1,558	0,009	810	8,072	0,012	1410	16,176	0,014
220	1,647	0,009	820	8,196	0,012	1420	16,317	0,014
230	1,738	0,009	830	8,320	0,012	1430	16,458	0,014
240	1,830	0,009	840	8,445	0,013	1440	16,599	0,014
250	1,923	0,009	850	8,570	0,013	1450	16,741	0,014
260	2,017	0,009	860	8,696	0,013	1460	16,882	0,014
270	2,111	0,009	870	8,822	0,013	1470	17,022	0,014
280	2,207	0,010	880	8,949	0,013	1480	17,163	0,014
290	2,303	0,010	890	9,076	0,013	1490	17,304	0,014
300	2,400	0,010	900	9,203	0,013	1500	17,445	0,014
310	2,498	0,010	910	9,331	0,013	1510	17,585	0,014
320	2,596	0,010	920	9,460	0,013	1520	17,726	0,014
330	2,695	0,010	930	9,589	0,013	1530	17,866	0,014
340	2,795	0,010	940	9,718	0,013	1540	18,006	0,014
350	2,896	0,010	950	9,848	0,013	1550	18,146	0,014
360	2,997	0,010	960	9,978	0,013	1560	18,286	0,014
370	3,099	0,010	970	10,109	0,013	1570	18,425	0,014
380	3,201	0,010	980	10,240	0,013	1580	18,564	0,014
390	3,304	0,010	990	10,371	0,013	1590	18,703	0,014
400	3,407	0,010	1000	10,503	0,013	1600	18,842	0,014
410	3,511	0,011	1010	10,636	0,013	1610	18,981	0,014
420	3,616	0,011	1020	10,768	0,013	1620	19,119	0,014
430	3,721	0,011	1030	10,902	0,013	1630	19,257	0,014
440	3,826	0,011	1040	11,035	0,013	1640	19,395	0,014
450	3,933	0,011	1050	11,170	0,014	1650	19,533	0,014
460	4,039	0,011	1060	11,304	0,013	1660	19,670	0,014
470	4,146	0,011	1070	11,439	0,014	1670	19,807	0,014
480	4,254	0,011	1080	11,574	0,014	1680	19,944	0,014
490	4,362	0,011	1090	11,710	0,014	1690	20,080	0,014
500	4,471	0,011	1100	11,846	0,014	1700	20,215	0,014
510	4,580	0,011	1110	11,983	0,014	1710	20,350	0,013
520	4,689	0,011	1120	12,119	0,014	1720	20,483	0,013
530	4,799	0,011	1130	12,257	0,014	1730	20,616	0,013
540	4,910	0,011	1140	12,394	0,014	1740	20,748	0,013

7. Основные величины т. э. д. с. для термопары PtRh30—PtRh6  
(по IEC 65.B8)

°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C	°C	мВ	мВ/°C
0	0		610	1,851		1210	6,887	
10	-0,002		620	1,912	0,0061	1220	6,991	0,0104
20	-0,003		630	1,974	0,0062	1230	7,096	0,0105
30	-0,002	0,0001	640	2,036	0,0062	1240	7,202	0,0106
40	0	0,0001	650	2,100	0,0062	1250	7,308	0,0106
50	0,002	0,0002	660	2,164	0,0064	1260	7,414	0,0106
60	0,006	0,0002	670	2,230	0,0066	1270	7,521	0,0107
70	0,011	0,0004	680	2,296	0,0066	1280	7,628	0,0107
80	0,017	0,0005	690	2,363	0,0067	1290	7,736	0,0108
90	0,025	0,0006	700	2,430	0,0067	1300	7,845	0,0109
100	0,033	0,0008	710	2,499	0,0069	1310	7,953	0,0108
110	0,043	0,0008	720	2,569	0,0070	1320	8,063	0,0110
120	0,053	0,0010	730	2,639	0,0070	1330	8,172	0,0109
130	0,065	0,0010	740	2,710	0,0071	1340	8,283	0,0111
140	0,078	0,0012	750	2,782	0,0072	1350	8,393	0,0110
150	0,092	0,0013	760	2,855	0,0073	1360	8,504	0,0111
160	0,107	0,0014	770	2,928	0,0073	1370	8,616	0,0112
170	0,123	0,0015	780	3,003	0,0075	1380	8,727	0,0111
180	0,140	0,0016	790	3,078	0,0075	1390	8,839	0,0112
190	0,159	0,0017	800	3,154	0,0076	1400	8,952	0,0113
200	0,178	0,0019	810	3,231	0,0077	1410	9,065	0,0113
210	0,199	0,0019	820	3,308	0,0077	1420	9,178	0,0113
220	0,220	0,0021	830	3,387	0,0079	1430	9,291	0,0113
230	0,243	0,0021	840	3,466	0,0079	1440	9,405	0,0114
240	0,266	0,0023	850	3,546	0,0080	1450	9,519	0,0114
250	0,291	0,0023	860	3,626	0,0080	1460	9,634	0,0115
260	0,317	0,0025	870	3,708	0,0082	1470	9,748	0,0114
270	0,344	0,0026	880	3,790	0,0082	1480	9,863	0,0115
280	0,372	0,0027	890	3,873	0,0083	1490	9,979	0,0116
290	0,401	0,0028	900	3,957	0,0084	1500	10,094	0,0115
300	0,431	0,0029	910	4,041	0,0084	1510	10,210	0,0116
310	0,462	0,0030	920	4,126	0,0085	1520	10,325	0,0116
320	0,494	0,0031	930	4,212	0,0086	1530	10,441	0,0116
330	0,527	0,0032	940	4,298	0,0086	1540	10,558	0,0117
340	0,561	0,0033	950	4,386	0,0088	1550	10,674	0,0116
350	0,596	0,0034	960	4,474	0,0088	1560	10,790	0,0116
360	0,632	0,0035	970	4,562	0,0088	1570	10,907	0,0117
370	0,669	0,0036	980	4,652	0,0090	1580	11,024	0,0117
380	0,707	0,0037	990	4,742	0,0090	1590	11,141	0,0117
390	0,746	0,0038	1000	4,833	0,0091	1600	11,257	0,0116
400	0,786	0,0039	1010	4,924	0,0091	1610	11,374	0,0117
410	0,827	0,0040	1020	5,016	0,0092	1620	11,491	0,0117
420	0,870	0,0041	1030	5,109	0,0093	1630	11,608	0,0117
430	0,913	0,0043	1040	5,202	0,0093	1640	11,725	0,0117
440	0,957	0,0043	1050	5,297	0,0095	1650	11,842	0,0117
450	1,002	0,0044	1060	5,391	0,0094	1660	11,959	0,0117
460	1,048	0,0045	1070	5,487	0,0096	1670	12,076	0,0117
470	1,095	0,0046	1080	5,583	0,0096	1680	12,193	0,0117
480	1,143	0,0047	1090	5,680	0,0097	1690	12,310	0,0117
490	1,192	0,0048	1100	5,777	0,0097	1700	12,426	0,0116
500	1,241	0,0049	1110	5,875	0,0098	1710	12,543	0,0117
510	1,292	0,0049	1120	5,973	0,0098	1720	12,659	0,0116
520	1,344	0,0051	1130	6,073	0,0100	1730	12,776	0,0117
530	1,397	0,0052	1140	6,172	0,0099	1740	12,892	0,0116
540	1,450	0,0053	1150	6,273	0,0101	1750	13,008	0,0116
550	1,505	0,0053	1160	6,374	0,0101	1760	13,124	0,0115
560	1,560	0,0055	1170	6,475	0,0101	1770	13,239	0,0115
570	1,617	0,0055	1180	6,577	0,0102	1780	13,354	0,0115
580	1,674	0,0057	1190	6,680	0,0103	1790	13,470	0,0116
590	1,732	0,0057	1200	6,783	0,0103	1800	13,585	0,0115
600	1,791	0,0058			0,0104			
		0,0059						
		0,0060						

8. Основные величины для измерительного резистора платинового термометра сопротивления (по ДИН 43710)

Продолжение прилож.

