

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

В трёх частях

Часть 3

А. Г. Дивин, С. В. Пономарев

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ОПТИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ВЕЛИЧИН

*Допущено УМО по образованию в области прикладной математики
и управления качеством в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 221400 – Управление качеством*



Тамбов
• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •
2013

УДК 53.082(075.8)

ББК 3322я73

Д44

Рецензенты:

Доктор технических наук, доктор экономических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

Б. И. Герасимов

Директор ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации,
метрологии и испытаний в Тамбовской области»

И. Н. Левчук

Дивин, А. Г.

Д44

Методы и средства измерений, испытаний и контроля : в 5 ч. /
А. Г. Дивин, С. В. Пономарев (ч. 1, 2011); А. Г. Дивин, С. В. По-
номарев, Г. В. Мозгова (ч. 2, 2012). – Тамбов : Изд-во ФГБОУ
ВПО «ТГТУ».

ISBN 978-5-8265-1225-8

Ч. 3 : Средства измерения температуры, оптических и радиаци-
онных величин : учебное пособие для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению 221400 – Управление
качеством / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : Изд-во
ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с. – 100 экз.

ISBN 978-5-8265-1215-9

Рассмотрены вопросы измерения температуры, оптических и радиа-
ционных величин, а также основные параметры теплового контроля пока-
зателей качества продукции. Представлены основные инструменты и
методы измерения тепловых величин на производстве, в испытательных
лабораториях и при научных исследованиях.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучаю-
щихся по направлению 221400 – Управление качеством.

УДК 53.082(075.8)

ББК 3322я73

ISBN 978-5-8265-1215-9 (ч. 3)
ISBN 978-5-8265-1225-8

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в рамках непрерывно развивающегося постиндустриального общества, требующего внедрения новейших технологий, особенно востребованы специалисты в области стандартизации, сертификации и управления качеством. Это обусловлено тем, что специалисты данного профиля владеют знаниями о методах и средствах определения характеристик продукции, хорошо знакомы с методами инструментального контроля как основного средства эффективного подтверждения соответствия объекта предъявляемым требованиям.

Данное учебное пособие предназначено для ознакомления студентов с основными методами измерения температуры, с целями и задачами теплофизических исследований, а также большое внимание уделено изучению средств измерения оптических и радиационных величин.

В настоящее время существует потребность измерения тепловых величин во всех производственных направлениях. Кроме того, основные параметры контроля производственных показателей качества часто зависят от температуры и могут быть выражены как функции от температурных полей, и, следовательно, измерение температуры в данных случаях является необходимым условием контроля.

Наряду с измерениями температуры на производстве в настоящее время всё большее распространение приобретают теплофизические методы контроля веществ, материалов и изделий. Это особенно важно при испытаниях теплоизоляционных материалов, теплоносителей, ограждающих конструкций зданий и сооружений. Показателями качества в данном случае являются теплопроводность и теплоёмкость.

Предлагаемое читателям учебное пособие является третьей частью методического комплекса по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» и предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области проектирования, разработки и практического применения приборов для измерения различного рода физических величин, для контроля и дальнейшего управления качеством сырья, материалов, промежуточной и конечной продукции технологических процессов.

При подготовке материала учебного пособия были использованы результаты научно-исследовательских работ, выполненных по Соглашению № 14.В37.21.0450 и Госзаданию № 7.4583.2011.

1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура является одной из наиболее часто измеряемых физических величин, поскольку практически нет ни одной области деятельности, где не требовалось бы измерять и регулировать температуру.

1.1. ТЕМПЕРАТУРА И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ [1, 2, 8]

1.1.1. Основные сведения о термометрии

Понятие температуры возникло из ощущений человека, в какой мере нагреты или, наоборот, охлаждены окружающие тела. И только в результате требований науки и техники о количественном определении температуры было сформулировано более чёткое понятие температуры. По определению Максвелла, температура тела есть его термическое состояние, рассматриваемое с точки зрения его способности сообщать тепло другим телам. С другой стороны, температуру можно определить как степень нагретости тела. Первые приборы для измерения температуры, появившиеся в XVI в., позволили выделить температуру как особую физическую величину, значение которой определялось по температурной зависимости какого-либо свойства тела, т.е. по шкале этого свойства. Так возникла область измерений температуры, которую впоследствии назвали термометрией.

Термометрия – раздел технической физики, в котором изучаются методы и средства измерения температуры, теоретические основы способов построения термодинамической и практических температурных шкал и созданные на этой основе эталоны и образцовые средства измерений температуры.

Значения термодинамической температуры находятся в пределах от 0 К до таких высоких значений, которые получаются в реальных системах элементарных частиц, находящихся в тепловом равновесии. При этом абсолютный нуль температуры недостижим, так как любая частица в соответствии с квантовой теорией будет иметь одно низшее квантовое состояние, и поэтому отсутствует возможность перехода в другое, более низкое состояние, т.е. невозможна и передача энергии другой частице или системе частиц.

Температура – физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества. Если привести в контакт два тела при различных температурах, то более нагретое тело (с более высокой температурой) будет охлаждаться, а менее нагретое – нагреваться. Процесс теплопередачи и изменения температур тел будет продолжаться до тех пор, пока их температуры не станут равными, т.е. пока не наступит тепловое или термодинамическое равновесие. Подобный процесс наблюдается в том случае,

если оба тела в тепловом отношении изолированы от окружающей среды и не наблюдается приток извне тепла или же потери тепла в среду.

Температура определяет внутреннюю энергию тела: потенциальная и кинетическая энергии молекул газа, жидкости или твёрдого тела зависят от температуры. Энергия отдельно взятой молекулы не совпадает со средней энергией тела, поэтому понятие температуры к молекуле неприменимо. Следовательно, понятие температуры является статистическим и применимо к телам, состоящим из очень большого числа молекул.

Согласно кинетической теории средняя энергия E поступательного движения молекул газа связана с его температурой T соотношением $E = 3/2kT$, где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Распределение энергии поступательного движения между молекулами газа зависит от их скорости.

Для жидкостей и твёрдых тел функциональная связь температуры с внутренней энергией выражается сложными аналитическими зависимостями. Температура определяет не только характеристики тепловых процессов, от неё зависят многие физические свойства: теплопроводность, температуропроводность, теплоёмкость, температурные коэффициенты линейного и объёмного расширения, кристаллические структуры веществ, электрические, магнитные, оптические и атомные свойства.

Температурные зависимости физических свойств веществ можно положить в основу методов измерения температуры и построения температурной шкалы.

Температурная шкала – это ряд последовательных значений температуры, образуемый в соответствии с выбранным законом, определяющим взаимосвязь термометрического параметра (свойства) и температуры.

Для построения температурной шкалы выбирают две основные точки t_1 и t_2 , которым присваивают произвольные значения температуры. Интервал между этими точками ($t_2 - t_1$) называют основным интервалом температурной шкалы. Разделив основной интервал на N равных частей, устанавливают цену деления шкалы, другими словами, размер единицы температуры

$$M = \frac{t_2 - t_1}{N}. \quad (1.1)$$

Принимая линейную зависимость между температурой t и физическим (термометрическим) свойством E , можно найти уравнение шкалы в следующем виде:

$$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{E - E_1}{E_2 - E_1} = t_1 + MN \frac{E - E_1}{E_2 - E_1}. \quad (1.2)$$

Экспериментально установили, что уравнение (1.2) для различных термометрических веществ (или свойств), как правило, не имеет линей-

ную зависимость $t = f(E)$. На основе этого уравнения построены следующие температурные шкалы.

Шкала Фаренгейта (1723 г.) определена по двум реперным точкам: за 0°F принята температура смеси льда с солью и нашатырём, а за 96°F – температура тела человека. Точка плавления льда на такой шкале имеет температуру 32°F , а точка кипения воды – 212°F . Отсюда следует, что $1/180$ часть интервала между точками плавления льда и точкой кипения воды составляет размер единицы температуры – градуса Фаренгейта ($^\circ\text{F}$). В качестве термометрического вещества Фаренгейт использовал вначале спирт, а затем ртуть.

Шкала Ренкина – температурная шкала с началом при абсолютном нуле, причём размер единицы температуры – градуса Ренкина ($^\circ\text{Rn}$) равен размеру единицы температуры Фаренгейта ($^\circ\text{F}$): $1^\circ\text{Rn} = 1^\circ\text{F}$.

Соотношение между температурами T_{Rn} и t_{F} следующее: $t_{\text{F}} = T_{\text{Rn}} - 459,67$.

Шкала Реомюра (1736 г.) основана на ртутном термометре с двумя опорными точками: точкой плавления льда (0°R) и точкой кипения воды (80°R). Интервал между этими точками составляет 80 равных температурных частей, а размер единицы температуры – градуса Реомюра равен $1/80$ части указанного интервала.

Шкала Цельсия (1742 г.) основана на ртутном термометре с двумя опорными точками: точкой плавления льда (0°C) и точкой кипения воды (100°C), интервал между которыми составляет 100 равных температурных частей, а размер единицы температуры – градуса Цельсия равен $1/100$ части указанного интервала.

Связи между температурами Фаренгейта (t_{F}), Реомюра (t_{R}) и Цельсия (t) и их единицами выражаются следующим образом: $t^\circ\text{C} = 5/4t_{\text{R}}^\circ\text{R} = 5/9(t_{\text{F}}^\circ\text{F} - 32)$; $1^\circ\text{C} = 4/5^\circ\text{R} = 9/5^\circ\text{F}$.

Используя различные теоретические свойства, можно построить множество температурных шкал, которые совпадают в одинаковых опорных точках, но расходятся вне интервала между точками и в самом интервале. Такие температурные шкалы называют условными, а масштабы этих шкал – условными градусами или условными единицами температуры. Условные температуры и условные температурные шкалы называют также практическими в отличие от термодинамической температуры (иначе действительной или истинной) и термодинамической температурной шкалы.

1.1.2. Термодинамическая температурная шкала (ТТШ)

Определение размера единицы температуры с помощью части температурного интервала между выбранными опорными (реперными) точками приводит к тому, что для всех практических («эмпирических») температурных шкал размер единицы температуры неодинаков. Он различа-

ется как для разных участков одной той же шкалы, так и для различных температурных шкал. Это означает, что если градуировать различные термометры в одних и тех же реперных точках, т.е. при одной и той же температуре, то показания таких термометров, например в стабильном термостате, дадут разные значения измеряемой температуры. Как уже упоминалось, этот вывод является следствием нелинейности уравнения (1.2).

Понятие абсолютной (не условной) термодинамической температуры в 1848 г. ввёл В. Томсон (лорд Кельвин) на основе цикла Карно идеальной тепловой машины, состоящего из двух изотерм и двух адиабат. На рисунке 1.1 приведён цикл Карно в системе координат давление–объём ($p-V$), где 1–2, 3–4 – это изотермы, а 2–3 и 4–1 – адиабаты.

Введем следующие обозначения: Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом машины; Q_2 – количество теплоты, переданное рабочим телом в холодильник; T_1 и T_2 – температуры нагревателя и холодильника соответственно.

Цикл Карно проходит по следующей схеме:

Изотерма 1–2. Рабочее тело находится при температуре T_1 и получит при изотермическом расширении количество теплоты Q_1 .

Адиабата 2–3. Рабочее тело расширяется при дальнейшем уменьшении давления, не получая теплоты. Температура снижается до значения T_2 .

Изотерма 3–4. Рабочее тело изотермически сжимается и передаёт холодильнику количество теплоты Q_2 .

Адиабата 4–1. Рабочее тело адиабатически сжимается и возвращается в точку 1 с температурой T_2 , не отдавая теплоту.

Совершив замкнутый цикл, рабочее тело совершило работу за счёт количества теплоты $Q = Q_1 - Q_2$, не изменив внутренней энергии. Карно показал, что коэффициент полезного действия η идеальной тепловой машины определяется следующими соотношениями:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (1.3)$$

Особенность выражения (1.3) состоит в том, что η не является функцией каких-либо физических свойств рабочего тела или самой машины, а зависит только от значения температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 .

Термодинамическая температурная шкала (ТТШ), предложенная Кельвином на основе уравне-

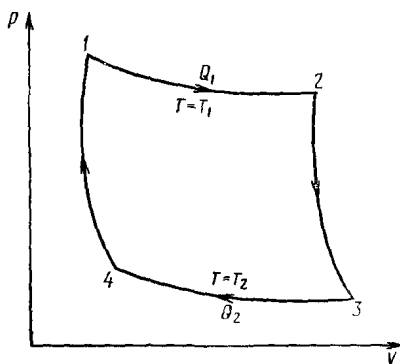


Рис. 1.1. Цикл Карно идеальной тепловой машины

ния (1.3), устанавливает взаимосвязь между термометрическим параметром Q и измеряемой температурой T :

$$T = T_0 \frac{Q}{Q_2}, \quad (1.4)$$

где T_0 – значение опорной термодинамической температуры, определяющей размер единицы термодинамической температуры.

Построение ТТШ на основе уравнения шкалы (1.4) не может быть точным, так как количества теплоты Q и Q_2 измеряются со значительной погрешностью.

Если за рабочее тело принять идеальный газ, то можно доказать, что термодинамическая температура, введённая в цикл Карно, совпадает с температурой, которую можно определить газовым термометром. Будем считать, что для такого рабочего тела можно пренебречь потенциальной энергией взаимодействия между молекулами по сравнению с их кинетической энергией. Тогда уравнение состояния газа будет иметь вид:

$$pV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (1.5)$$

где p – среднее давление газа в объёме V ; M – масса газа; μ – относительная молекулярная масса; $R = 8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная.

Уравнение (1.5) называют уравнением состояния идеального газа Клапейрона–Менделеева.