°C	Ом	Ом/°C	°C	Ом	Ом/°C	°C	Ом	Ом/°C
220	10,41	0,395	140	153,57	0,375	+500	280,93	0,332
210	14,36	0,417	150	157,32	0,373	510	284,26	0,332
-200	18,53	0,425	160	161,04	0,371	520	287,57	0,330
190	22,78	0,427	170	164,76	0,371	530	290,87	0,329
180	27,05	0,423	180	168,47	0,369	540	294,16	0,327
170	31,28	0,420	190	172,16	0,368	550	297,43	0,327
160	35,48	0,417	200	175,84	0,367	560	300,70	0,325
150	39,65	0,415	210	179,51	0,366	570	303,95	0,325
140	43,80	0,413	220	183,17	0,365	580	307,20	0,323
130	47,93	0,411	230	186,82	0,364	590	310,43	0,322
120	52,04	0,509	240	190,46	0,362	+600	313,65	0,321
110	56,13	0,407	250	194,08	0,362	610	316,86	0,319
-100	60,20	0,405	260	197,70	0,360	620	320,05	0,319
90	64,25	0,403	270	201,30	0,358	630	323,24	0,317
80	68,28	0,401	280	204,88	0,358	640	326,41	0,316
70	72,29	0,399	290	208,46	0,357	650	329,57	0,315
60	76,28	0,397	+300	212,03	0,355	660	332,72	0,314
50	80,25	0,396	310	215,58	0,355	670	335,86	0,313
40	84,21	0,396	320	219,13	0,353	680	338,99	0,311
30	88,17	0,396	330	222,66	0,352	690	342,10	0,311
20	92,13	0,394	340	226,18	0,351	+700	345,21	0,309
10	96,07	0,393	350	229,69	0,350	710	348,30	0,308
±0	100,00	0,390	360	233,19	0,348	720	351,38	0,307
10	103,90	0,389	370	236,67	0,348	730	354,45	0,306
20	107,79	0,389	380	240,15	0,346	740	357,51	0,304
30	111,67	0,387	390	243,61	0,345	750	360,55	0,304
40	115,54	0,386	+400	247,06	0,344	760	363,59	0,304
50	119,40	0,384	410	250,50	0,343	770	366,61	0,302
60	123,24	0,383	420	253,93	0,341	780	369,62	0,301
70	127,07	0,382	430	257,34	0,341	790	372,62	0,300
80	130,89	0,381	440	260,75	0,339	+800	375,61	0,299
90	134,70	0,380	450	264,14	0,338	810	378,59	0,298
+100	138,50	0,378	460	267,52	0,337	820	381,55	0,296
110	142,28	0,378	470	270,89	0,336	830	384,50	0,295
120	146,06	0,376	480	274,25	0,335	840	387,45	0,295
130	149,82	0,375	490	277,60	0,333	850	390,38	0,293

9. Основные величины для измерительного резистора никелевого термометра сопротивления (по ДИН 43760)

°C	Ом	Ом/°C	°C	Ом	Ом/°C	°C	Ом	Ом/°C
-60	69,5	0,47	30	117,1	0,59	120	175,9	0,74
-50	74,2	0,49	40	123,0	0,61	130	183,3	0,76
-40	79,1	0,50	50	129,1	0,62	140	190,9	0,78
-30	84,1	0,52	60	135,3	0,63	150	198,7	0,80
-20	89,3	0,53	70	141,6	0,66	160	206,7	0,82
-10	94,6	0,54	80	148,2	0,67	170	214,9	0,82
0	100,0	0,56	90	154,9	0,68	180	223,1	
+10	105,6	0,57	+100	161,7	0,70			
20	111,3	0,58	110	168,7	0,72			

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная интенсивность непрерывного излучения** 515  
**Абсолютно черное тело** 342, 508  
— **черный излучатель** 342  
**Алюминий, экструзия** 477  
**Анализ излучения стали** 463  
**Аналоговый сигнал** 159  
**Арматура для монтажа пирометров** 453—455  
**Видикон** 496  
**Визирная труба** 454  
**Вина закон смещения** 346  
**Вращающиеся секторы** 378  
**Время переходного процесса** 261  
— **установления показаний** 56  
**Вторичный эталон** 384  
**Высокополимерные материалы:**  
коэффициент пропускания 474  
полосы поглощения 475  
излучательная способность в зависимости от толщины 475  
**Газовое излучение** 488  
**Гальванометры для технических измерений** 162, 163  
**Гауссова кривая нормального распределения** 12  
**Германиевые фотоэлементы** 407  
**Глаз человека, спектральная чувствительность** 378  
**Глубина погружения** 37, 38  
— **проникновения излучения** 342  
**Голография** 516  
**Голая термоприемник** 404  
**Градуировка пирометров излучения:**  
по черному телу 449  
для низких температур 451  
с использованием вольфрамовой лампы накаливания 449  
— — **угольных трубчатых печей** 450  
**эталонных пирометров излучения** 457  
**Депрессия** 33  
**Джозефсона электронный туннельный эффект** 29  
**Диаграмма плотности частиц для азота по Берхорну** 512  
**Допплера эффект** 515, 517  
**Дьюара сосуд** 102, 205  
**Жидкие кристаллы** 148, 149  
**Законы:**  
аддитивности т. э. д. с. 66  
гиперболического косинуса 245  
гомогенного контура 65  
излучения 345  
наложения Гевеса и Клостерхальфена 243  
промежуточного проводника 66  
суперпозиции 243, 250  
Заха уравнение 508  
**Защитная арматура** 39  
**Зегера конусы** 150  
**Зеркальная оптическая система** 433  
**Зеркальный отражатель** 393  
**Излучательная способность:**  
введение поправок 442—446  
для данной области спектра 345  
суммарная 345  
пламени 488  
тел 355  
**Изолирующие материалы** 89  
**Импульсные лазеры** 517  
**Интенсивность непрерывного спектра** 515  
**Интерференционные зеркала, коэффициент пропускания** 393  
**Интерференционный полосовой фильтр** 393, 394  
**Инфракрасная микропирометрия** 480  
**Инфракрасные излучатели** 476  
— **камеры, характеристики** 501—503  
— **сушильные печи** 472  
**Ионизация** 513  
**Искусственное волокно** 478  
**Истинные полупроводники — фоторезисторы** 406  
**Калориметры** 314  
**Каллендера—Гриффитса мост** 172  
**Капилляр:**  
самокомпенсирующий 53  
требования 35, 37  
**Капиллярные трубопроводы** 51  
**Карно цикл** 19  
**Карлова метод** 319  
**Кататермометр** 304  
**Квант измерения** 188  
**Кельвина температура** 19  
**Керамическая промышленность** 466  
**Классификация пирометров излучения** 352  
**Клинкерная пыль** 465  
**Компенсаторы:**  
автоматический мостовой 165  
технические 164, 171, 172  
**Компенсационные приборы (самоуравновешивающиеся)** 106, 107  
**Компенсационные провода:**  
общие сведения 89, 97, 98  
виды 98  
конструкция 100  
маркировка 100  
погрешность 101  
**Компенсация полная** 53  
— **частичная** 53  
**Константы излучения** 344

Контроль температуры:  
взрывоопасные помещения 338  
вращающаяся трубчатая печь 465  
высоковольтные линии электропередачи, соединительные узлы 478  
высокочастотная установка для сварки труб 466  
доменная печь 456, 457  
засыпная шахта 470  
индукционные вакуумные печи 465  
конверторы 459  
космическая техника 502  
лакирование проволоки 478  
литейные цехи 462  
мартеновская печь 458  
непрерывное литье 457  
проволочные станы 465  
процесс «Флоат» 470  
рольганг 461, 462  
роторы электродвигателей, температура пазов 479  
цементная промышленность 465  
центрифуги 479  
чистовая линия прокатного стана 462