Основываясь на выражении (1.5), можно получить уравнение ТТШ для реализации с помощью газового термометра с постоянным объёмом V :

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}, \quad (1.6)$$

где p , p_0 – значения давления в резервуаре газового термометра при температурах T , T_0 соответственно.

Аналогично уравнение типа (1.6) можно получить, если построить ТТШ по газовому термометру при постоянном давлении p .

Принципиальная схема газового термометра с постоянным объёмом приведена на рис. 1.2. Рабочий резервуар 1 , заполненный газом, помещен в среду 2 с температурой T

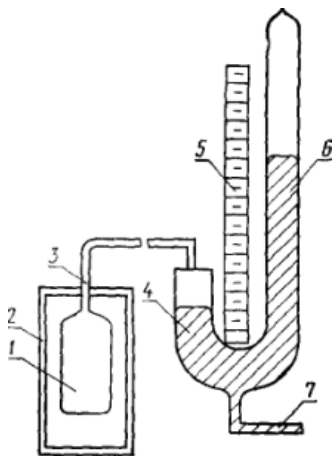


Рис. 1.2. Принципиальная схема газового термометра с постоянным объёмом

и при помощи капилляра 3 соединён с коротким коленом манометра 4, уровень в котором всегда устанавливается в одном и том же положении путём подкачивания ртути через трубку 7. Давление p определяется по положению ртути в колене манометра 6 по шкале 5. Давление p_0 измеряется аналогичным способом при помещении рабочего резервуара в точку с известной температурой T_0 . После указанных процедур измеряемую температуру вычисляют по формуле (1.6). Обычно давление p_0 измеряют при температуре тройной точки воды $T_0 = 273,16$ К.

Материал рабочего резервуара газового термометра выбирают исходя из температурного диапазона измерения: для низких температур из красной меди (материал с высокой теплопроводностью), для средних и высоких из плавленного кварца, сплава платины и иридия или сплава платины и родия (материалы с низкой газопроницаемостью). Температурный диапазон с газовым термометром охватывает значения температур от 4 до 1400 К. Вследствие того, что материалы рабочих резервуаров обладают температурной зависимостью коэффициентов теплового расширения, необходимо вводить поправки на значения объёма резервуара.

Уравнение состояния (1.5) справедливо для идеального газа. Практически используют такие газы, как водород, гелий, азот и др., для которых уравнение состояния необходимо представить в несколько ином виде:

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \left[1 + B(T)p + C(T)p^2 + \dots \right], \quad (1.7)$$

где $B(T)$, $C(T)$ – коэффициенты, зависящие от температуры; p – давление газа.

Уравнение измерения температуры с учётом выражения (1.7) примет вид

$$T = T_0 \frac{p}{p_0} \frac{Z_0}{Z}, \quad (1.8)$$

где Z_0 , Z – значения функции Z при температурах T_0 , T соответственно. Из (1.7) следует, что

$$Z = 1 + B(T)p + C(T)p^2 + \dots \quad (1.9)$$

Значения Z определяются из независимых измерений с газовым термометром.

Из уравнений (1.8) и (1.9) видно, что значения термодинамических температур можно получить из экспериментов путём экстраполяции давлений к нулевому значению, что соответствует требованиям, предъявляемым к газам, при условиях, близких к идеальному состоянию.

В уравнение (1.8) вводят поправки, зависящие от температуры ртути в коленах манометра, сорбции газа в резервуаре и значения «вредного объёма» (объём между резервуаром и манометром). На погрешность измерений влияют погрешности, возникающие при реализации реперных

точек, зависящие от **показателя тепловой инерции** систем термометра, примесей в термометрическом газе и др.

Погрешность современных измерений термодинамической температуры в диапазоне 4...400 К составляет 10^{-4} ... $5 \cdot 10^{-2}$ К.

Первая международная температурная шкала – стоградусная шкала водородного термометра с двумя реперными точками 0 и 100 °С при нормальном атмосферном давлении утверждена в 1887 г. Международным комитетом мер и весов. Её принятие было одобрено Первой Генеральной конференцией по мерам и весам в 1889 г. Стоградусная шкала водородного термометра была лучшим в то время приближением к ТТШ.

В Главной палате мер и весов под руководством Д. И. Менделеева был создан газовый водородный термометр, который считался наиболее точным для воспроизведения термодинамических температур (с погрешностью до тысячных долей градуса Цельсия).

В России с помощью газовых термометров проводятся исследования по построению ТТШ и измерениям термодинамических температур в научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) и области ниже 273,15 К и в НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в области выше 273,15 К.

1.1.3. Практические температурные шкалы

Область измерений низких и сверхнизких температур находит широкое применение в связи с внедрением криогенной техники в промышленность и научные исследования, в том числе в энергетику, химические отрасли народного хозяйства, медицину, в теплофизические исследования свойств материалов и процессов теплообмена.

Потребности развития области измерений высоких и сверхвысоких температур обусловлены разработками новых энергетических установок, использующих термоядерные реакции, плазменные процессы, лазерное излучение большой мощности. Отсюда возникают задачи исследований физико-химических свойств веществ и материалов в условиях высоких температур.

Вместе с созданием новых методов и средств измерения низких и высоких температур решаются задачи их метрологического обеспечения.

На практике построение шкалы по газовому термометру – очень сложная и дорогостоящая процедура. По этой причине ею занимаются только профессионалы, а для практиков термодинамическая шкала строится по реперным точкам – фиксированным температурам плавления или кипения различных веществ, которые тщательно измерены разными методами на разных приборах в разных странах. Только при условии хорошей сходимости результатов измерений реперная точка вносится в список точек Международной температурной шкалы (МТШ).

Международная температурная шкала (МТШ-90) введена в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам. МТШ-90 по сути является практической температурной шкалой и заменяет собой предыдущую Международную практическую температурную шкалу МПТШ-68. Основные изменения в шкале связаны с изменением температур реперных точек, расширением диапазона определения шкалы, введением новых интерполяционных приборов и новых методик построения интерполяционных зависимостей для платиновых термометров сопротивления. Шкала считается очень близко аппроксимирующей термодинамическую шкалу температур, поэтому слово «практическая» было опущено в её названии.

Реперные точки шкалы МТШ-90 подразделяются на определяющие и вторичные. Определяющие реперные точки – это наиболее точно измеренные относительно тройной точки воды температуры, для которых результаты измерений в различных странах хорошо совпадают между собой. Список некоторых определяющих реперных точек шкалы МТШ-90 дан в табл. 1.1. Вторичные реперные точки температурной шкалы охватывают более широкий диапазон температур. Самая высокая температура реперной точки – температура затвердевания вольфрама, равная 3660 К. Всего в шкале вторичных реперных точек содержится 27 значений, в основном температуры затвердевания чистых металлов. Результаты международных сличений температур этих реперных точек дали большие в сравнении с определяющими точками значения погрешностей. В основном причины расхождений заключаются в разной степени очистки ве-

1.1. Определяющие реперные точки шкалы МТШ-90

Реперная точка	T, K	$t, ^\circ C$
Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34
Точка кипения равновесного водорода при давлении 3330,6 Па	17,042	-256,108
Точка кипения равновесного водорода	20,28	-252,87
Точка кипения неона	27,102	-246,048
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789
Точка кипения кислорода	90,188	-182,962
Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка плавления галлия	302,90	29,76
Точка затвердевания индия	429,75	156,56
Точка затвердевания олова	505,10	231,93
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58
Точка затвердевания алюминия	933,473	660,323
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43

ществ, которые используются в термостатах. Известно, что сверхчистые вещества имеют в ряде случаев удивительные свойства, отличные от свойств веществ, очищенных рутинными методами. Например, сверхчистое железо не окисляется, сверхчистый алюминий не покрывается окисной плёнкой и блестит, как ртуть и т.д. Поскольку в разных странах чистые металлы получают из разного сырья, расхождения в температурах плавления и затвердевания многих металлов вполне объяснимы.

В итоге эталонные комплексы, воспроизводящие и передающие размер основной единицы термодинамической температуры системы СИ, представляют собой газовый термометр, откалиброванный по тройной точке воды, и набор термостатов – реперных точек, воспроизводящих определяющие и вторичные реперные точки шкалы МТШ-90.

1.2. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ И МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ [1, 8]

Термометрами расширения называются приборы, в которых для измерения температуры используется свойство теплового расширения вещества: жидкости, газа или твёрдого тела. Определение температуры термометрами расширения, как и всякого другого термометра, требует непосредственного контакта с объектом измерения. Это первые изобретённые для измерения температуры приборы.

1.2.1. Стекланные жидкостные термометры

В стекланных жидкостных термометрах при определении температуры используется тепловое расширение термометрической жидкости, заключённой в стекланный резервуар, соединённый с капилляром, на который наносится шкала или к которому крепится шкальная пластина.

Действие стекланных жидкостных термометров основано на зависимости объёма жидкости от температуры. Основными элементами конструкции термометра (рис. 1.3, *а*) являются: стекланный резервуар 1, соединительный капилляр 2, измерительный капилляр 3, шкальная пластина 4. В термометрах, на шкальную пластину которых нанесены дополнительная (нулевая) 1 и основная 3 шкалы, имеется утолщение соединительного капилляра – промежуточный резервуар 2 (рис. 1.3, *б*). Изменение объёма в зависимости от температуры для жидкости или твёрдого тела характеризуется коэффициентом объёмного теплового расширения $\beta_{\text{ж}}(T)$, которое для любого интервала температур соответствует уравнению

$$\beta_{\text{ж}}(T) = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T},$$

где V – начальный объём; ΔV – приращение объёма (высота столбика жидкости) при изменении температуры на ΔT .

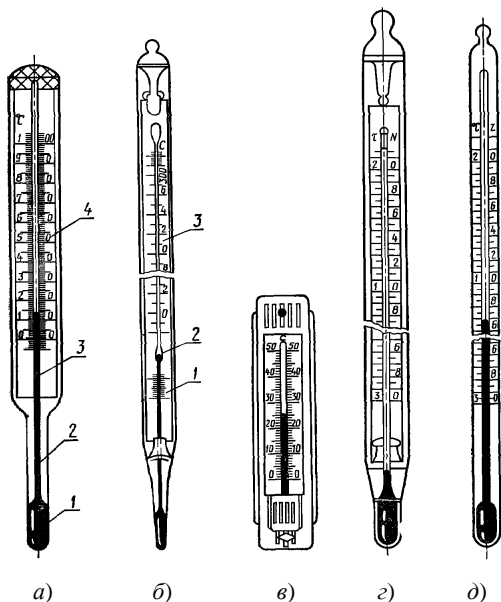


Рис. 1.3. Стекланные жидкостные термометры

При изменении температуры в стеклянном жидкостном термометре изменяется объём термометрической жидкости одновременно с объёмом стеклянных элементов конструкции термометра (резервуаром, капилляром). Поэтому температуру можно измерять только по видимому изменению объёма жидкости, равному разности изменений объёмов термометрической жидкости и стеклянной оболочки элементов конструкции термометра. Термометрические жидкости стеклянных жидкостных термометров характеризуют коэффициентом видимого расширения термометрической жидкости в стекле β_v , определяемым по формуле

$$\beta_v = \beta_{ж} - \beta_{ст} . \quad (1.10)$$

Точность измерения температуры стеклянных жидкостных термометров существенно зависит от размеров элементов конструкции термометра. Изменение объёма термометрической жидкости при изменении температуры термометра от t_n до t_k должно быть равно объёму измерительного капилляра, что соответствует уравнению

$$V_0 \beta_v (t_k - t_n) = LS , \quad (1.11)$$

где V_0 – объём термометрической жидкости при 0°C ; t_n, t_k – начальное и конечное значение шкалы; L – длина измерительного капилляра между начальной и конечной числовыми отметками шкалы; S – площадь поперечного сечения канала капилляра.

Из зависимости (1.11) очевидно, что наиболее точные стеклянные жидкостные термометры при одинаковом значении L изготавливаются в небольшом температурном диапазоне, с большим объёмом резервуара и минимальным сечением капилляра. Для стеклянных жидкостных термометров с ценой деления $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ капилляры имеют внутренний диаметр не менее $0,1\text{ мм}$, а резервуары – обычно не более $2,5\text{ см}^3$. Уменьшение сечения канала капилляра увеличивает силу трения ртути о его стенки, что приводит к скачкообразному движению ртути при повышении температуры и разрыву столбика ртути при понижении температуры.

В термометрах с малым поперечным сечением капилляра применяют капилляры с овальным сечением, что облегчает отсчёт показаний, так как увеличивается видимая ширина ртутного столбика.

Резервуары термометров обычно имеют цилиндрическую или шкалообразную форму. При одинаковом объёме резервуар цилиндрической формы имеет большую поверхность соприкосновения со средой, температура которой измеряется, что уменьшает тепловую инерцию термометра.

Основные свойства термометрических стёкол и требования к ним. При тепловом воздействии на стекло в нём проявляются эффекты термических последствий: старение и депрессия.

Старение термометра – это естественный процесс медленного уменьшения объёма резервуара и капилляра термометра с момента его изготовления.

Депрессия – это явление временного остаточного расширения резервуара термометра, которое наступает после нагревания термометра и последующего быстрого его охлаждения.

Изменения показаний термометра вследствие термических последствий в стекле принято оценивать по показаниям при погружении его в тающий лёд. В процессе старения стекла у термометра появляется систематическое увеличение показаний температуры, которое может составлять $0,1\text{...}10\text{ К}$ в зависимости от измеряемой температуры и длительности эксплуатации термометра. Объём резервуара уменьшается постепенно по затухающей кривой с момента его изготовления в течение всего срока эксплуатации термометра. В отличие от старения термического стекла, депрессия при не слишком высокой температуре представляет временное явление. При быстром охлаждении до точки таяния льда после длительного нагрева при температуре кипения воды депрессия составит не более $0,05\text{ К}$. После нагрева до более высоких температур депрессия может достигать нескольких десятых градуса.