Коэффициенты:  
коррекции 97  
отражения 342  
поглощения 342  
— пламени 487  
— спектральный 342  
теплопередачи 252  
— внутренний 256  
— кажущийся 256, 258  
трения 236

Красное стекло RG2 377  
Кремниевые полупроводники 465  
— фотоэлементы 408  
Кривая нагрузочной способности 230, 231  
— статического нагружения 230  
Крюгера формула 329  
Курлбаума метод (метод обращения) 488  
Кюри—Вейса закон 151  
Лазерное излучение, рассеяние 516  
Ламберта—Буге закон 342  
Ламберта закон 345  
Ларенца метод 514  
Линеаризация температурных показателей 177  
— характеристики шкалы 433  
Логометрические измерительные приборы 185  
Медицинские измерения 479  
Мера кровоснабжения тканей 325, 334  
— чувствительности приемника излучения 363  
Мерита коэффициента 397  
— фактор 400

Место установки (монтажа), понятие 8  
Методы:  
автоматически уравнивающиеся моста 174  
амперметра по Линдек—Роте 164  
гальванометра 107, 159, 182  
— с частичной компенсацией 116  
дифференциальный 368  
емкостной 151  
заслонки 285  
изменения частоты 296  
индукционный 151, 152  
компенсационный 97, 115, 163, 171  
нагревательной решетки 285, 290  
определения температуры режущей кромки 330  
последовательного сокращения 299  
потенциометра по Погендорфу 164  
релаксационные 513  
трехточечной компенсации 187  
уравненного моста 172, 173

Микропиrometer 379  
Многослойные фильтры 393  
Модуляция выходного сигнала 431  
Молекулярные линии 511  
Мосты измерительные:  
переменного тока 173  
постоянного тока 172  
уравнивающиеся автоматически 174

Мюллера мост 172  
Нагревательные колодцы 461  
Направление излучения 345  
Нуль-гальванометр 163  
Окружающая среда, влияние при измерении температуры 369  
Окуляр по Гюйгенсу 377  
Оптико-механические сканирующие системы 496  
Осцилляция молекул 507  
Оценка степени ожогов и обмораживания 500  
Параллакс 47  
Параметры биметаллов 59, 60  
— термометра 258, 263  
Паропровод высокого давления 495  
Пельтье и Томсона эффект 62  
— коэффициент 63  
Печь для нормализации 462  
Пинч 505  
Пирометрические лампы с вольфрамовой нитью 382  
Пирометры:  
особенности 353  
«Ардокол» 435  
«Ардонокс» 427  
Ардометр 425  
Ардофот 429  
Ваннера полутеневого 375  
визуальный 386

- спектрального отношения 386
- цветовой Назэра 386
- яркостной 380
- двухзеркальный «Рейотьюб» 428
- для измерения высоких температур 425
- — низких температур 377, 431
- — характеристики 410—424
- инфракрасный 480
- квазимонохроматический (яркостной) 352, 359
- — влияние окружающей среды 370
- компенсация влияния температуры корпуса на выходной сигнал 431
- корпус, влияние температуры на показания 366
- наклон 364
- оптическая система 388
- параллельное смещение 364
- первичный эталонный 384
- «Пирадио» 427
- «Пиро» 427
- полного излучения 352
- — влияние окружающей среды 370
- рефлекторный 388, 427
- рефракторный 426
- с диафрагмой 388
- исчезающей нитью 376
- телеобъективом 379
- термоэлектрическим приемником излучения 426
- установочной арматурой 454
- спектрального отношения 352, 410—425, 434, 447
- распределения 352, 386
- трехцветовой 446
- цветовой 9, 352
- частичного излучения 352
- энергетический 9, 10, 17, 409—424
- яркостной автоматический с исчезающей нитью 433
- оптический 375
- Пироскопы 150
- Погрешность:
  - градуировочная 18
  - динамическая 271—273, 276, 291—293
  - квантования 188
  - собственная (основная) прибора 385
  - сопротивления цепи 113
  - статическая 240
  - суммарная 14
- Погрешность измерения:
  - понятие 10
  - вследствие теплоотвода 244
  - пирометров 353, 355—357, 382, 439, 440, 457
  - предельная 379, 380
- систематическая 10, 11
- случайная 11, 12, 41, 42
- теоретическая 13
- термометров 244—248, 264, 265, 267, 271
- Пределы допустимой погрешности 14, 379, 380
- — — пирометров 439, 440, 492
- — — термометров 56
- Плазма 507
  - нестационарная 509
  - спектроскопия 505
  - стационарная 508
  - температура 508
- Планка закон излучения 345
- Плотность вращательных состояний 511
  - излучения 344
  - ионов 515
  - частиц 513, 516
  - электронов 515
- Поглощение излучения 516
- Позисторы 127, 138, 139
- Показатель визирования 388
  - преломления 566
- Поларадиатор 444
- Полосчатый (многолинейчатый) спектр 506
- Поправка на выступающий столбик жидкости 43—46
  - показаний измерительного прибора 10
- Предельная длина волны 363
- Преломление излучения 506
- Преобразователи:
  - аналого-цифровой 159, 190, 195
  - измерительный 171
  - интегрирующий 192
  - кода 189
  - следающий 192
  - ступенчатый 191
- Приборы ночного видения 495
- Приемники излучения:
  - характеристики 394, 398, 399
  - добротность 395
  - избирательность 395, 398
  - удельная 397
  - из примесных полупроводников 406
  - напряжение шумов 397
  - термоэлектрические 400
  - термические 400
  - чувствительность 395, 396
  - порог по температуре 398
- Приемники инфракрасного излучения 406
- Применение пирометров излучения 452
- Равновесие:
  - излучения 508
  - локальное термодинамическое 509
  - — парциальное 509

- термическое 509
  - различных частиц, взаимное 508
  - степеней свободы частиц 508
- Радиационная температура 352
- Разность температур, эквивалентная шумам 500
- Ранке—Хильша эффект 313
- Распределение температуры 497
- Редуцирование излучения 378
- Резисторы измерительные 126, 130—134
- Рентгеновские лучи 516
- Рэля—Джинса формула 346
- Световоды 391
- Селективно излучающие тела 350
- Селективные излучатели 349
- Селективный фильтр 352
- Селекторы излучения 392, 393
- Серый излучатель 350
- Сопrotивление цепи 110, 112, 114
  - образцовое 141
  - эффективное демпфирующее 160
- Спектральная излучательная способность:
  - понятие 343
  - различных объектов 473
- Спектральная интенсивность излучения 506
- Спектральные линии:
  - интенсивность 512—514
  - абсолютная 513
  - профиль 515
  - оптически плотные 515
- Спектральный коэффициент поглощения пламени 488
- Спектроскопические степени свободы 506
- Способ погружения 457
- Стеклоплавильные ванны 469
- Степень ионизации 513
- Стефана—Больцмана закон 347
- Сторонние источники излучения 369
- Текстильные нити 478
- Телевизионные методы 496
- Темновой ток 405
- Температура 506
  - абсолютная 18
  - атомов и ионов 508
  - возбуждения электронных состояний 507
  - вращения 506
  - газа 508
  - диссоциации 507
  - затвердевания золота 448
  - ионизации 507
  - колебаний 507
  - молекулярная 508
  - пламен 486
  - проволоки 465
  - сверхвысокая 505
- спектрального отношения 351
- тяжелых частиц 508
- условная 350
- частичного излучения 351
- электронная 507
- яркостная 350
- Температурные лампы 382
- Тепловое излучение 342
- Теплопроводность материалов 322
- Термисторы 127, 137, 138, 403
- Термическая модель 335
- Термические приемники излучения:
  - биметаллические 404
  - болометрические 402
  - пирозлектрические 403
  - пневматические 404
  - термоэлектрические 400
- Термическое старение 46
- Термобаллон 55
- Термобатарея 116
- Термография 503
- Термодинамическое равновесие 506
- Термоиндикаторы 9
- Термометры:
  - понятие 8, 16
  - акустический 29
  - Бекмана 40
  - вихревой 313
  - вспомогательный 43
  - вставка с байонетным соединением 95
  - градуированный при полном погружении 43
  - — частичном погружении 44
  - давления по Гебелю 311
  - для кратковременных измерений 38
  - — — лабораторный 38
  - — — прецизионный 38
  - — — с конусным переходником 38, 39
  - калориметрический 38
  - кварцевый 195, 196
  - кипения 38
  - контактный 33, 41, 325
  - магнитный 30
  - манометрический 16, 27, 48
  - газовый 21, 57
  - жидкостный 48
  - паровой 54
  - медицинский 40, 325
  - метастатический 40
  - метеорологический 39
  - образцовый 202
  - отсасывающий 493
  - пазовый 134
  - поверхностного действия 278, 293
  - проточный 94
  - расширения 58
  - биметаллический 17, 59
  - дилатометрический 17, 58