Старение (положительное смещение нуля) и депрессия (отрицательное смещение нуля) во всём интервале температур постоянны, поэтому вызываемые ими погрешности могут быть скорректированы при проведении периодических поверок.

При изготовлении стеклянных жидкостных термометров используются специальные по химическому составу стёкла. В настоящее время в

нашей стране изготавливаются стеклянные жидкостные термометры из термометрических стёкол специального химического состава, боросиликатного стекла, а также стёкол марок 600 и 700. Последние обладают не большим эффектом термических последствий в стекле.

Для улучшения качества термометры в процессе изготовления подвергаются искусственному старению и отжигу.

Основные требования к термометрическим жидкостям. Термометрические жидкости (ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан) должны обладать возможно большим коэффициентом объёмного расширения, небольшой вязкостью и не должны смачивать стекло. Наиболее полно отвечает перечисленным требованиям ртуть. Она не смачивает стекло, используется в широком диапазоне (от 234,28 до 903,15 К).

Термометры, заполненные органическими жидкостями, применяются для измерения температур в диапазоне от 73,15 до 600 К. Органическим жидкостям свойствен такой недостаток, как отсутствие цвета. Кроме того, они смачивают стекло. Для удобства наблюдения и отсчёта в термометрическую жидкость добавляется красящее вещество, которое не должно влиять на результат измерения – выделяться из жидкости, осаждаться на стенках капилляра.

Термометрическая жидкость не должна быть вязкой, чтобы время установления показаний при уменьшении температуры было как можно меньше.

При измерении температур ниже 230 К может наблюдаться разрыв столбика жидкости при возрастании её вязкости. Разрыв столбика может происходить во всех термометрах из-за наличия в жидкости пузырьков газа или пара.

Для устранения испарения и конденсации термометрической жидкости свободное пространство капилляра заполняют осушенным и очищенным от кислорода инертным газом (азотом, гелием, аргоном) под давлением. Увеличение давления в капилляре способствует повышению предела измерения термометра.

Основные термометрические жидкости и их характеристики приведены в табл. 1.2.

Конструктивное исполнение термометров. Назначение и область применения.

Стеклянные жидкостные термометры по конструктивному исполнению делятся на: термометры с наружной шкалой; термометры с вложенной шкалой и палочные.

В термометрах с наружной шкалой (см. рис. 1.3, в) капилляр с резервуаром и шкальная пластина крепятся к пластмассовому, металлическому или деревянному основанию. Термометры такой конструкции используются для измерения температуры в помещениях.

1.2. Характеристики основных термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Температурные пределы, °С		Коэффициент объёмного расширения $\beta_{ж}$, K ⁻¹	Коэффициент видимого объёмного расширения термометрической жидкости в стекле $\beta_{в}$, K ⁻¹
	нижний	верхний		
Ртуть	-30	800	0,00018	0,00016
Толуол	-80	100	0,00122	0,00120
Этиловый спирт	-80	80	0,00105	0,00103
Керосин	0	300	0,00095	0,00093
Петролейный эфир	-120	25	0,00142	0,00140
Пентан	-200	20	0,00172	0,00170

Термометры с вложенной шкалой (см. рис. 1.3, *з*) выполнены таким образом, что шкальная пластина и капилляр герметично заключены в стеклянную защитную оболочку, припаянную к резервуару. Шкальная пластина плотно прилегает к капилляру и крепится к нему так, чтобы могла свободно расширяться при нагревании термометра. Для определения сдвига шкальной пластины наносится штриховая метка. Термометры с вложенной шкалой нашли широкое распространение, так как наиболее удобны при измерениях.

Палочные термометры (см. рис. 1.3, *д*) изготавливаются из массивных толстостенных капиллярных трубок, из которых выдувается резервуар. Шкала наносится методом травления непосредственно на части передней поверхности капиллярной трубки (измерительный капилляр). Измерительный капилляр должен быть внутри гладким, ровным, его внутреннее сечение должно быть одинаковым по всей длине.

В зависимости от этого различают прямые и угловые термометры. Форма соединительного капилляра (между резервуаром и измерительным капилляром) может изменяться. У угловых термометров (рис. 1.4, *а*, *б*) соединительная часть капилляра образует угол в 90, 135, 150°.

При изготовлении термометров с ограниченным интервалом температур (например, от 100 до 250 °С) шкалу в неиспользуемом интервале сокращают или прерывают, создавая в капилляре расширение. При этом на шкальную пластину может быть нанесена вспомогательная шкала для проверки термометра при фиксированной температуре, например в точке таяния льда.

При выборе термометра очень важно учесть, при каком погружении он градуировался: полным или частичном. Показания жидкостного стеклянного термометра зависят не только от температуры резервуара, но и от температуры столбика жидкости в капилляре. Термометр, при использо-

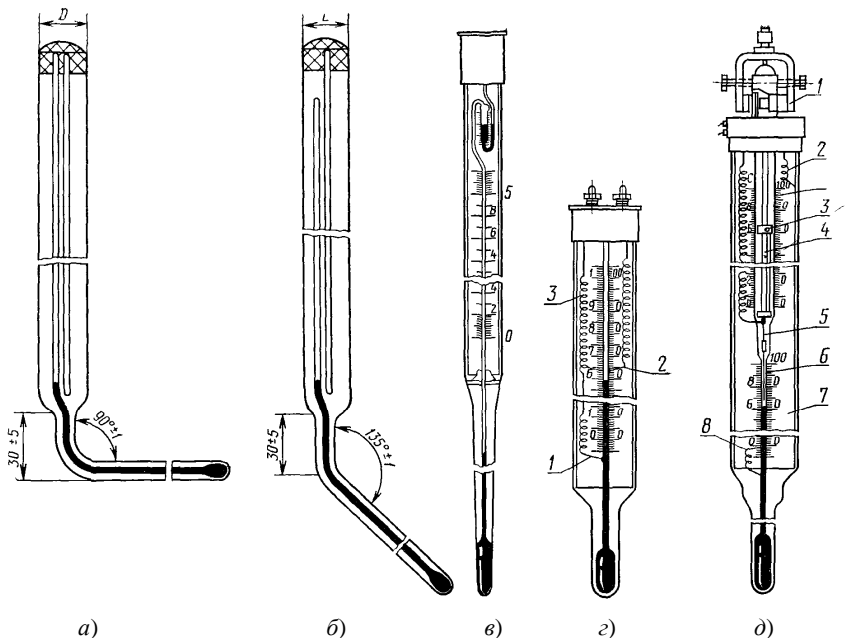


Рис. 1.4. Конфигурация стеклянных жидкостных термометров

вании которого всё термометрическое вещество должно находиться в среде, называется термометром полного погружения. Так как термометры в эксплуатации не всегда могут быть погружены полностью, при точных измерениях необходимо учитывать погрешность из-за неполного погружения. Для термометров с частичным погружением на шкальной пластине обычно делается пометка, указывающая глубину погружения термометра. Такие термометры градуируются при температуре, окружающей непогруженную часть, равной 20 °С.

В связи с тем, что средняя температура непогруженной части термометра может колебаться из-за изменений температуры окружающей среды, для точных измерений необходимо учитывать возникающую погрешность.

Рабочие стеклянные жидкостные термометры широко используются в промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях. Они имеют различное конструктивное оформление, соответствующее их назначению. Рабочие термометры делятся на термометры общего применения, лабораторные (для точных измерений) и предназначенные для работы в определённой области науки и техники (метеорологические, для измерения температуры химических и нефтепродуктов, сельскохозяйственные и т.д.). Кроме того, изготавливаются рабочие термометры специальных конструкций – максимальные, минимальные, электроконтактные, метастатические,

калориметрические, для измерения вязкости, атмосферного давления, влажности.

Промышленными стеклянными жидкостными термометрами контролируют температуру жидкостей, газов, пара в трубопроводах, резервуарах, машинах.

Это термометры частичного погружения, с прямой и угловой формой нижней части, измеряют температуру в интервале от -90 до $+600$ °С, цена деления шкалы от 0,5 до 10 °С.

Для защиты от механических повреждений их вставляют в защитную арматуру. Верхнюю часть термометра помещают в металлическую оправу так, что в её вырезе видна шкала. Нижняя часть термометра находится в защитной гильзе. Гильза может быть снизу открыта или иметь радиальные отверстия в стенках для лучшего контакта с объектом измерения. Защитная гильза и защитная арматура верхней части соединены между собой. Благодаря такой конструкции стеклянный термометр может быть заменён в любое время без остановки агрегатов.

Если необходимо измерить температуру при высоких давлениях, защитные гильзы монтируют герметично в конструкциях объекта измерения.

Термометры стеклянные жидкостные метеорологические и гидрологические применяются для измерения температуры воздуха, грунта, воды в реках, морях и т.д. К ним относятся максимальные, минимальные, психометрические, почвенно-глубинные и глубоководные термометры.

Максимальные (щелевые и стержневые) *термометры* имеют специальное устройство, препятствующее возвращению ртути в резервуар при охлаждении. В щелевой конструкции делают капилляр с небольшим сужением в его нижней части. В стержневых – к резервуару припаивают стержень, который находится в нижней части капилляра, уменьшая площадь его сечения. При снижении температуры резервуара ртутный столбик разрывается в месте сужения капилляра и фиксирует максимальное значение температуры за определённый промежуток времени. Чтобы вернуть ртуть в резервуар, термометр встряхивают или вращают на центрифуге.

Минимальный термометр предназначен для измерения минимальной температуры за определённый промежуток времени. В качестве термометрического вещества в нём используются неокрашенные органические жидкости. Внутри капилляра с термометрической жидкостью свободно перемещается штифт. До начала измерения термометр необходимо повернуть вверх резервуаром, чтобы штифт переместился до мениска (силы поверхностного натяжения останавливают штифт). Измерения производят при горизонтальном положении термометра. При охлаждении среды, температура которой измеряется, мениск начнёт перемещать штифт. Верхний край штифта указывает минимальное значение температуры, так как при нагревании термометрическая жидкость будет обтекать штифт и он не изменит своего положения.

Психрометрический термометр предназначен для измерения температуры и определения влажности воздуха путём сравнения показаний двух термометров, укреплённых на одном основании. Резервуар одного термометра сухой, а у другого смачивается водой. Влажность определяют по таблице, прикреплённой к основанию, рядом с термометрами.

Термометры лабораторные используются в качестве эталонов и рабочих для измерения температур в производственных и лабораторных условиях. В них термометрическим веществом является ртуть. Применяют лабораторные термометры для измерения температуры в диапазоне от -30 до $+600$ °С. Конструктивно они выполняются палочными и с вложенной шкальной пластиной. Градуируют лабораторные термометры, как правило, при полном погружении или при указанной глубине погружения в зависимости от назначения термометра.

К лабораторным термометрам относятся палочные термометры, у которых расстояние между штрихами по всей шкале одинаково. Их используют в качестве эталонов. Переход от делений равномерной шкалы к температуре производится по таблицам, составленным индивидуально для каждого термометра в процессе его аттестации.

Лабораторные термометры специального назначения имеют более узкую область применения – измерение небольших разностей температур или небольших её изменений, что необходимо при калориметрических измерениях теплотворной способности топлив или теплоёмкости тел, при определении изменения точки замерзания растворов или точки кипения жидкостей.

Калориметрические термометры для определения разности температур изготавливают палочными, равноделёнными, с ценой деления $0,01$ К. Вся шкала термометра обычно соответствует изменению температуры на 4 К.

Метастатические термометры – термометры Бекмана (см. рис. 1.4, в) – предназначены для высокоточного измерения в лабораторных условиях небольших разностей температур (не более 5 К) в интервале от -20 до $+150$ °С. Это термометры переменного наполнения. Характерная их особенность – возможность изменения объёма ртути в основном резервуаре. Для этого в верхней части капилляр имеет петлю и расширенный участок (дополнительный резервуар), куда ртуть переливается из основного резервуара. Переливая ртуть из одного резервуара в другой, можно менять диапазон измеряемых температур в широких пределах от -20 до $+150$ °С. На дополнительном резервуаре нанесена шкала с указанными пределами, служащая для ориентировочного определения количества ртути, которое должно быть перелито в дополнительный резервуар. Чем больше ртути отобрано из основного резервуара, тем большей температуре соответствует положение вершины столбика.

Для уменьшения количества ртути в основном резервуаре термометр переворачивают вверх, слегка встряхивая, чтобы ртуть перетекала

в дополнительный резервуар. Когда мениск ртути в дополнительном резервуаре дойдёт до требуемого предела по дополнительной шкале, термометр возвращают в нормальное положение и лёгким толчком отрываю столбик от ртути, находящейся в дополнительном резервуаре. Переливать ртуть из одного резервуара в другой можно, нагревая термометр.

Электроконтактные термометры и термодатчики предназначены для сигнализации и регулирования температуры в заданном диапазоне. Они изготавливаются палочными и с вложенной шкальной пластиной, прямыми и угловыми. По конструкции их относят к термометрам с заданными постоянными контактами (ТЗК) (см. рис. 1.4, *з*) и с подвижными контактами (ТПК) (см. рис. 1.4, *д*).

Во всех конструкциях общий соединительный контакт выполнен из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм и впаян в нижнюю часть капилляра.

В ТЗК в места капилляра, соответствующие положению мениска при заданной температуре, спаивают платиновые контакты 2, аналогичные нижнему соединительному 1. На платиновые контакты для исключения потерь спаивается стеклянная пуговичка, от которой начинается контактный паяный переход на медный провод 3 с диаметром не менее 0,3 мм. Значения заданных температур контактирования обозначены отметками на шкале. Количество точек контактирования не более трёх.

В ТПК подвижный контакт 5 выполняют из вольфрамовой проволоки диаметром не более 0,1 мм. Проволока закреплена сверху на гайке 3, которая перемещается микрометрическим винтом 4. Нижний конец вольфрамовой проволоки вставлен в капилляр 6, в котором он должен свободно перемещаться во всём диапазоне регулирования температуры. Вращая микрометрический винт, можно изменять положение контакта, а следовательно, заданное значение температуры. Винт вращается посредством герметической магнитной муфты 1. Неподвижный контакт образован платиновым электродом, касающимся столбика ртути в нижней части капилляра. К электроду припаяна медная проволока 8 (она же видна под позицией 2 в верхней части термометра).

На шкальной пластине ТПК нанесены две шкалы. По нижней шкале 7 определяется температура, соответствующая положению мениска ртути. Верхняя шкала имеет такие же числовые значения и предназначена для установки указателя на гайке ползуна в положение, соответствующее температуре контактирования. Для увеличения срока службы пространство над мениском ртути заполнено сухим водородом под давлением не менее 65 кПа для ТПК и под давлением не менее 80 кПа для ТЗК.

Обозначение типов термометров. Технические термометры – ТТ, ТП; метеорологические и гидростатические – ТМ, ТГ; лабораторные термометры – ТЛ, ТР; термодатчики – ТК; термометр контактный с заданной температурой – ТЗК; термометр с переменным контактом и маг-

нитной регулировкой – ТПК. Кроме перечисленных выше термометров стеклянные жидкостные термометры изготавливают для нефтепродуктов (обозначение типа – ТН); сельскохозяйственные (обозначение типа – ТС); термометры специальные (обозначение типа – СП), предназначенные для эксплуатации в технических установках специального назначения; термометры бытовые (обозначение типа – ТБ) и др.

Метрологические характеристики стеклянных жидкостных термометров. Погрешности термометров можно классифицировать как погрешности показаний термометров при нормальных условиях работы (1); погрешности градуировки шкалы (2) и погрешности, обусловленные отклонением условий от нормальных (3).

Первые погрешности зависят от конструктивных особенностей самих термометров и должны учитываться при работе с лабораторными термометрами. К ним относятся погрешности градуировки шкалы, смещение нулевой отметки, дефекты термометрической жидкости, мёртвый ход, изменение внутреннего давления.

Погрешности градуировки шкалы являются результатом неточного нанесения отметок шкалы, неравномерности сечения капилляра по его длине. Они определяются при поверке термометров и учитываются при дальнейших измерениях как систематические погрешности введением поправок в показания термометра.

При изменении положения нулевой отметки по сравнению с указанным в свидетельстве нужно внести изменения в поправки для всех точек на

$$c = t_0 - t'_0, \quad (1.12)$$

где t_0 – положение нулевой точки, указанное в свидетельстве (поправка по свидетельству); t'_0 – новое положение нулевой точки. Новая поправка для определённой отметки шкалы определяется как

$$c_t = c'_t + c, \quad (1.13)$$

где c'_t – поправка по свидетельству для температуры t .

Разрыв столбика термометрической жидкости, появление пузырьков газа, возгонка, конденсация – это дефекты термометрической жидкости. Разрыв столбика возникает из-за растворённого в жидкости газа, конденсации капелек жидкости на стенках капилляра выше мениска и может быть устранён специальной обработкой термометра.

Возгонка жидкости – результат недостаточного давления газа в капилляре. При испарении жидкости конденсат собирается в верхней части капилляра. Такой дефект для термометров с органическими жидкостями может быть не замечен, так как конденсат органической жидкости лишён красителя. Конденсацию жидкости можно устранить путём встряхивания термометра или применением центрифуги.

Мертвый ход и разрыв столбика ртути при измерении температуры возникает при понижении температуры в ртутных термометрах с малым сечением капилляра. Причина разрыва – трение ртути о стенки капилляра, которое препятствует перемещению её вниз. Исключить эти явления для термометров с малой ценой деления невозможно. Частично уменьшить эту погрешность можно, если перед отсчётом показаний слегка постучать по термометру.

Внутреннее давление зависит от высоты столба жидкости в капилляре и давления газа в газонаполненных термометрах. При одной и той же измеряемой температуре внутреннее давление может изменяться при изменении положения в пространстве. Поэтому рекомендуется точные термометры устанавливать вертикально.

К погрешностям, обусловленным отклонением условий от нормальных, относится погрешность вследствие неполноты погружения термометров с полным погружением. Она возникает из-за зависимости показаний термометра не только от температуры резервуара, но и от температуры капилляра. Поэтому термометры с полным погружением необходимо помещать в среду до отсчитываемой отметки. Практически это не всегда удаётся, поэтому часть столбика термометрической жидкости находится при температуре, отличающейся от температуры среды. Возникшую при этом погрешность можно исключить приближённо с помощью поправки

$$c_{в.с} = \beta_{в} n (t - t_1), \quad (1.14)$$

где $\beta_{в}$ – коэффициент видимого теплового расширения термометрической жидкости в стекле; n – число градусных делений, соответствующее высоте выступающего столбика; t – измеряемая температура, °С; t_1 – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром.

Для определения средней температуры выступающего столбика к его середине прикрепляют небольшой палочный термометр, чтобы резервуар не касался оболочки основного термометра и был изолирован от влияния температуры окружающей среды. Эта погрешность больше у термометров с органическими термометрическими жидкостями, чем у ртутных, так как коэффициент видимого теплового расширения ртути в 6–7 раз меньше.

При эксплуатации технических термометров возникает погрешность за счёт отличия средней температуры выступающего столбика от температуры при его градуировке. Эту погрешность можно исключить с помощью поправки

$$c_{г} = \beta_{в} n (t_2 - t_3),$$

где $\beta_{в}$ – коэффициент видимого теплового расширения термометрической жидкости; t_2 – температура выступающего столбика при градуировке, °С; t_3 – средняя температура выступающего столбика при эксплуатации, °С;

n – число градусных делений, соответствующее высоте выступающего столбика. Эта поправка, а следовательно, и погрешность для ртутных термометров меньше в 6–7 раз.

При отсчёте показаний термометра возможна погрешность из-за параллакса. Происходит это от того, что плоскость наблюдения перпендикулярна к капилляру.

Глаз видит отметки прямолинейными, если направление взгляда перпендикулярно делениям шкалы, находящимся вблизи мениска. Если направление взгляда неперпендикулярно, то отметки кажутся вогнутыми или выпуклыми в зависимости от того, выше или ниже отсчитываемой отметки находится глаз наблюдателя. Отсчёт показаний при этом желательно производить с помощью лупы.

1.2.2. Манометрические термометры

Манометрические термометры предназначены для дистанционного измерения температуры газов (воздуха, аммиака, углекислого газа, сероводорода, метана и др.), паров жидкостей.

К преимуществам манометрических термометров по сравнению с аналогичными преобразователями другого принципа действия относят возможность дистанционного измерения параметров без использования источников дополнительной энергии; простоту конструкции и большую надёжность при эксплуатации; равномерность шкалы; взрывобезопасность; отсутствие чувствительности к внешним электромагнитным полям.

Манометрические термометры (рис. 1.5) состоят из герметично замкнутой термосистемы (термобаллон, соединительный дистанционный капилляр, упругий чувствительный элемент) и показывающего или записывающего устройства. В зависимости от заполнителя термосистемы манометрические термометры изготовляют трёх видов: *газовые* – с азотом; *жидкостные* – с полиметилсилоксановыми жидкостями; *конденсационные* (парожидкостные) – с ацетоном, метилом, хлоридом фреона.

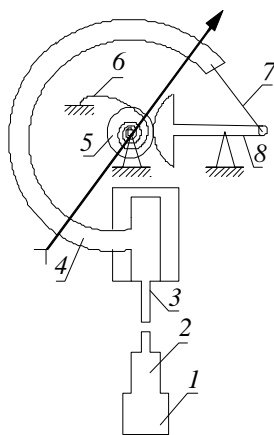


Рис. 1.5. Схема устройства манометрического термометра:
1 – термобаллон; 2 – хвостовик;
3 – капилляр; 4 – манометрическая трубка (пружина); 5 – зубчатое колесо, соединённое со стрелкой; 6 – спиральная пружина, служащая для устранения люфта в зубчатом зацеплении; 7 – тяга; 8 – зубчатый сектор

1.3. Показатели тепловой инерции манометрических термометров

Заполнитель термосистемы	Среда, окружающая термобаллон			
	воздух	(газ)	вода	(жидкость)
	без движения	скорость 7 м/с	без движения	скорость 7 м/с
Газ	400	60	15	3
Жидкость	800	120	30	6
Конденсат	800	120	30	6

Максимально допустимые значения показателя тепловой инерции манометрических термометров приведены в табл. 1.3.

Величина тепловой инерции увеличивается с возрастанием длины дистанционного капилляра.

Дистанционный капилляр изготовлен из латуни или сталей X18H10T и X18H10T-M. Для защиты от механических повреждений капилляр помещён в оболочку из полиэтилена или оцинкованной стальной ленты.

Термобаллон металлических термометров снабжён жёстким трубчатым хвостовиком различной длины, позволяющим погружать его в измеряемую среду на необходимую глубину, которая оговаривается при заказе термометра. Для присоединения термобаллона к установке служит штуцер из стали А20 или X18H10T.

При погружении термобаллона в среду под давлением свыше $64 \cdot 10^5$ Па, а также в случае, если смена термобаллона может повлечь за собой остановку аппарата, рекомендуется применять защитную гильзу, выдерживающую давление $250 \cdot 10^5$ Па. Для снижения тепловой инерции пространство между гильзой и термобаллоном заполнено металлическими опилками или жидкостью с температурой кипения более высокой, чем верхний предел измерений.

Жидкостные манометрические термометры. Вся термосистема манометрического термометра заполнена термометрической жидкостью. При повышении температуры объём жидкости увеличивается соответственно разности теплового расширения жидкости и резервуара и приводит к изменению давления. Изменение давления в термосистеме приводит к изменению положения свободного конца манометрической пружины, которое соответствует изменению температуры среды.

Изменение давления жидкостных манометрических термометров при изменении температуры от t_n до t_k определяют по формуле

$$\Delta p = \frac{(\beta_{ж} - 3a)V_T}{\beta_{ж} V} (t_k - t_n), \quad (1.15)$$

где $\beta_{ж}$ – коэффициент объёмного расширения жидкости; a – коэффициент линейного расширения материала термобаллона; V_T – объём термобаллона; V – объём жидкости, заполняющей систему.

В качестве упругого чувствительного элемента в жидкостных манометрических термометрах применяют трубчатые (манометрические) пружины постоянной чувствительности. Объем термобаллона рассчитывают таким образом, чтобы рабочее давление не вызывало пластических деформаций манометрической пружины. Шкала жидкостных манометрических термометров практически равномерна.

При одной и той же манометрической пружине объем термобаллона должен изменяться обратно пропорционально диапазону температур. Влияние температуры окружающей среды на манометрическую пружину и капилляр уменьшается за счёт увеличения объема термобаллона по сравнению с объемами пружины и капилляра. Термосистему заполняют ртутью, метаксилолом, пропиловым спиртом, толуолом, ксилолом и другими жидкостями. Эти жидкости должны быть хорошо очищены. Ртуть не должна содержать даже мелких долей воды, масел, механических загрязнений, что может привести к загрязнению капилляра. Систему перед заполнением тщательно вакуумируют. Для исключения загрязнения термометрической жидкости термосистему наполняют таким образом, чтобы уже в начале шкалы жидкость находилась под повышенным давлением.

Чувствительный элемент, капиллярную трубку и манометрическую пружину ртутных манометрических термометров изготавливают из стали. Капиллярные трубки ртутных манометрических термометров должны иметь возможно меньший внутренний диаметр, чтобы уменьшить их влияние на результат измерения температуры. Радиус их изгиба должен быть не менее 50 мм, не допускаются повреждения поверхности капилляра. Для защиты от механических повреждений капилляры помещают в металлическую оплётку или стальную трубку. Соединения в термосистеме должны выполняться тщательно для предотвращения утечки ртути.

У манометрических термометров с органическими жидкостями термобаллон и соединительный капилляр могут быть изготовлены из меди или латуни. Из-за большей вязкости органической жидкости капилляры этих термометров изготавливают с большим диаметром. Эти термометры инерционнее, чем ртутные.

В *конденсационных* манометрических термометрах в отличие от жидкостных термобаллон только частично заполнен легкокипящей жидкостью. Давление пара жидкости возрастает экспоненциально с повышением температуры. Давление 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 пружину, деформация которой под действием разности внутреннего и атмосферного давлений является показателем температуры. Шкала конденсационного манометрического термометра неравномерна, а расстояние между соседними делениями шкалы с повышением температуры значительно увеличивается.

Термометры предназначены для измерения температуры в диапазоне от -50 до $+300$ °С. Термометрические жидкости, которыми заполняют

термосистему, – пропан, хлористый этил, этиловый эфир, этиловый спирт, ксилол. Термобаллон заполняется жидкостью так, что при нижнем значении диапазона он заполнен не более 60%, а при верхнем значении температуры жидкость ещё остаётся.

Форма термобаллона и способ заполнения термосистемы существенно зависят от того, выше или ниже измеряемая температура, чем температура окружающей среды. Для случая, когда измеряемая температура выше окружающей среды, капиллярная трубка вводится в термобаллон настолько, что при температуре нижнего предела шкалы она погружена в жидкость, а соединительный капилляр и манометрическая пружина при любой температуре окружающей среды заполнены жидкостью.

Если измеряемая температура ниже температуры окружающей среды, при больших изменениях температуры термобаллона или капилляра в последнем могут образовываться пузырьки пара, которые вызывают скачки давления, наблюдаемые в виде прерывистых нерегулярных колебаний стрелки.