**резонансный 30**  
с несмачивающей термометрической жидкостью 34  
— усредняющим действием 276, 278  
— смачивающей термометрической жидкостью 34  
сопротивления 9  
— обложечный 129  
— платиновый 22, 27, 129, 130  
— полупроводниковый 28  
стеклянный 35, 39  
— жидкостный 35, 39  
— опрокидывающийся 41  
— палочный 35  
— промышленный 39  
— расширения 33  
— со вложенной шкалой 35  
термоэлектрический 9, 17, 62, 88  
— высокого давления 306  
— игольчатый 322  
— прямой 93  
— угловой 39, 94  
— — продольно обтекаемый 313  
— штыковой 322  
торсионный биметаллический 61, 62  
трубчатый 88, 94  
экстремальный 40  
— максимальный 40  
— максимально-минимальный 41  
— минимальный 41  
Термометрическая жидкость 34, 49, 54  
— — несмачивающая 49, 54  
— — смачивающая 49, 54  
Термопары:  
понятие 28, 68—78  
аттестация 79  
дифференциальная 139  
допустимые отклонения 78, 79  
из благородных металлов 83  
— неблагородных металлов 83, 84  
— тугоплавких металлов 85, 86  
— — неметаллических соединений 86, 87  
свойства 80  
стабилизация 81  
тонкопленочная 95  
Термокарандаши 146  
Термостаты 102, 104  
Термочувствительная бумага 149  
— краска 146  
Термоэлектрических потенциалов ряд 64, 65  
Термоэлектроды 66, 67  
Томпсоновское рассеяние 517  
Томпсона коэффициент 63  
Трубки катодные с памятью изображения 496  
Т. э. д. с. разбаланса 117

**Ультрафиолетовое излучение 443**  
Усилители:  
гальванометрические 168  
измерительные 168  
магнитные 169  
с вибропреобразователями 169  
Устройства для запоминания максимальных показаний 439  
— — усреднения показаний 439  
Фиксирование точки МПТШ 22, 23  
Фильтры для ограничения длины волны излучения 468  
Формулы пересчета, интерполяционные и экстраполяционные 22  
Фотоболометр 403  
Фотодиоды 407  
Фоторезисторы 406  
Фототранзистор 408  
Фотоумножители (фотоэлектронные умножители) 405  
Фотоэлектрические (квантовые) приемники излучения 404  
Фотоэлементы 405, 408  
— селеновые 408  
Характеристическая длина волны 361  
Цветовой светофильтр 377  
Цветовая температура 351  
Цветовой пирометр по Нэзеру 387  
Цельсия температура 19  
Цифровые индикаторы 189  
Чехлы защитные:  
характеристика 210, 211, 213, 221, 225  
материалы 214, 215  
механическая прочность 223  
типы 221, 223, 224  
**Шкалы температурные:**  
водородная 18  
логарифмическая 19  
пирометров излучения 429  
термодинамическая 19  
Шлирен-метод 516  
Шмидта метод 487  
Эвапорограф 495  
Эквивалентная мощность рассеянного излучения 397, 500  
Электрическая дуга 505  
Электрический кабель 337  
— — температура жил 338  
Энергетическая освещенность 344  
— сила света 344  
— яркость (лучистость) 344, 359  
— — Солнца 476  
Энергия излучения 344  
Эталонная лампа 377  
Эффективная длина волны, температурная зависимость 359  
Яркость 497

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	5
Предисловие . . . . .	6
<b>1. Введение (Ф. Линевер)</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1. Требования к средствам измерения температуры . . . . .	8
1.2. Погрешность и предел допустимой погрешности . . . . .	10
Библиографический указатель . . . . .	15
<b>2. Основы техники измерения температуры (Ф. Линевер)</b> . . . . .	<b>16</b>
2.1. Из истории возникновения и развития техники измерения температуры . . . . .	16
2.1.1. Термометры . . . . .	16
2.1.2. Температурные шкалы . . . . .	17
2.2. Термодинамическая и Международная практическая температурные шкалы . . . . .	20
2.2.1. Единицы измерения температуры, условные обозначения, расчетные уравнения . . . . .	20
2.2.2. Газовый термометр и реализация термодинамической температурной шкалы Кельвина . . . . .	20
2.2.3. Международная практическая температурная шкала (МПТШ) . . . . .	21
2.2.4. Различия между значениями температур по Международным температурным шкалам и погрешности измерения . . . . .	25
2.2.5. Расширение Международной температурной шкалы до температур ниже 0,2 К . . . . .	27
2.2.6. Методы и средства измерения температур в диапазоне от 90 до $10^{-2}$ К . . . . .	27
Библиографический указатель . . . . .	30
<b>3. Контактные термометры</b> . . . . .	<b>33</b>
3.1. Термометры расширения . . . . .	33
3.1.1. Жидкостные стеклянные термометры . . . . .	33
3.1.1.1. Принцип действия и устройство . . . . .	33
3.1.1.1.1. Требования к свойствам стекла . . . . .	33
3.1.1.1.2. Требования к термометрическим жидкостям . . . . .	34
3.1.1.1.3. Конструктивное исполнение термометров со вложенной шкалой и палочных термометров . . . . .	35
3.1.1.1.4. Конструктивное исполнение термометров для кратковременных измерений . . . . .	38
3.1.1.2. Погрешности измерений и поправки . . . . .	41
3.1.1.2.1. Пределы допустимой погрешности и случайная погрешность измерения . . . . .	41
3.1.1.2.2. Погрешность столбика термометрической жидкости и ее учет . . . . .	43
3.1.1.2.3. Другие факторы, влияющие на точность измерений, их учет и способы их устранения . . . . .	46
3.1.1.2.4. Внесение поправок в показания при поверке термометров . . . . .	47
3.1.2. Манометрические термометры . . . . .	48
3.1.2.1. Жидкостные манометрические термометры . . . . .	48
3.1.2.1.1. Принцип действия и устройство . . . . .	48
3.1.2.1.2. Погрешности измерения и их корректировка . . . . .	52
3.1.2.2. Паровые манометрические термометры . . . . .	54
3.1.2.2.1. Принцип действия и устройство . . . . .	54
3.1.2.2.2. Погрешности измерения и их корректировка . . . . .	56
3.1.2.3. Газовые манометрические термометры . . . . .	57
3.1.3. Механические термометры расширения . . . . .	58

3.1.3.1.	Дилатометрические термометры расширения . . . . .	58
3.1.3.2.	Биметаллические термометры . . . . .	59
3.1.3.2.1.	Определение параметров биметаллов . . . . .	59
3.1.3.2.2.	Изготовление биметаллов и придание им требуемой формы . . . . .	
3.2.	Электрические термометры (Ф. Линевер) . . . . .	62
3.2.1.	Термоэлектрические термометры . . . . .	62
3.2.1.1.	Принцип действия . . . . .	62
3.2.1.1.1.	Теория термоэлектрических свойств термопары — эффекты Пельтье и Томпсона . . . . .	62
3.2.1.1.2.	Термоэлектрический ряд потенциалов . . . . .	64
3.2.1.1.3.	Требования к выбору компонентов сплавов для термоэлектродной проволоки . . . . .	65
3.2.1.1.4.	Принципы измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров . . . . .	65
3.2.1.2.	Общие требования к материалам для термопар . . . . .	66
3.2.1.2.1.	Влияние неомогенности . . . . .	67
3.2.1.2.2.	Устройство рабочих спаев термопар . . . . .	67
3.2.1.3.	Характеристики (таблицы основных величин) и допустимые отклонения . . . . .	67
3.2.1.3.1.	Таблицы основных величин . . . . .	67
3.2.1.3.2.	Допустимые отклонения . . . . .	78
3.2.1.3.3.	Учет отклонения температуры свободных концов термопары от нормальной температуры ( $0^{\circ}\text{C}$ ) . . . . .	80
3.2.1.4.	Состав и свойства термопар . . . . .	80
3.2.1.4.1.	Диаметр термоэлектродной проволоки . . . . .	80
3.2.1.4.2.	Общие сведения о составе, стабилизации, стабильности и интервале рабочих температур термопар . . . . .	80
3.2.1.4.3.	Термопары из благородных металлов . . . . .	83
3.2.1.4.4.	Термопары из благородных металлов . . . . .	84
3.2.1.4.5.	Термопары из тугоплавких металлов и сплавов . . . . .	85
3.2.1.4.6.	Термопары из тугоплавких неметаллических соединений (полупроводников) . . . . .	86
3.2.1.4.7.	Термопары для низкотемпературных измерений . . . . .	87
3.2.1.4.8.	Термопары для пирометров излучения . . . . .	88
3.2.1.5.	Конструкции термоэлектрических термометров . . . . .	88
3.2.1.5.1.	Армированные и неармированные термоэлектрические термометры . . . . .	88
3.2.1.5.2.	Изолирующие материалы для термоэлектродов . . . . .	89
3.2.1.5.3.	Оболочковые термоэлектрические термометры, их конструкция, размеры и применение . . . . .	91
3.2.1.5.4.	Прямые термоэлектрические термометры . . . . .	93
3.2.1.5.5.	Угловые термоэлектрические термометры . . . . .	94
3.2.1.5.6.	Другие виды конструкций для различных промышленных применений . . . . .	94
3.2.1.6.	Компенсация влияния температуры свободных концов термопары . . . . .	96
3.2.1.6.1.	Расчет влияния температуры свободных концов термопары . . . . .	96
3.2.1.6.2.	Компенсационные провода (материал, конструкция и погрешности измерения) . . . . .	97
3.2.1.6.3.	Компенсация влияния температуры свободных концов термопары . . . . .	102
3.2.1.7.	Учет и компенсация влияния сопротивления измерительной цепи . . . . .	107
3.2.1.7.1.	Метод гальванометра . . . . .	107
3.2.1.7.2.	Компенсационный метод и измерительный усилитель . . . . .	115
3.2.1.7.3.	Метод гальванометра с частичной компенсацией . . . . .	116
3.2.1.8.	Специальные схемы . . . . .	116
3.2.1.8.1.	Измерение градиентов температур, скорости и направления изменения температуры . . . . .	117
3.2.1.8.2.	Переключение термопар . . . . .	117

3.2.1.8.3.	Сигнализация обрыва цепи термопары . . . . .	117
3.2.1.9.	Погрешности термоэлектрических термометров . . . . .	118
3.2.1.9.1.	Обзор возможных погрешностей измерения . . . . .	119
3.2.1.9.2.	Влияние помех на точность измерения в технических установках . . . . .	120
3.2.2.	Термометры сопротивления . . . . .	121
3.2.2.1.	Принцип действия и материалы . . . . .	121
3.2.2.1.1.	Металлические термометры сопротивления . . . . .	122
3.2.2.1.2.	Полупроводниковые термометры сопротивления . . . . .	126
3.2.2.1.3.	Полупроводниковые материалы . . . . .	127
3.2.2.2.	Конструкции термометров сопротивления . . . . .	129
3.2.2.2.1.	Измерительный резистор . . . . .	129
3.2.2.2.2.	Измерительные резисторы для научных исследований. Эталонные измерительные резисторы . . . . .	129
3.2.2.2.3.	Измерительные резисторы со стеклянной изоляцией . . . . .	130
3.2.2.2.4.	Измерительные резисторы с керамической изоляцией . . . . .	131
3.2.2.2.5.	Конструкция и требования к защитной арматуре . . . . .	132
3.2.2.2.6.	Конструкции термометров сопротивления для специаль- ных измерений . . . . .	133
3.2.2.2.7.	Формы и конструкция термометров на термисторах . . . . .	135
3.2.2.2.8.	Метрологические свойства термисторов . . . . .	136
3.2.2.2.9.	Компенсация разброса величины сопротивления и линеа- ризация характеристики . . . . .	136
3.2.2.2.10.	Величина сопротивления термисторов, их применение и нестабильность . . . . .	137
3.2.2.2.11.	Устройство и применение позисторов . . . . .	138
3.2.2.3.	Влияние сопротивления соединительных проводов и его подгонка . . . . .	139
3.2.2.3.1.	Подстройка сопротивления и погрешность измерения при двухпроводной схеме соединения . . . . .	141
3.2.2.3.2.	Подстройка сопротивления и погрешность измерения при трех- и четырехпроводной схемах . . . . .	143
3.2.2.4.	Погрешность измерения от разогрева . . . . .	144
3.2.2.5.	Погрешности измерения и их пределы . . . . .	145
3.3.	Специальные методы измерения температуры (Г. Фанвор) . . . . .	146
3.3.1.	Термочувствительные краски, жидкие кристаллы, термо- бумага . . . . .	146
3.3.1.1.	Термочувствительные краски . . . . .	146
3.3.1.2.	Термочувствительные карандаши . . . . .	146
3.3.1.3.	Жидкие кристаллы . . . . .	148
3.3.1.4.	Термочувствительная бумага . . . . .	149
3.3.2.	Пироскопы . . . . .	150
3.3.2.1.	Конусы Зегера . . . . .	150
3.3.2.2.	Тела плавления . . . . .	150
3.3.3.	Емкостные, индуктивные и магнитные методы измерения температуры . . . . .	151
3.3.3.1.	Емкостный метод . . . . .	151
3.3.3.2.	Индукционный метод . . . . .	151
	Библиографический указатель . . . . .	152
4.	Аналоговые и цифровые методы измерения температуры . . . . .	159
4.1.	Аналоговый метод измерения и измерительные приборы (В. Хёне) . . . . .	159
4.1.1.	Измерение т. э. д. с. . . . .	159
4.1.1.1.	Метод гальванометра . . . . .	159
4.1.1.1.1.	Динамические характеристики магнитоэлектрических из- мерительных приборов . . . . .	159
4.1.1.1.2.	Расчет схемы для измерения т. э. д. с. . . . .	161
4.1.1.2.	Компенсационный метод . . . . .	163
4.1.1.2.1.	Компенсационный прибор для измерения методом потен- циометра . . . . .	164