В случае, когда измеряемая температура может превышать или быть меньше температуры окружающей среды, для исключения толчков давления в термобаллон с термометрической жидкостью добавляют несмешивающуюся с ней вспомогательную жидкость с большим удельным весом, в которую погружен конец капилляра. Вспомогательной жидкостью заполняют соединительный капилляр и манометрическую пружину, так как она исключает образование пузырьков пара в соединительном капилляре при любой температуре окружающей среды.

Для уменьшения неравномерности шкалы конденсационные манометрические термометры либо делают узкопредельными, либо используют специальное устройство, выпрямляющее шкалу.

Газовые манометрические термометры. Термосистема газового манометрического термометра заполнена газом – азотом, реже гелием. При изменении измеряемой температуры объём термосистемы изменяется за счёт изменения (увеличения или уменьшения) объёма термобаллона и внутреннего объёма манометрической пружины. Кроме того, температура газа в термобаллоне отличается от температуры в капилляре и пружине, вследствие чего газ перемещается из термобаллона (при повышении температуры) или, наоборот, из капилляра и манометрической пружины в термобаллон (при понижении температуры). По этой причине зависимость между давлением в термосистеме и измеряемой температурой отклоняется от линейной. Отклонение это незначительно, поэтому шкала газового манометрического термометра практически равномерна.

Рабочее давление газовых манометрических термометров в диапазоне температур от t_n до t_k определяют по формуле

$$\Delta p = \frac{p_n \gamma (t_k - t_n)}{1 + \gamma t_n},$$

где p_n – начальное давление в термосистеме, соответствующее t_n ; γ – термический коэффициент давления газа, равный $1/273$ или $0,00366 \text{ K}^{-1}$ для идеального газа.

Термосистему газовых манометрических термометров заполняют под значительным начальным давлением, поэтому показания термометра не зависят от колебаний атмосферного давления и разности уровней термобаллона и пружины. Объём пружины и капилляра намного меньше объёма термобаллона, что позволяет пренебречь влиянием колебаний температуры окружающей среды на показания термометра.

Теплоёмкость газа – наполнителя термосистемы – очень мала, поэтому инерционность газовых манометрических термометров меньше, чем у других манометрических термометров с одинаковым диаметром термобаллона. Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температуры от -200 до $+600 \text{ }^\circ\text{C}$. Измерение температуры в области $600 \text{ }^\circ\text{C}$ возможно, если термобаллон изготовлен из нержавеющей стали.

Основная погрешность манометрических термометров обуславливается неточностью градуировки прибора при изготовлении, а также конструкциями и свойствами манометрических пружин.

Дополнительные погрешности манометрических термометров следующие: температурная, барометрическая и гидростатическая.

Дополнительная температурная погрешность возникает при изменении температуры соединительного капилляра и манометрической пружины и может быть различной в зависимости от конструкции термометра.

Для уменьшения дополнительной температурной погрешности в конструкцию манометрических термометров вводят специальные компенсирующие устройства: биметаллическую дугообразную пластинку, встроенную в передаточный механизм манометрической пружины; инварный сердечник, устанавливаемый внутри капилляра; вторую манометрическую пружину, соединённую со вторым капилляром, но без термобаллона, размещаемую внутри корпуса термометра.

Компенсация температурной погрешности с помощью биметаллического компенсатора является наиболее распространённой и показана на рис. 1.6. Биметаллическая дугообразная пластина 3 встроена в тягу передаточного механизма. При увеличении температуры окружающей среды она разгибается. Когда манометрическая пружина 2 распрямляется под действием внутреннего давления в термобаллоне 1, распрямляется и биметаллическая пластина, увеличивая длину тяги. Вследствие этого стрелка термометра 4 не меняет своего положения.

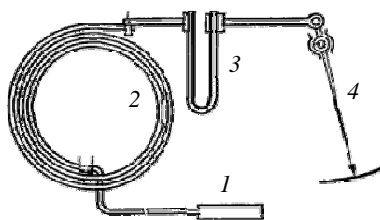


Рис. 1.6. Схема компенсации температурной погрешности манометрического термометра

Барометрическая погрешность возникает при изменении атмосферного давления, которое воздействует на манометрическую пружину и капилляр. В конденсационных манометрических термометрах барометрическая погрешность зависит от разности давлений (внутри термосистемы и атмосферного), действующих на трубку и вносящих погрешность в его показания.

Изменение атмосферного давления практически не влияет на показания газовых и жидкостных манометрических термометров благодаря высокому начальному давлению.

Однако при измерении температуры объектов с высоким внутренним давлением манометрическими термометрами, термобаллон которых используется без защитной гильзы, возникает погрешность вследствие деформации чувствительного элемента.

Причина возникновения *гидростатической погрешности* в жидкостных и конденсационных манометрических термометрах – статическое давление столба термометрической жидкости в соединительном капилляре при разности высот между термобаллоном и манометрической пружиной.

Манометрические термометры обычно градуируют так, что термобаллон и манометрическая пружина находятся на одном уровне. Если манометрическая пружина расположена выше или ниже термобаллона, появляется гидростатическая погрешность. Её можно рассчитать по формуле

$$\Delta t = \frac{\Delta p_2}{S} = \frac{h \rho g (t_k - t)}{\Delta p},$$

где Δp_2 – рабочее давление термосистемы при изменении температуры от t_k до t ; h – разность уровней термобаллона и манометрической пружины, м; ρ – плотность вещества, заполняющего термосистему, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

1.2.3. Термометры дилатометрические

Принцип действия дилатометрических термометров основан на использовании свойства твёрдого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. При небольших температурных диапазонах зависимость длины твёрдого тела от температуры линейна:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t),$$

где l_t – длина тела при температуре t , м; l_0 – длина тела при температуре 0 °С, м; α – средний коэффициент линейного расширения твёрдого тела от 0 °С до t , К⁻¹.

Значения средних коэффициентов линейного расширения материалов приведены в табл. 1.4.

В дилатометрических термометрах расширения две трубки из материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения одним концом скреплены друг с другом (рис. 1.7). Свободные концы перемещаются по-разному, что используется для измерения температуры.

1.4. Коэффициенты линейного расширения различных материалов

Материал	Интервал температур, °С	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$
Латунь	0...400	18,3...23,6
Медь красная	0...150	15,3
Хромомолибден	0...100	12,3
Сталь никелевая (20% никеля)	0...500	20,0
Инвар	0...200	0,9
Плавленый кварц	–	0,55

Внешнюю трубку 1 изготавливают из металла (латуни, меди, стали) с большим коэффициентом линейного расширения, внутреннюю трубку или стержень 2 изготавливают из кварца, фарфора или инвара. Внешняя трубка закреплена в штуцере 4, а внутренняя трубка механически связана с контактным устройством 3 и установочной шкалой 5. При повышении температуры среды, в которую полностью погружается нижняя часть термометра, внешняя трубка удлиняется больше, чем внутренняя. Разница перемещений подвижных концов пропорциональна изменению температуры.

Перемещение внутреннего стержня при изменении от t_n до t_k можно рассчитать по формуле

$$\Delta l = l_k - l_n = \frac{l_n (\alpha_T - \alpha_c) (t_k - t_n)}{1 + (\alpha_T - \alpha_c) t_n},$$

где l_n и l_k – длина внешней трубки при температурах t_n и t_k , м; α_T , α_c – коэффициент линейного расширения внешней и внутренней трубок, K^{-1} .

Из-за небольшой разницы теплового расширения внешней и внутренней трубок длины их, что очевидно из формулы, должны быть достаточно большими (300 мм).

Дилатометрические термометры могут развивать большие усилия, поэтому их используют в качестве регулирующих устройств с электрическими контактами для двухпозиционного регулирования.

Из-за длинных металлических трубок, идущих от объекта измерения наружу, велик отвод тепла, в результате чего возникает большая погрешность при измерении температуры. По этой же причине дилатометрические термометры обладают большой инерционностью, что отрицательно сказывается на регулировании температуры.

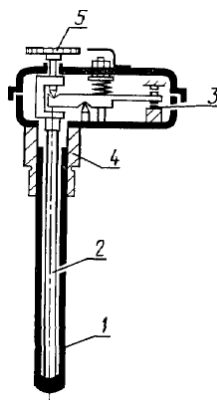


Рис. 1.7. Дилатометрический термометр

1.2.4. Термометры биметаллические

Биметаллический термометр представляет собой прочное соединение двух пластин металлов или сплавов с разными коэффициентами линейного теплового расширения. Толщина пластин примерно одинаковая. При воздействии тепла биметалл изгибается в сторону слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения. Биметаллическая пластина является чувствительным элементом термометра, изгиб её при изменении температуры передаётся на механизм показывающего устройства или на контактную группу, которая замыкается или размыкается.

Перемещение биметаллической пластины, механически закреплённой на одном конце, можно рассчитать по формуле

$$A = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)L^2}{s}(t_2 - t_1),$$

где α_1, α_2 – коэффициенты линейного расширения составляющих биметалла, K^{-1} ; L – длина биметаллической пластины, м; s – толщина биметаллической пластины, м; $(t_2 - t_1)$ – разность температур, для которой определяется изгиб A , K^{-1} .

Перемещение тем больше, чем длиннее и тоньше биметаллическая пластина, но не зависит от её ширины.

Биметаллы для термометров выполняют чаще всего в виде плоских и цилиндрических спиралей. Это обеспечивает компактность при большой длине и позволяет линейное перемещение преобразовывать во вращательное движение, удобное для конструкции показывающих приборов.

При расчётах в этом случае определяют не размер изгиба A , а угол закручивания φ на 1 К:

$$\varphi = \frac{360}{\pi} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)L^2}{s}(t_2 - t_1).$$

Для показывающих приборов необходим большой изгиб, поэтому пластины делают как можно тоньше. При работе в релейном режиме или для привода релейной пары требуется большое усилие. Для предохранения биметалла от пластических деформаций при повышении температуры его перемещение ограничивают упорами.

Линейная зависимость между перемещением биметалла и температурой свойственна для ограниченного температурного диапазона. Диапазон измеряемых температур биметаллических термометров находится в интервале от -60 до $+600$ °С и зависит от материала биметалла.

Биметаллические показывающие термометры используются для измерения температуры в помещениях. В них применены

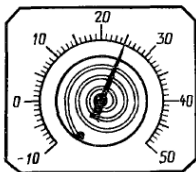


Рис. 1.8. Биметаллический термометр с плоской спиралью

биметаллы в виде плоской спирали (рис. 1.8). В промышленности чаще используют биметаллические термометры с цилиндрической пружиной (рис. 1.9).

Биметалл, свёрнутый в цилиндрическую спираль, вставляют в защитную арматуру, соединённую с головкой термометра, в которой размещены передаточный механизм, стрелка и шкальная пластина. Теплового контакт между защитной арматурой и спиралью должен быть как можно лучше для увеличения быстродействия термометра.

На рисунке 1.10. показано температурное реле, воспринимающим органом которого служит биметаллическая, т.е. двойная (из двух разных металлов), спираль. Пластины спирали при нагреве удлиняются неодинаково, поэтому она изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом теплового расширения и по достижении определённой температуры замыкает контакты. Существенный недостаток подобного биметаллического термореле заключается в том, что его контакты срабатывают недостаточно чётко и вследствие этого подгорают.

В усовершенствованной конструкции реле биметаллическая пластина, изгибаясь, освобождает пружину, которая обеспечивает резкое срабатывание контактной системы.

1.3. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ТЕРМОМЕТРЫ) [2, 7, 8]

1.3.1. Физические основы принципа действия термоэлектрических преобразователей

Действие термоэлектрических термометров основано на свойстве металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (термоЭДС), зависящую от температуры места соединения (спая) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов), образующих чувствительный элемент термометра – термопару. Зная закон изменения термоЭДС термопары от температуры и определяя значение термоЭДС электроизмерительным прибором, можно найти искомое значение температуры в месте измерения.

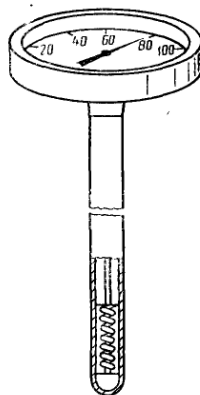


Рис. 1.9. Биметаллический термометр с цилиндрической пружиной

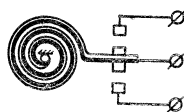


Рис. 1.10. Биметаллическое температурное реле

Термоэлектрический термометр, состоящий из двух спаянных и изолированных по длине термоэлектродов, защитного чехла и головки с зажимами для подключения соединительной линии, является первичным измерительным преобразователем.

В качестве вторичных приборов, работающих с термоэлектрическими термометрами, применяются магнитоэлектрические милливольтметры, потенциометры, а также цифровые приборы.

К числу достоинств термоэлектрических термометров следует отнести: достаточно высокую степень точности, большой диапазон измерения, высокую чувствительность, незначительную инерционность, отсутствие постороннего источника тока, лёгкость осуществления дистанционной передачи показаний, возможность централизации контроля температуры путём присоединения нескольких термоэлектрических термометров через переключатель к одному измерительному прибору, возможность автоматической записи измеряемой температуры с помощью самопишущего прибора.

В основу измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров положены термоэлектрические явления, открытые Зеебеком в 1821 г.

При соединении одинаково нагретых концов двух проводников из разнородных материалов, из которых в первом количестве свободных электронов в единице объёма больше, чем во втором, последние будут диффундировать из первого проводника во второй в большем числе, чем обратно. Таким образом, первый проводник станет заряжаться положительно, а второй – отрицательно. Образующееся при этом в месте соединения (спае) проводников электрическое поле будет противодействовать этой диффузии, в результате чего наступит состояние подвижного равновесия, при котором между свободными концами указанных проводников появится некоторая разность потенциалов (термоЭДС). С увеличением температуры проводников значение этой термоЭДС также увеличивается. Кроме того, термоЭДС возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния подвижного равновесия положительно заряжается более нагретый конец проводника, как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым. Возрастание разности температур между концами проводника приводит к увеличению возникающей в нём термоЭДС.