4.1.1.2.2.	Расчет мостовой компенсационной схемы для измерения т. э. д. с. . . . .	165
4.1.1.2.3.	Компенсационные приборы для измерения методом ампер- метра, измерительные усилители и преобразователи . . . . .	167
4.1.2.	Измерение сопротивления термометров сопротивления . . . . .	171
4.1.2.1.	Компенсационные методы . . . . .	171
4.1.2.1.1.	Метод компенсации напряжения . . . . .	171
4.1.2.1.2.	Метод уравновешенного моста . . . . .	172
4.1.2.1.3.	Автоматические мостовые схемы и их расчет . . . . .	174
4.1.2.1.4.	Измерительные преобразователи для термометров сопро- тивления . . . . .	180
4.1.2.2.	Метод гальванометра . . . . .	182
4.1.2.2.1.	Мостовые схемы с магнитоэлектрическими гальваноме- трами и их расчет . . . . .	182
4.1.2.2.2.	Логометрический метод . . . . .	185
4.1.2.3.	Специальные схемы . . . . .	187
4.1.2.3.1.	Дифференциальные схемы измерения температуры . . . . .	187
4.1.2.3.2.	Переключение точек измерения . . . . .	188
4.2.	Цифровые методы измерения температуры (Г. Бройниг) . . . . .	188
4.2.1.	Цифровое представление результатов измерения и цифро- вые индикаторы . . . . .	188
4.2.2.	Методы аналого-цифрового преобразования . . . . .	190
4.2.2.1.	Ступенчатый преобразователь . . . . .	191
4.2.2.2.	Следящий преобразователь . . . . .	192
4.2.2.3.	Интегрирующие преобразователи . . . . .	192
4.2.3.	Цифровые устройства для измерения температуры . . . . .	193
4.2.3.1.	Линеаризация характеристик термометров сопротивле- ния . . . . .	194
4.2.3.2.	Кварцевый монокристаллический термометр . . . . .	195
4.2.4.	Обработка результатов измерения и вычислительные ма- шины для управления технологическими процессами . . . . .	197
	Библиографический указатель . . . . .	199
<b>5.</b>	<b>Методы и оборудование для поверки контактных термометров (Ф. Ли- невег) . . . . .</b>	<b>201</b>
5.1.	Общие требования . . . . .	201
5.2.	Поверка методом сравнения с образцовыми термометрами . . . . .	202
5.2.1.	Поверка в жидкостных ваннах . . . . .	202
5.2.2.	Поверка в трубчатых печах . . . . .	202
5.2.3.	Поверка в воздухе . . . . .	203
5.2.4.	Поверка термоэлектродной проволоки путем нагрева и сравнения с образцовой термопарой . . . . .	204
5.2.5.	Оценка результатов отдельных измерений . . . . .	204
5.3.	Поверка по фиксированным точкам . . . . .	204
5.3.1.	Поверка по точке таяния льда или по тройной точке воды . . . . .	205
5.3.2.	Поверка по точке кипения воды . . . . .	205
5.3.3.	Поверка по точке затвердевания металлов . . . . .	206
5.3.4.	Поверка методом плавления проволоки . . . . .	207
5.4.	Поверочные испытания электрических устройств для измерения тем- пературы . . . . .	207
	Библиографический указатель . . . . .	209
<b>6.</b>	<b>Защитная арматура для термометров . . . . .</b>	<b>210</b>
6.1.	Общие рекомендации (Ф. Линевег) . . . . .	210
6.2.	Стойкость защитной арматуры термометров к химическому воздей- ствию (Ф. Линевег) . . . . .	213
6.2.1.	Металлические материалы . . . . .	213
6.2.1.1.	Медьсодержащие материалы . . . . .	213
6.2.1.2.	Стали для солевых и металлических расплавов . . . . .	221

6.2.1.3.	Жаростойкие и стойкие против окисления материалы	221
6.2.1.4.	Материалы для измерительных вставок	222
6.2.1.5.	Защита от эрозии	222
6.2.2.	Керамические материалы	223
6.2.2.1.	Общие требования	223
6.2.2.2.	Свойства различных керамических материалов для защитных чехлов	223
6.3.	Механические нагрузки на защитную арматуру термометров (П. Дитрих)	224
6.3.1.	Материал защитных чехлов	225
6.3.2.	Энергоносители	226
6.3.3.	Расчет прочности погружной части защитного чехла	228
6.3.4.	Расчет устойчивости	230
6.3.5.	Кривые и диаграммы нагружения	230
6.3.6.	Расчет прочности резьбового штуцера	232
6.3.6.1.	Удерживаемые давления	233
6.3.6.2.	Нагрузочная способность резьбы	234
6.3.6.3.	Нагрузочная способность канавки для выхода резьбы	235
6.3.7.	Коэффициенты запаса прочности	236
6.3.8.	Резонансные колебания, вызванные потоком	237
	Библиографический указатель	238
7.	Статическое и динамическое влияние теплопередачи на показания термометров (Ф. Линевер)	240
7.1.	Влияние конструкции и способа монтажа термометра на его погрешность вследствие теплопередачи	240
7.1.1.	Расчет погрешности измерения, обусловленной теплопроводностью и излучением	241
7.1.1.1.	Погрешности измерения при установке термометров в трубопроводах. Защитная арматура без выступающих деталей	241
7.1.1.2.	Влияние теплового потока через дно защитного чехла на минимальную погрешность измерения вследствие отвода тепла	245
7.1.1.3.	Снижение погрешности измерения путем защиты от излучения	247
7.1.1.4.	Погрешности измерения при установке термометров в трубопроводах с частично выступающими деталями защитной арматуры	248
7.1.1.5.	Порядок расчета погрешности измерения, зависящей от способа монтажа, по закону суперпозиции	250
7.1.2.	Расчет погрешности измерения, зависящей от способа монтажа, в любых средах по характеристикам термометра	256
7.1.2.1.	Параметр термометра $V_T$ как мера погрешности, обусловленной теплопередачей	256
7.1.2.2.	Расчет параметра $V_T$ и кажущегося относительного коэффициента теплопередачи $\alpha_{xs}$	256
7.1.2.3.	Параметр термометра $K_T$ как мера погрешности, обусловленной отводом тепла	258
7.1.2.4.	Зависимость погрешности измерения от параметров $V_T$ и $K_T$	261
7.1.2.5.	Экспериментальное определение погрешности измерения, зависящей от способа монтажа, в воздухе и воде, а также в эксплуатационных условиях	263
7.1.3.	Выводы относительно конструкции и способа монтажа термометров	264
7.2.	Влияние теплопередачи при измерении температуры поверхности	266
7.2.1.	Расчет величины погрешности	266
7.2.2.	Предполагаемые погрешности измерения при различных способах размещения электрических термометров	268

7.2.3.	Измерение температуры поверхности путем нагрева арматуры термометра . . . . .	270
7.3.	Влияние теплопередачи на временные характеристики термометров . . . . .	271
7.3.1.	Расчет переходной функции на основании заюнов теплопередачи . . . . .	271
7.3.1.1.	Постоянная времени при экспоненциальной переходной функции . . . . .	272
7.3.1.2.	Расчет переходной функции для термометров и защитных чехлов различных типов . . . . .	273
7.3.1.3.	Термометры с усредняющим и поверхностным действием . . . . .	274
7.3.1.4.	Изображение переходной функции в полулогарифмических координатах . . . . .	276
7.3.2.	Выводы относительно конструкции малоинерционных термометров с учетом вторичных тепловых потоков . . . . .	276
7.3.3.	Расчет переходной функции для различных сред . . . . .	279
7.3.3.1.	Расчет переходной функции по переходной функции для одной эталонной среды . . . . .	279
7.3.3.2.	Расчет переходной функции по переходным функциям в двух эталонных средах . . . . .	280
7.3.4.	Снятие переходных функций . . . . .	281
7.3.4.1.	Общие требования . . . . .	281
7.3.4.2.	Проверка в воздухе и в воде при нормированных скоростях потока . . . . .	282
7.3.4.3.	Пересчет времен переходного процесса на нормированные значения . . . . .	282
7.3.4.4.	Времена переходного процесса и параметры $V_T$ для различных термометров . . . . .	284
7.3.4.5.	Испытательная установка для снятия переходных функций термометров . . . . .	284
7.3.5.	Переходная функция при зависящих от времени изменениях температуры . . . . .	291
7.3.5.1.	Линейное изменение температуры измеряемой среды . . . . .	292
7.3.5.2.	Экспоненциальное изменение температуры измеряемой среды . . . . .	292
7.3.5.3.	Периодические изменения температуры измеряемой среды . . . . .	293
7.3.6.	Аппроксимация экспериментально найденных переходных функций посредством постоянных времени . . . . .	295
7.3.6.1.	Представление переходных функций высшего порядка с помощью эквивалентных постоянных времени . . . . .	295
7.3.6.2.	Определение постоянных времени методом частотных характеристик . . . . .	296
7.3.6.3.	Аппроксимация переходной функции при помощи касательной в точке перегиба по временам запаздывания и выравнивания . . . . .	296
7.3.6.4.	Графическое определение постоянных времени путем изображения переходной функции в полулогарифмических координатах . . . . .	296
7.3.6.5.	Определение других постоянных времени методом последовательного сокращения . . . . .	299
7.3.6.6.	Определение постоянных времени при помощи таблицы типовых функций . . . . .	299
7.3.6.7.	Определение постоянных времени по алгоритму . . . . .	299
7.4.	Влияние теплопередачи на погрешность измерения вследствие нагрева термометра сопротивлением . . . . .	300
	Библиографический указатель . . . . .	300
8.	<b>Устройство и применение контактных термометров (Г. Фанвор) . . . . .</b>	<b>303</b>
8.1.	Измерение температуры газов и паров . . . . .	303
8.1.1.	Измерение температуры воздуха . . . . .	303
8.1.2.	Кондиционирование и метод измерения комфорта . . . . .	303

8.1.3.	Измерение температуры в сосудах, каналах и трубопроводах	305
8.1.4.	Рекомендации по выполнению измерений в промышленных условиях	305
8.1.5.	Устранение погрешности измерения вследствие отвода тепла путем нагрева монтажной зоны арматуры термометра	307
8.1.6.	Термометры проточного типа	309
8.1.7.	Измерение температуры высокоскоростных газовых потоков	312
8.2.	Измерение температуры жидкостей	314
8.3.	Измерение температуры расплавов	315
8.3.1.	Расплавы синтетических материалов	315
8.3.2.	Расплавы солей	316
8.3.3.	Расплавы стекла	316
8.3.4.	Расплавы легких металлов	317
8.3.5.	Расплавы черных и цветных металлов	317
8.4.	Измерение температуры поверхностей	320
8.4.1.	Измерение температуры неподвижных поверхностей	320
8.4.2.	Измерение температуры движущихся поверхностей	325
8.5.	Измерение температуры твердых тел	331
8.6.	Специальные измерения	334
8.6.1.	Измерение температуры обмоток трансформаторов и электрических машин	334
8.6.2.	Определение температуры с помощью термической модели	335
8.6.3.	Измерение температуры электрических кабелей	337
8.6.4.	Измерение температуры во взрывоопасных помещениях	338
	Библиографический указатель	340
<b>9.</b>	<b>Пирометры излучения (Ф. Линевер)</b>	<b>342</b>
9.1.	Основные законы излучения	342
9.1.1.	Тепловое излучение, основные понятия и константы	342
9.1.2.	Закон Кирхгофа	343
9.1.3.	Излучательная способность	343
9.1.4.	Законы излучения	345
9.1.5.	Безразмерная форма представления закона излучения Планка	347
9.1.6.	Серые и селективные излучатели	349
9.1.7.	Яркая и цветные температуры ( $T_s$ , $T_v$ , $T_f$ и $T_r$ )	350
9.1.8.	Температура частичного излучения и радиационная температура ( $T_b$ и $T_t$ )	351
9.2.	Классификация пирометров излучения	352
9.3.	Влияние излучательной способности на показания пирометров излучения	353
9.3.1.	Погрешность измерения, обусловленная неопределенностью величины спектральной излучательной способности $\epsilon_\lambda$	353
9.3.2.	Погрешность измерения, обусловленная неопределенностью величины суммарной излучательной способности $\epsilon_t$	355
9.3.3.	Погрешность измерения, обусловленная неопределенностью величины частичной излучательной способности $\epsilon_b$	356
9.3.4.	Погрешность измерения, обусловленная неопределенностью величины отношения $\epsilon_1/\epsilon_2$	357
9.4.	Эффективная и характеристическая длины волн пирометров излучения	359
9.4.1.	Эффективная длина волны $\lambda_e$	359
9.4.2.	Характеристическая длина волны $\lambda_{ch}$	361
9.5.	Расчет характеристики температуры — выходной сигнал пирометра	362
9.5.1.	Общие основы расчета	362
9.5.2.	Предельная длина волны пирометра $\lambda_{Gr}$	363

9.5.3.	Зависимость выходного сигнала от температуры корпуса пирометра . . . . .	364
9.5.4.	Компенсация влияния изменений температуры корпуса пирометра на его показания . . . . .	366
9.6.	Другие факторы, влияющие на показания пирометров излучения . . . . .	369
9.6.1.	Влияние сторонних источников излучения . . . . .	369
9.6.1.1.	Влияние излучения окружающей среды при измерении температур, мало отличающихся от температуры этой среды . . . . .	369
9.6.1.2.	Влияние излучения стен при нагреве изделий в печах . . . . .	371
9.6.2.	Влияние окалины на измерение температуры поверхности стальных слитков и проката . . . . .	372
9.6.3.	Влияние промежуточной среды . . . . .	374
9.7.	Конструктивное исполнение пирометров излучения . . . . .	375
9.7.1.	Субъективные (оптические) пирометры сравнения . . . . .	375
9.7.1.1.	Конструкция . . . . .	375
9.7.1.1.1.	Яростной оптический пирометр с исчезающей нитью . . . . .	375
9.7.1.1.2.	Пирометры с нейтральным клином . . . . .	376
9.7.1.1.3.	Эталонные лампы, оптика, светофильтры и редуцирующие элементы . . . . .	377
9.7.1.1.4.	Пирометрическое редуцирование . . . . .	378
9.7.1.1.5.	Микропирометр и пирометр с телеобъективом . . . . .	379
9.7.1.2.	Предельные погрешности, погрешности и пределы допустимой погрешности . . . . .	379
9.7.1.2.1.	Предельная погрешность определения температуры затвердевания золота . . . . .	382
9.7.1.2.2.	Свойства и пределы допустимой погрешности пирометрических ламп с вольфрамовой лентой . . . . .	382
9.7.1.2.3.	Погрешности, связанные с измерением силы тока и порогом контрастной чувствительности человеческого глаза. Погрешности градуировки и отклонения $\lambda_e$ . . . . .	384
9.7.1.2.4.	Допустимая погрешность яркостных оптических пирометров по OIML . . . . .	385
9.7.2.	Субъективные пирометры спектрального распределения (цветовые пирометры) . . . . .	386
9.7.3.	Энергетические пирометры с приемниками излучения . . . . .	387
9.7.3.1.	Оптическая система . . . . .	388
9.7.3.1.1.	Показатель визирования $d = a/D$ диафрагменных, рефлекторных и рефлекторных пирометров . . . . .	388
9.7.3.1.2.	Световоды . . . . .	391
9.7.3.1.3.	Поглощение излучения линзами и окошками . . . . .	391
9.7.3.1.4.	Селекторы излучения . . . . .	392
9.7.3.1.5.	Интерференционные фильтры . . . . .	393
9.7.3.2.	Приемники излучения . . . . .	394
9.7.3.2.1.	Основные характеристики приемников излучения . . . . .	395
9.7.3.2.1.1.	Чувствительность к излучению . . . . .	395
9.7.3.2.1.2.	Добротность и избирательность приемников излучения . . . . .	395
9.7.3.2.2.	Термические приемники излучения . . . . .	400
9.7.3.2.2.1.	Термоэлектрические приемники излучения . . . . .	400
9.7.3.2.2.2.	Болометрические приемники излучения . . . . .	402
9.7.3.2.2.3.	Пироэлектрические TGS-приемники излучения . . . . .	403
9.7.3.2.2.4.	Биметаллические и пневматические приемники излучения . . . . .	404
9.7.3.2.3.	Фотоэлектрические (квантовые) приемники излучения . . . . .	404
9.7.3.2.3.1.	Фотоэлементы и фотоумножители . . . . .	405
9.7.3.2.3.2.	Приемники инфракрасного излучения . . . . .	406
9.7.3.2.3.2.1.	Нелегированные истинные полупроводники-фоторезисторы . . . . .	406
9.7.3.2.3.2.2.	Приемники излучения из примесных полупроводников (фотодиоды, фототранзисторы, фотоэлементы) . . . . .	406