Если взять цепь (рис. 1.11), составленную из двух различных термоэлектрически однородных по длине проводников A и B , то при подогреве спая 1 в цепи появится электрический ток, который в более нагретом спае 1 направлен от проводника B к проводнику A , а в холодном спае 2 – от B к A . При подогреве спая 2 ток получает обратное направление. Такие токи называются термоэлектрическими. Электродвижущая сила, обусловленная неодинаковыми температурами мест соединения 1 и 2 , называется термо-

электродвижущей силой, а создающий её преобразователь – термоэлектрическим первичным преобразователем или термопарой. Спаи, погружаемый в измеряемую среду, называется рабочим или горячим спаем термопары; второй спай носит название свободного или холодного.



Рис. 1.11. Схема контура термоэлектрического термометра

Суммарную электродвижущую силу замкнутой цепи из проводников A и B , спаи которой нагреты до температур t и t_0 , можно выразить уравнением

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0),$$

где $E_{AB}(t, t_0)$ – суммарная термоЭДС термопары; $e_{AB}(t)$ и $e_{BA}(t_0)$ – потенциалы, возникающие в местах соприкосновения проводников. Индексы при E и e указывают направление термоЭДС: от A к B или от B к A . При изменении порядка индексов, например у символа e_{BA} , должен измениться также и знак, т.е.

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0).$$

Так как потенциалы e спаев зависят от температуры, то суммарная термоЭДС, наблюдаемая в цепи из двух разнородных проводников с разными температурами спаев, равна разности функций температур t и t_0 :

$$E_{AB}(t, t_0) = f_1(t) - f_2(t_0).$$

Поддерживая температуру одного из спаев постоянной, например, полагая, что $t_0 = \text{const}$, т.е. $f_2(t_0) = \text{const}$, получим:

$$E_{AB}(t, t_0) = f_1(t) - \text{const} \quad \text{или}$$

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t), \quad \text{где } f(t) = f_1(t) - \text{const}.$$

Таким образом, если для данной термопары экспериментально, т.е. путём градуировки, найдена последняя зависимость, то измерение неизвестной температуры сводится к определению термоЭДС термопары, которая невелика ($0,01 \dots 0,06$ мВ на 1°C), но всё же достаточна для измерения посредством измерительного прибора.

При введении в цепь термопары третьего проводника, если концы последнего имеют одинаковые температуры, термоЭДС термопары не изменится (то же относится и к нескольким проводникам). Поэтому включение в цепь термопары соединительных проводов, измерительных приборов и подгоночных сопротивлений не отражается на точности измерения.

1.3.2. Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического термометра

Номинальная статическая характеристика (НСХ) термоэлектрических преобразователей приводится в справочной литературе и представляется собой таблично заданную зависимость термоЭДС от температуры

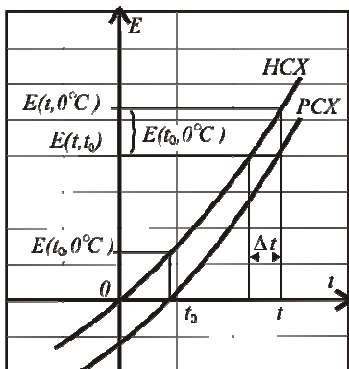


Рис. 1.12. Введение поправки на температуру холодных спаев

$t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $E(t, t_0)$ – термоЭДС, развиваемая термопарой при температурах рабочего t и холодного t_0 спаев; $E(t_0, 0 \text{ }^\circ\text{C})$ – поправочная термоЭДС, развиваемая термопарой при температурах рабочего спаев t_0 и свободного $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Поправка $E(t_0, 0 \text{ }^\circ\text{C})$ имеет знак «плюс» в случае, когда $t_0 > 0 \text{ }^\circ\text{C}$, а «минус» – в случае, когда $t_0 < 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Если поправку не вводить, то возникает погрешность измерения температуры Δt .

Термоэлектродные материалы

Значение развиваемой термоЭДС зависит от материала термоэлектродов и температуры рабочего и свободного концов термометра. В качестве термоэлектродов преимущественно применяются те металлы и сплавы, которые развивают сравнительно большие термоЭДС. Применение термометров с более высокими значениями термоЭДС увеличивает надёжность измерения температуры. Создаваемая термометрами термоЭДС сравнительно невелика; она составляет не более 8 мВ на каждые $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и при измерении высоких температур не превышает 70 мВ.

В качестве термоэлектродных материалов для изготовления термометров применяются главным образом чистые металлы и их сплавы. Наибольшее распространение для изготовления термоэлектрических термометров получили материалы: платина, платинородий, хромель, алюмель и копель. Для измерений в лабораторных установках находят также применение медь, железо, константан и др.

К термоэлектродным материалам, предназначенным для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляют ряд требований:

- жаростойкость и механическая прочность;
- химическая инертность;
- термоэлектрическая однородность;

рабочего спаев при температуре холодного спаев $0 \text{ }^\circ\text{C}$. На практике температура свободных концов термометра в большинстве случаев поддерживается постоянной, но не равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Реальная статическая характеристика (РСХ) при этом смещается вертикально вверх или вниз относительно номинальной (рис. 1.12), что вызывает необходимость введения поправки по уравнению

$$E(t, 0 \text{ }^\circ\text{C}) = E(t, t_0) \pm E(t_0, 0 \text{ }^\circ\text{C}),$$

где $E(t, 0 \text{ }^\circ\text{C})$ – номинальная термоЭДС, развиваемая термопарой при температурах рабочего спаев t и холодного спаев

- стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики;
- однозначная, желательна близкая к линейной, зависимость термоЭДС от температуры;
- высокая чувствительность.

1.3.3. Типы и характеристики термоэлектрических термометров

Термоэлектрические термометры, получившие практическое применение, разделяются по материалу термоэлектродов на две группы: из благородных и неблагородных металлов и сплавов. В таблице 1.5 приведены наиболее распространённые типы термоэлектрических термометров, их градуировка и температурные границы их применения. При наименовании термометров первым обычно указывается положительный термоэлектрод.

Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры применяются для измерения температур в области 0...1300 °С в окислительной и нейтральной среде. Эти термометры находятся в числе лучших термоэлектрических термометров по точности и воспроизводимости термоЭДС. Положительным термоэлектродом у этих термометров является платинородий (сплав 90% Pt и 10% Rh), отрицательным – чистая платина.

Хромель-копелевые термоэлектрические термометры типа ТХК широко применяются для измерения температур различных сред. Для изго-

1.5. Стандартные рабочие термоэлектрические термометры с металлическими термоэлектродами

Тип	Наименование материалов термоэлектродов	Обозначение НСХ	Диапазон измерений при длительном применении, °С	Допускаемый предел измерений при кратковременном применении, °С
ТПП	Платинородий (10% родия)-платина	ПП	0...1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия)-платинородий (6% родия)	ПР30/6	300...1600	1800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения)-вольфрамрений (20% рения)	ВР5/20	0...2200	2500
ТХА	Хромель-алюмель	ХА	-200...1000	1300
ТХК	Хромель-копель	ХК	-200...600	800

товления положительного термоэлектродом используется хромель, представляющий собой жаропрочный немагнитный сплав на никелевой основе (80% Ni, 9,8% Cr, 10% Fe, 0,2% Mn). Отрицательный термоэлектрод – копель, сплав из меди и никеля (56% Cu, 44% Ni).

Хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры типа ТХА широко применяются для измерения температур газовых сред, пара и жидкостей. Положительным термоэлектродом является хромелевая проволока, отрицательным служит алюмель, представляющий собой магнитный сплав на никелевой основе (94% Ni, 2% Al, 2,5 Mn, 1% Si, 0,5% примесей).

Градуировочные характеристики термоэлектрических термометров

На диаграмме рис. 1.13 показаны рабочие области температур наиболее часто применяемых термоэлектрических преобразователей.

В таблице 1.6 приводятся номинальные статические характеристики некоторых термоэлектрических термометров.

Конструктивно термоэлектрический термометр представляет собой две проволоки из разнородных материалов, нагреваемые концы которых скручиваются, а затем свариваются или спаиваются (рис. 1.14). Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды термоэлектрического термометра, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру.

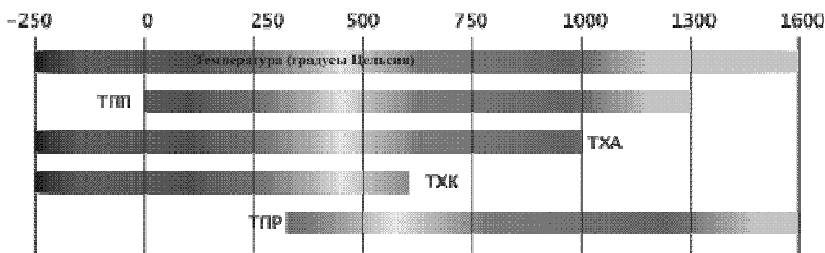


Рис. 1.13. Диапазоны измерения термоэлектрических преобразователей

1.6. Номинальные статические характеристики некоторых термоэлектрических преобразователей

Обозначение НСХ	Температура, °C								
	0	20	40	50	60	80	100	200	300
ХК	0	1,31	2,66	3,35	4,05	5,48	6,95	14,66	22,91
ХА	0	0,80	1,61	2,02	2,43	3,26	4,10	8,13	12,21
ПП-1	0	0,112	0,234	0,299	0,364	0,50	0,643	1,436	2,314

У рабочих термоэлектрических термометров, применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитной гильзы 1, неподвижного 2 или передвижного штуцера с сальниковым уплотнением (на рис. 1.14 не показан) и головки 3, соединённой с неподвижным штуцером с помощью трубки 6 или непосредственно с гильзой при передвижном штуцере. В головке, снабжённой крышкой и патрубком 5 с сальниковым уплотнением, помещена розетка 4 из изоляционного материала с зажимами для присоединения термоэлектродов 7 и проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором или преобразователем. Длина погружаемой (монтажной) части L в среду, температуру которой измеряют, выполняется различной для каждого конкретного типа термоэлектрического термометра.

В качестве изоляции термоэлектродов термометра применяются одно- или двухканальные трубки или бусы – из фарфора (при температуре до 1300 °С) и окислов алюминия, магния или бериллия (свыше 1300 °С), надеваемые на термоэлектроды.

Рабочий конец термоэлектрического термометра можно выполнять путём сварки, пайки или скрутки. Наибольшее распространение получил способ изготовления спая с помощью сварки, а пайку применяют только в специальных случаях. Скрутку рабочего конца часто применяют для термоэлектрических термометров вольфрамрениевой и вольфраммолибденовой групп. Сварку электродов термоэлектрического термометра производят как с предварительной скруткой термоэлектродов, так и без скрутки. Ещё одним вариантом изготовления спая рабочего конца является приварка электродов к дну защитной гильзы.

Выпускаются одинарные (с одним чувствительным элементом) и двойные (с двумя чувствительными элементами) термоэлектрические термометры различных типов. Двойные термометры применяются для измерения температуры в одном и том же месте одновременно двумя вторичными приборами, установленными в разных пунктах наблюдения. Они содержат два одинаковых чувствительных элемента, заключённых в общую арматуру. Термоэлектроды их изолированы друг от друга и от защитного чехла изоляторами 8.

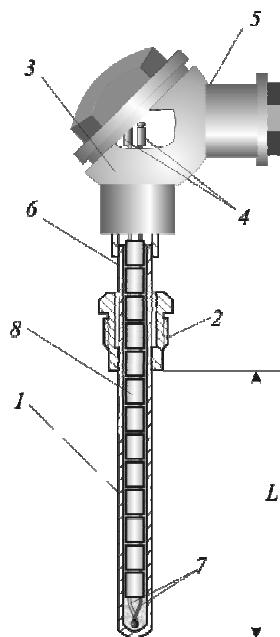


Рис. 1.14. Конструкция термоэлектрического преобразователя

1.3.4. Удлиняющие термоэлектродные провода

При измерении температуры термоэлектрическим термометром его свободные концы должны иметь постоянную температуру, так как колебания последней отражаются на показаниях вторичного прибора. В случае отклонения температуры свободных концов от градуировочного значения, равного 0 °С, к показаниям вторичного прибора вводится соответствующая поправка. Поддержание постоянства температуры свободных концов термометра может производиться с помощью специальных термостатов, что значительно облегчает введение этой поправки, величина которой в этом случае остаётся постоянной.

В настоящее время широко применяется автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термометров при помощи специальных компенсирующих устройств, что не требует обеспечения постоянства этой температуры. Эти устройства располагаются отдельно или встраиваются во вторичный прибор.

При прокладке соединительной линии между термоэлектрическим термометром и вторичным прибором свободные концы термометра, находящиеся на зажимах в его головке, будут расположены около нагретых поверхностей, т.е. в зоне переменной температуры. Чтобы отнести эти концы в зону с постоянной и более низкой температурой, используются так называемые **термоэлектродные (компенсационные) провода**, применяющиеся для удлинения выводов термоэлектрических преобразователей (термопар) при подключении к вторичным измерительным преобразователям (измерительным приборам). Эти провода состоят из двух жил, изготовленных из металлов или сплавов, имеющих одинаковые термоэлектрические свойства с термоэлектродами термометра.

Посредством удлиняющих проводов производится как бы наращивание термоэлектродов термометра, позволяющее отнести свободные концы от места его установки в более благоприятные условия.

Для термометров из благородных металлов удлиняющие провода изготавливаются чаще всего из тех же материалов, что и термоэлектроды, тогда как для термометров из благородных металлов в целях удешевления удлиняющие провода выполняются из материалов, развивающих в паре между собой примерно ту же термоЭДС, что и термометр, для которого они предназначены.

Каждой паре материалов термоэлектродных проводов присваивают буквенное обозначение, а каждому материалу придают определённую расцветку, для чего используют оплётку из цветной пряжи или цветные опознавательные нити, проложенные в проводе.

Для термопар типа ТПП применяют термоэлектродные провода с обозначением П в красной и зелёной оплётке с зелёно-белыми нитями внутри. Материал провода – медь в паре с медно-никелевым сплавом. Для

термопар типа ТХА применяют провода с обозначением М в красной и коричневой оплётке с красно-белыми нитями из меди в паре с константаном. Для термопар ТХК применяют провода с обозначением ХК в фиолетово-жёлтой оплётке с нитями такого же цвета и материалом хромель-копель, т.е. компенсационными проводами могут быть и основные термоэлектроды.

Схема термоэлектрического термометра с удлиняющими проводами и вторичным прибором показана на рис. 1.15.

Термоэлектроды 1 и 2, образующие рабочий конец 3, изолированы друг от друга фарфоровыми трубками 4 и заключены в защитный чехол 5. В головке 6 термоэлектроды посредством двух зажимов 7 соединены удлиняющими проводами 8, к которым посредством соединительных проводов 9 подключён в точках 10 и 11, являющихся свободными концами термометра, вторичный прибор 12. Постоянная температура свободных концов поддерживается термостатирующим устройством 13.

Как было сказано выше, при измерении температуры термоэлектрическими термометрами необходимо вводить поправку на изменение температуры свободных концов термометра.

Чтобы эта поправка в процессе измерений была постоянной, места соединений свободных концов с медными проводами должны быть помещены в специальное устройство, обеспечивающее постоянство температуры. При постоянной температуре свободных концов поправка может быть введена расчётным путём независимо от того, какой измерительный прибор применяется в комплекте с термоэлектрическим термометром. В лабораторных условиях температуру свободных концов обычно поддерживают равной 0° С. Для этой цели свободные концы термоэлектрического термометра, спаянные с медными проводниками, погружают в стеклянные пробирки с небольшим количеством масла, помещённые, в свою очередь, в сосуд Дьюара, наполненный тающим льдом. При этом необходимо, чтобы свободные концы были погружены в лёд на глубину не менее 100...150 мм.

Если при измерении температуры не требуется высокая точность и при этом температура в помещении, где производятся измерения, не меняется заметно, то свободные концы термометра могут находиться при этой температуре, однако в этом случае их следует погрузить в сосуд, заполненный маслом, температура которого должна контролироваться с помощью стеклянного термометра. Этот способ поддержания постоянства температуры свободных концов позволяет контролировать их температуру с погрешностью $\pm (0,2...0,5) ^\circ\text{C}$.

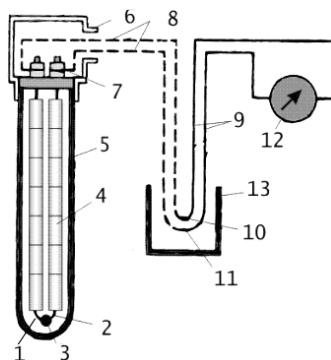


Рис. 1.15. Схема подключения термоэлектродных проводов

Простейшим стационарным устройством, позволяющим в известной мере стабилизировать температуру свободных концов и измерять её, является коробка для свободных концов (коробка холодных спаев). Температуру свободных концов в этой коробке измеряют стеклянным жидкостным или другим термометром. Этот способ стабилизации температуры свободных концов хотя и применяется в эксплуатационных условиях, но является далеко не совершенным.

В последнее время для стабилизации температуры свободных концов термоэлектрических термометров широко применяют специальные термостаты с автоматическим поддержанием температуры. В качестве регулятора температуры обычно применяют простейший биметаллический терморегулятор. Подобные термостаты обеспечивают постоянство температуры в пределах $\pm (0,5 \dots 0,6) \text{ }^\circ\text{C}$.

1.3.5. Установка термоэлектрических термометров

На точность измерения температуры термоэлектрическим термометром большое влияние оказывает способ установки термометра.

Одним из основных требований, предъявляемых при установке термоэлектрического термометра, является достижение минимальной утечки тепла по его арматуре. Для этого термометр как можно глубже погружается в измеряемую среду, что приводит к возрастанию тепловоспринимающей поверхности, и располагается в местах с большой скоростью потока, улучшающей условия теплообмена.

При установке в трубопроводах рабочий конец термометра должен располагаться в середине потока, а в случае небольших диаметров трубо-

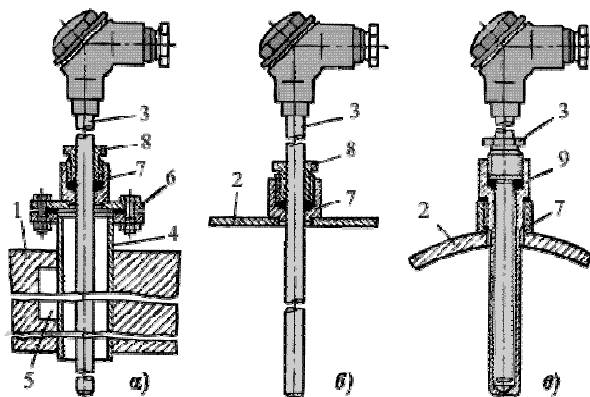


Рис. 1.16. Способы крепления термоэлектрических термометров:

a – в кирпичной кладке; *б* – к плоской стальной стенке; *в* – к стенке трубопровода;

1 – кирпичная кладка; 2 – стенка; 3 – термометр; 4 – защитный патрубок;

5 – фиксирующее ребро патрубку; 6 – фланец; 7 – втулка; 8 – сальник;

9 – защитная гильза

проводов – наклонно, навстречу потоку. При измерении температуры выше 750 °С наиболее правильным является вертикальное расположение термометра, исключающее деформацию защитного чехла под действием высокой температуры. В случае горизонтальной установки защитный чехол термометра должен поддерживаться кронштейном.

На рисунке 1.16 показаны способы крепления термоэлектрического термометра в кирпичной кладке, к плоской стальной стенке и к стенке трубопровода, находящегося под давлением.

1.4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ СОПРОТИВЛЕНИЯ [2, 8]

1.4.1. Физические основы принципа действия термопреобразователей сопротивления

Термопреобразователи сопротивления (термометры сопротивления) широко применяются для измерения температуры в интервале от – 260 до 750 °С. В отдельных случаях они могут быть использованы для измерения температур до 1000 °С.

Термопреобразователи сопротивления – это преобразователи, принцип действия которых основан на свойстве вещества изменять своё электрическое сопротивление с изменением температуры.

Известно, что подавляющее большинство металлов имеет положительный температурный коэффициент электрического сопротивления. Это связано с тем, что число носителей тока (электронов проводимости) в металлах очень велико и не зависит от температуры. Электрическое сопротивление металла увеличивается с повышением температуры в связи с возрастающим рассеянием электронов на неоднородностях кристаллической решётки, обусловленным увеличением тепловых колебаний ионов около своих положений равновесия. В полупроводниках наблюдается иная картина – число электронов проводимости резко возрастает с увеличением температуры. Поэтому электрическое сопротивление типичных полупроводников столь же резко (обычно по экспоненциальному закону) уменьшается при их нагревании. При этом температурный коэффициент электрического сопротивления полупроводников на порядок выше, чем у чистых металлов.

Термометры сопротивления из чистых металлов, получившие наибольшее распространение, изготавливают обычно в виде обмотки из тонкой проволоки на специальном каркасе из изоляционного материала. Эту обмотку принято называть чувствительным элементом термометра сопротивления. В целях предохранения от возможных механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется термометром, его чувствительный элемент заключают в специальную защитную гильзу.

При измерении температуры термометр сопротивления погружают в среду, температуру которой необходимо определить. Зная зависимость сопротивления термометра от температуры, можно по изменению сопротивления термометра судить о температуре среды, в которой он находится.

К числу достоинств металлических термометров сопротивления следует отнести:

- высокую степень точности измерения температуры;
- возможность выпуска измерительных приборов к ним со стандартной градуировкой шкалы практически на любой температурный интервал;
- возможность централизации контроля температуры путём присоединения нескольких взаимозаменяемых термометров сопротивления через переключатель к одному измерительному прибору;
- возможность использования их с информационно-вычислительными машинами.

К недостаткам термометров сопротивления относится потребность в постоянном источнике тока.

Из числа чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина (Pt) и медь (Cu). К материалу металлического термометра сопротивления предъявляются следующие требования:

- химическая инертность;
- постоянство физических свойств в интервале измеряемых температур;
- линейность зависимости сопротивления от температуры;
- высокая чувствительность;
- достаточно большое значение температурного коэффициента сопротивления:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}.$$

Статическая характеристика металлических термометров сопротивления близка к линейной и может быть записана в виде формулы

$$R = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)],$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, Ом/°С; R_0 – сопротивление термометра при температуре t_0 , Ом; R – сопротивление термометра при температуре t , Ом.

Для меди и платины температурный коэффициент сопротивления соответственно равен

$$\alpha_{Cu} = 4,2810^{-3}, 1/^\circ\text{C}; \quad \alpha_{Pt} = 3,9 \times 10^{-3}, 1/^\circ\text{C}.$$

Серийно выпускаемые термопреобразователи сопротивления имеют унифицированные или номинальные статические характеристики (НСХ).

1.4.2. Типы и характеристики термопреобразователей

Основные характеристики серийно выпускаемых металлических термопреобразователей (термометров) сопротивления приведены в табл. 1.7.

1.7. Основные характеристики металлических термопреобразователей сопротивления

Тип термометра	Обозначение НСХ	Пределы измерений, °С		Сопротивление, Ом		Примечание
		нижний	верхний	при 0 °С	при 100 °С	
ТСП	10П	0	650	10	13,91	Платина
ТСП	100П	-200	500	100	139,1	Платина
ТСП	50П	-200	500	50	69,56	Платина
ТСМ	100М	-50	180	100	142,6	Медь
ТСМ	50М	-50	180	50	71,4	Медь

1.8. Статические характеристики металлических термопреобразователей сопротивления

Градуировка	Температура, °С							
	-50	0	20	40	50	60	80	100
50П	39,99	50,0	53,96	57,90	59,85	61,81	65,69	69,56
гр. 21	36,80	46,0	49,64	53,26	55,06	56,86	60,43	63,99
гр. 22, 100П	80,00	100,0	107,91	115,78	119,70	123,60	131,37	139,18
50М	39,24	50,0	54,28	58,56	60,70	62,84	67,12	71,40
гр. 23	41,71	53,0	57,52	62,03	64,29	66,55	71,06	75,58
гр. 24, 100М	78,70	100,0	108,52	117,04	121,3	125,56	134,08	142,62

Номинальные статические характеристики металлических термопреобразователей обозначались ранее гр. 21, гр. 22, гр. 23 и гр. 24. В настоящее время они обозначаются при помощи числа и буквы. Число означает сопротивление чувствительного элемента при 0 °С, а буква – материал, из которого он изготовлен. В таблице 1.8 приведены НСХ некоторых типов термопреобразователей.

1.4.3. Устройство термопреобразователей сопротивления

Термометры сопротивления имеют специальную арматуру, сходную в основном с арматурой термоэлектрических термометров. Арматура состоит из электроизоляции, защитного чехла и головки для присоединения внешних проводов. Она изолирует чувствительный элемент (обмотку) термометра, защищает его от вредного воздействия окружающей среды, обеспечивает необходимую прочность термометра и возможность закрепления его в месте установки.

Термометры сопротивления бывают одинарные и двойные, т.е. с одним и двумя чувствительными элементами. В последнем случае в общем

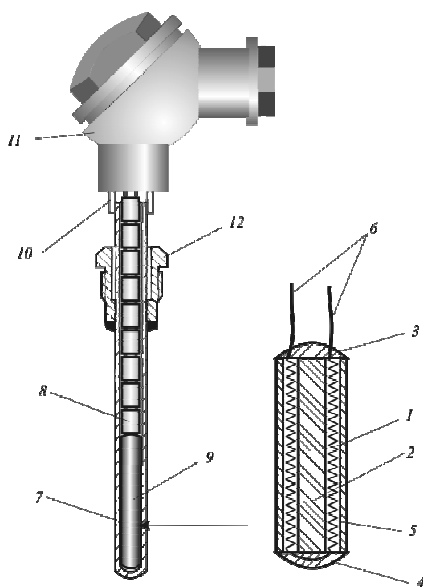


Рис. 1.17. Устройство термопреобразователя сопротивления

защитном чехле расположены два одинаковых чувствительных элемента, подключаемых к двум отдельным вторичным приборам, установленным в разных местах. Длина чувствительного элемента у платиновых термометров сопротивления составляет 30...120 мм, у медных – 60 мм.

На рисунке 1.17 показано устройство платинового термометра сопротивления типа ТСП-5071, предназначенного для измерения температуры жидкости, газа и пара в диапазоне от -260 до 750 °С. Этот термометр виброустойчивый, выпускается одинарным или двойным, различных градуировочных характеристик.