9.7.3.2.3.2.3.	Фотоэлектромагнитные и оптико-индукционные приемники излучения . . . . .	409
9.7.3.3.	Конструкции и метрологические характеристики технических энергетических пирометров излучения . . . . .	409
9.7.3.3.1.	Пирометры для измерения высоких температур с термоэлектрическими приемниками излучения . . . . .	425
9.7.3.3.2.	Пирометры с фотозементами . . . . .	430
9.7.3.3.3.	Энергетические пирометры для измерения низких температур . . . . .	431
9.7.3.3.4.	Автоматический яркостный пирометр с исчезающей нитью . . . . .	433
9.7.4.	Пирометры спектрального отношения . . . . .	434
9.7.4.1.	Погрешности измерения при различных длинах волн и излучательных способностях объектов . . . . .	434
9.7.4.2.	Принцип действия и устройство . . . . .	435
9.7.5.	Устройства для усреднения показаний и запоминания максимальных показаний . . . . .	439
9.7.6.	Погрешности измерения и пределы допустимой погрешности энергетических пирометров . . . . .	439
9.7.7.	Исключение влияния излучательной способности . . . . .	442
9.7.7.1.	Введение поправки с помощью переменного сопротивления . . . . .	442
9.7.7.2.	Исключение с помощью поляризационного фильтра . . . . .	443
9.7.7.3.	Исключение методом наложения стороннего излучения . . . . .	444
9.7.7.4.	Исключение при измерении пирометрами спектрального отношения . . . . .	446
9.8.	Методы испытаний и испытательные установки для технических пирометров излучения . . . . .	447
9.8.1.	Черные тела; градуировка эталонных пирометров . . . . .	447
9.8.2.	Градуировка пирометров по черному телу . . . . .	449
9.8.3.	Проверка яркостных пирометров при помощи пирометрических ламп с вольфрамовыми ленточными нитями накала . . . . .	451
9.9.	Техническое применение пирометров излучения . . . . .	452
9.9.1.	Измерение температур выше 600° С . . . . .	452
9.9.1.1.	Общие указания; применение оптических яркостных пирометров . . . . .	452
9.9.1.2.	Арматура для монтажа пирометров излучения . . . . .	453
9.9.2.	Измерения температуры на металлургических заводах . . . . .	456
9.9.2.1.	Доменная печь . . . . .	456
9.9.2.2.	Машины непрерывного литья заготовок . . . . .	457
9.9.2.3.	Сталеплавильные агрегаты . . . . .	458
9.9.2.3.1.	Мартеновская печь . . . . .	458
9.9.2.3.2.	Конверторы . . . . .	459
9.9.2.4.	Нагревательные колодцы, прокатные станы, проходные нагревательные печи . . . . .	461
9.9.2.5.	Литейный цех . . . . .	462
9.9.2.6.	Анализ излучения и качественная оценка расплава . . . . .	463
9.9.3.	Другие области применения в металлургии . . . . .	465
9.9.4.	Измерение температуры в керамической промышленности . . . . .	466
9.9.5.	Измерение температуры в цементной промышленности . . . . .	467
9.9.6.	Измерение температуры в стекольной промышленности . . . . .	468
9.9.6.1.	Пирометры излучения для измерения температуры стекла . . . . .	468
9.9.6.2.	Измерение температуры в стеклоплавильных ваннах . . . . .	469
9.9.6.3.	Измерение температуры в засыпной шахте . . . . .	470
9.9.6.4.	Измерение температуры капель стекла . . . . .	470
9.9.6.5.	Измерение температуры листового тянутого, катаного и литого стекла . . . . .	470
9.9.6.6.	Измерение температуры в инфракрасных сушильных печах . . . . .	472
9.9.7.	Измерение низких температур (ниже 600° С) . . . . .	472
9.9.7.1.	Общий обзор . . . . .	472

9.9.7.2. Высокополимерные материалы . . . . .	474
9.9.7.3. Контроль за процессами сушки и измерение температуры открытых пространств . . . . .	476
9.9.7.4. Измерение температуры в процессе экструзии алюминия . . . . .	477
9.9.7.5. Измерение температуры тонких нитей и проволок . . . . .	478
9.9.7.6. Измерение температуры роторов электрических машин и центрифуг . . . . .	479
9.9.7.7. Измерение температуры каландровых валков . . . . .	479
9.9.7.8. Измерение температуры человеческого тела . . . . .	479
9.9.7.9. Инфракрасная микропирометрия . . . . .	480
Библиографический указатель . . . . .	480
<b>10. Измерение температуры пламен (Г. Титце) . . . . .</b>	<b>486</b>
10.1. Измерение пирометрами излучения . . . . .	486
10.1.1. Пирометрия полного излучения . . . . .	486
10.1.2. Яркостная пирометрия . . . . .	488
10.1.3. Цветовая пирометрия . . . . .	489
10.2. Измерения с помощью термоэлектрических термометров . . . . .	490
10.2.1. Измерение температуры с помощью термоэлектрических зондов . . . . .	491
10.2.2. Отсасывающие термометры . . . . .	493
Библиографический указатель . . . . .	493
<b>11. Термография (В. Глокман) . . . . .</b>	<b>495</b>
11.1. Приборы для термографии . . . . .	495
11.1.1. Фотография и преобразователи изображения . . . . .	495
11.1.1.1. Фотография . . . . .	495
11.1.1.2. Электронно-оптические преобразователи изображения . . . . .	495
11.1.2. Телевизионные методы . . . . .	496
11.1.2.1. Телевизионные приемные трубки-видиконы . . . . .	496
11.1.2.2. Пирозлектрические тепловизоры . . . . .	496
11.1.2.3. Оптико-механические сканирующие системы . . . . .	496
11.2. Измерение температуры с помощью ИК-камер . . . . .	498
11.3. Модели ИК-камер . . . . .	500
11.4. Примеры применения . . . . .	500
Библиографический указатель . . . . .	503
<b>12. Измерение сверхвысоких температур (Х.-П. Попп) . . . . .</b>	<b>505</b>
12.1. Разграничение областей существования и методы измерения . . . . .	505
12.1.1. Область существования . . . . .	505
12.1.2. Методы измерения . . . . .	505
12.2. Температура и термодинамическое равновесие . . . . .	506
12.2.1. Термодинамические определения температуры . . . . .	506
12.2.2. Типы частиц и их спектроскопические степени свободы . . . . .	506
12.2.3. Предпосылки существования термодинамического равновесия . . . . .	508
12.2.4. Равновесное и неравновесное состояния реальной плазмы . . . . .	508
12.3. Пирометрические методы измерения . . . . .	510
12.4. Определение температуры по интенсивности спектральных линий . . . . .	511
12.4.1. Молекулярные линии . . . . .	511
12.4.2. Атомные и ионные линии . . . . .	512
12.5. Определение температуры по интенсивности непрерывного спектра . . . . .	515
12.6. Определение температуры по плотности частиц . . . . .	516
Библиографический указатель . . . . .	518
Приложение . . . . .	520
Предметный указатель . . . . .	529

ИБ № 1720

**Ф. ЛИНЕВГ**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ТЕХНИКЕ**

Перевод с немецкого

**Т. И. Киселевой и В. А. Федоровича**

Редакторы издательства: *Л. М. Гордон, Г. А. Карцева*

Художественный редактор *В. В. Баталова*

Технический редактор *Н. В. Сидорова*

Корректоры: *В. Б. Левин, К. В. Шин*

Переплет художника *Е. Н. Щегловой*

График *А. А. Томашов*

Сдано в набор 05.06.79. Подписано в печать 22.11.79.

Формат бумаги 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 3. Гарнитура литературная.

Печать высокая Печ. л. 34,0. Уч.-изд. л. 48,46. Тираж 12 700 экз. Заказ 1372.

Цена 3 р. 50 к. Изд. № 0121

Издательство «Металлургия», 119034, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., 14.

Ленинградская типография № 6 Ленинградского  
производственного объединения «Техническая книга»  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10.

90-100



AMERICAN