Чувствительный элемент 9 представляет собой платиновую спираль 1 из тонкой проволоки, помещённую в многоканальную

фарфоровую трубку 2 с капиллярными отверстиями. С торцов трубка плотно закрыта пробками 3 и 4. Каналы трубки со спиралью дополнительно заполнены керамическим порошком 5, который одновременно изолирует и поддерживает спираль. К концам спирали припаяны выводные провода 6. Чувствительный элемент термометра вставлен в защитный чехол 7. Выводные провода изолированы фарфоровыми бусами 8. С помощью стальной втулки 10 защитный чехол присоединён к водозащищённой бакелитовой головке 11. В головке выводные провода припаяны к двум винтовым зажимам для подключения внешних проводов. Термометр имеет штуцер 12 для крепления на оборудовании.

1.4.4. Полупроводниковые терморезисторы

Полупроводниковые терморезисторы изготавливаются на основе оксидных материалов с добавлением стабилизирующих веществ (оксидов никеля, углерода, магния), обеспечивающих требуемое значение сопротивления. При помощи пластичного связующего вещества методом прессования смеси придаётся необходимая форма (сферическая, цилиндрическая, бусинковая).

Температурная зависимость сопротивления большинства терморезисторов выражается уравнением $R = A \cdot \exp(B/T)$, где A и B – постоянные

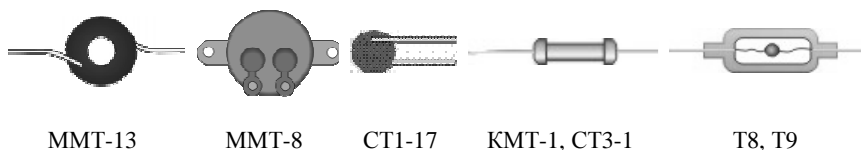


Рис. 1.18. Типы полупроводниковых терморезисторов

коэффициенты; T – температура, К. Эти терморезисторы принято называть термисторами. Они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, и при нагревании сопротивление у них значительно снижается.

Есть другая группа полупроводниковых терморезисторов, у которых температурный коэффициент сопротивления в диапазоне измерения положительна, и они называются позисторами.

Для измерения температуры применяются терморезисторы в виде плоской шайбы, тонкого диска или бусинки небольшого диаметра.

Бусинковые терморезисторы диаметром до 0,5 мм, покрытые глазурью, имеют малую инерцию и могут применяться для измерения быстроменяющихся температур.

Для защиты от возможного агрессивного влияния окружающей среды терморезисторы могут помещаться в тонкостенные стеклянные или металлические трубки, обеспечивающие тепловой контакт с терморезистором.

Некоторые виды терморезисторов приведены на рис. 1.18.

Статические характеристики

Термисторы имеют нелинейную статическую характеристику, общий вид которой представлен на рис. 1.19.

Позисторы имеют также нелинейную статическую характеристику, однако вид её (рис. 1.20) значительно отличается от вида статической характеристики термистора.

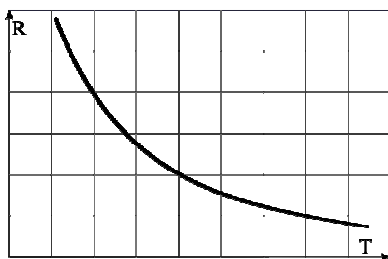


Рис. 1.19. Статическая характеристика термистора

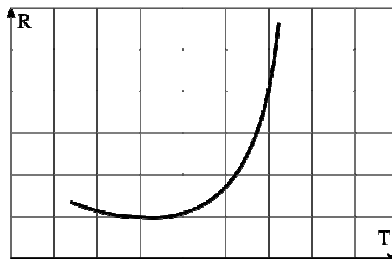


Рис. 1.20. Статическая характеристика позистора

Чувствительность

Чувствительность полупроводниковых терморезисторов намного превышает чувствительность металлических термопреобразователей сопротивления, что является одним из основных достоинств термисторов и позисторов. В то же время высокая чувствительность существенно ограничивает диапазон измерения. Это вызвано тем, что сопротивление рассматриваемых преобразователей изменяется в десятки, сотни и даже тысячи раз при изменении температуры от нижнего предела измерения до верхнего, что вызывает трудности при проектировании электронных схем измерительных приборов.

Следует также заметить, что чувствительность полупроводниковых термопреобразователей изменяется в широких пределах по диапазону измерения (особенно у позисторов).

Сопротивление при 25 °С

Сопротивление полупроводниковых терморезисторов при 25 °С может изменяться от 1 Ом до 10 МОм и более. Оно зависит от размера и формы термистора и определяется составом оксидной смеси. При замене смеси также изменяется и вид температурной зависимости сопротивления (*R-T*-кривая) и меняется стабильность при высоких температурах. Терморезисторы с высоким сопротивлением, как правило, обладают большей стабильностью.

Диапазон измерения

Диапазон измерения большинства полупроводниковых термисторов от –80 °С до 150 °С. Увеличению диапазона кроме перечисленных выше факторов препятствуют следующие причины.

В большинстве термисторов для внутреннего подсоединения выводов используется пайка. Очевидно, что такой термистор нельзя использовать для измерения температур, превышающих температуру плавления припоя. Даже без пайки эпоксидное покрытие термисторов сохраняется лишь при температуре не более 200 °С. Для более высоких температур необходимо использовать термисторы со стеклянным покрытием, имеющие приваренные или вплавленные выводы.

Требования к стабильности также ограничивают применение термисторов при высоких температурах. Структура термисторов начинает изменяться при воздействии высоких температур, скорость и характер изменения в значительной степени определяются оксидной смесью и способом изготовления термистора. Некоторый дрейф термисторов с эпоксидным покрытием начинается при температурах свыше 100 °С. Если такой термистор непрерывно работает при 150 °С, то дрейф может измеряться несколькими градусами за год. Низкоомные термисторы (к примеру, не более 1000 Ом при 25 °С) зачастую ещё хуже – их дрейф может быть замечен при работе приблизительно при 70 °С. А при 100 °С они становятся ненадёжными.

Воспроизводимость

Полупроводниковые терморезисторы одного и того же типа могут иметь большой разброс характеристик. Например, сопротивление при 25 °С низкоомных термисторов изменяется в диапазоне от $\pm 20\%$ до $\pm 5\%$, что существенно ухудшает их взаимозаменяемость.

Однако при соответствующем контроле над технологией и измерениях можно получить значительно более высокую точность. Имеется три типа точных термисторов:

- прецизионные взаимозаменяемые дисковые термисторы;
- прецизионные бусиновые термисторы;
- согласованные бусиновые пары.

Точные термисторы обеспечивают электронную калибровку измерительных инструментов, не требуя точных нагревательных приборов. Взаимозаменяемые термисторы также позволяют заменить термистор без повторной калибровки электронных схем.

Прецизионные взаимозаменяемые дисковые термисторы изготавливаются при тщательном контроле статической характеристики и стабильности оксидной смеси. Смеси, которые не удовлетворяют строгим требованиям, не используются. Термисторы смешиваются, формируются и обжигаются при помощи обычных технологий. Затем каждый термистор опускается в жидкостную ванну при тщательно контролируемой температуре для доводки сопротивления до номинального значения. Перед отправкой параметры каждого термистора измеряются при двух или трёх температурах, и, если они не соответствуют паспортным, термистор бракуется.

Можно приобрести готовые, стандартизованные термисторы с допусками $\pm 0,2$ °С или $\pm 0,1$ °С в диапазоне 0...70 °С и меньшей точностью при -80 °С и $+150$ °С. Имеются специальные высокостабильные дисковые термисторы со стеклянным покрытием, имеющие допуски не выше 0,05 °С. Данные высокоточные, взаимозаменяемые термисторы выпускаются только в виде дисков или квадратов небольшого размера, покрытых эпоксидной смолой или (для более высокой стабильности) стеклом. Несколько изготовителей предлагают некоторые или все из перечисленных ниже номиналов (при 25 °С): 100, 300 и 500 Ом; 1,0, 2,252, 3,0, 5,0, 10,0, 30,0, 50,0, 100,0 и 300,0 кОм и 1 МОм. Термисторы с номиналами 2,252; 3,0 и 5,0 кОм взаимозаменяемы для различных изготовителей; другие термисторы, как правило, – нет. Имеется большое количество температурных датчиков, в которых используется термистор с номиналом 2,252 кОм.

Бусиновые термисторы могут быть очень точными и стабильными, однако их малый размер и способы изготовления делают невозможной доводку до точного значения. Если пользователю необходимо выполнять точные измерения при помощи бусиновых термисторов (которые имеют наиболее малые размеры и наилучшие возможности работы при высоких температурах), он может попросить изготовителя провести измерения и

напечатать значения R - T -кривой (статической характеристики) для каждого термистора. Или же можно указать термисторы, выбранные из ряда номиналов и имеющие определённый допуск при некоторой температуре.

Другим способом, при помощи которого изготовители обеспечивают точность и взаимозаменяемость, является постоянное измерение параметров каждого термистора и последующее соединение выбранных согласованных пар параллельно или последовательно с целью обеспечения кривой определённой формы.

Рассеиваемая мощность

Для того чтобы измерить температуру при помощи термистора, необходимо пропустить через него электрический ток. Прохождение тока через чувствительный элемент (бусинку, диск и т.д.) вызовет разогрев последнего. При некоторой температуре чувствительного элемента наступает тепловой баланс, т.е. вся выделяющаяся мощность в термопреобразователе рассеивается в окружающую среду. Таким образом, если мы хотим обеспечить меньшую погрешность измерения, то должны снижать подводимую мощность или повышать коэффициент теплообмена термистора с окружающей средой, например за счёт обеспечения хорошего контакта чувствительного элемента термистора (или позистора) с поверхностью объекта контроля.

Для большинства термисторов максимально допустимая рассеиваемая мощность находится в пределах от 0,8 до 1,2 мВт.

1.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Акустические термометры. Принцип действия таких термометров основан на зависимости скорости распространения звука в среде от значения термодинамической температуры. Если создать термочувствительный элемент термометра в виде резонатора с газом или жидкостью, то для такой системы будет справедливо уравнение

$$\omega^2 = \frac{RT}{m} \frac{c_p}{c_v},$$

где ω – скорость распространения звука; R – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; m – масса одного моля газа; c_p , c_v – удельная теплоёмкость газа соответственно при постоянных давлении и объёме. Акустические термометры создают также на основе зависимости скорости ультразвуковых волн в твёрдых телах. На рисунке 1.21 показана блок-схема акустического термометра, реализующего метод сравнения. Он содержит первичный преобразователь III с газообразным, жидким или твёрдым термометрическим телом, имеющим температуру T , подлежащую измерению, и опорный первичный преобразователь $ОIII$, также с таким же термометрическим телом, находящимся при известной и постоянной температуре T_0 . В преобразователях распространяется аку-

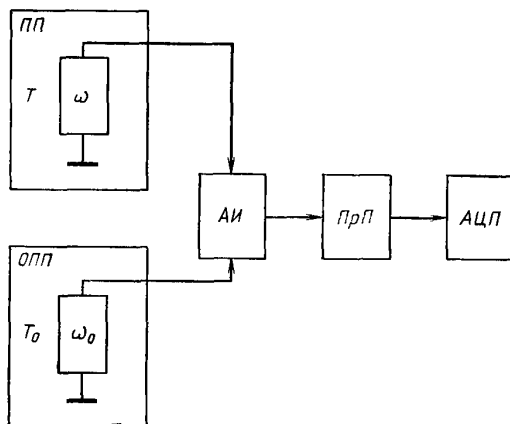


Рис. 1.21. Схема акустического термометра

стическая волна со скоростью ω , зависящей от температуры. При помощи акустического интерферометра (АИ) определяется разность фаз звуковых волн в ПП и ОПП. Промежуточный преобразователь ПрП выполняет функции вычисления скоростей акустических колебаний. Его выходной сигнал, пропорциональный вычисленной скорости, поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП и далее на регистрирующее устройство.

Погрешности измерений с помощью акустического термометра в метрологической практике при реализации на резонаторе с гелием составляют 0,001...0,01 К в диапазоне 4,2...300 К. Для термометра с резонатором из кварца, молибдена, вольфрама или сапфира для промышленного использования погрешность находится в пределах от десятых долей кельвина до 1% при температурах 300...3000 К.

Кварцевые термометры

Кварцевый термометр – это термометр, принцип действия которого основан на температурной зависимости собственной резонансной частоты кварцевого пьезоэлемента. Частота f пьезоэлектрического кристалла кварца обладает высокой стабильностью. Температурная зависимость частоты имеет следующий вид:

$$f(t) = f_0(1 + at + bt^2 + ct^3), \quad (1.16)$$

где t – температура кварца; f_0 – частота при 0 °С; a, b, c – константы, определяемые из эксперимента при различных температурах в ходе совместных измерений.

Если осуществить такой срез кварцевого кристалла, при котором в уравнении (1.16) можно пренебречь членами высоких порядков, т.е. $b = 0$ и $c = 0$, то получается линейная зависимость резонансной частоты от тем-

пературы $f(t) = f_0(1 + at)$. В этом случае кварцевый термометр может быть легко преобразован в цифровой прибор.

В России и за рубежом созданы различные кварцевые термометры. Основной диапазон применения термометров составляет от -80 до 250 °С, разрешение достигает 10^{-6} К, частотный диапазон $5...30$ МГц. Для кварцевого термометра наблюдается гистерезис, достигающий $0,05$ К.

Кварцевый термометр не может применяться для точных измерений температуры из-за гистерезиса. Однако, обладая небольшим временным дрейфом, до $0,005$ К в месяц, термометр может использоваться для относительных измерений с высокой точностью, что определяется его высокой разрешающей способностью по температуре. Кроме того, в связи с наличием частотного выхода термометр имеет преимущество перед другими приборами при его применении в автоматических схемах регулирования тепловых режимов различных объектов.

Магнитные термометры

Практическую температурную шкалу можно строить на основе температурной зависимости магнитной восприимчивости парамагнитных веществ в диапазоне $0,01...0,8$ К. Магнитные термометры создают для этого диапазона на основе церий-магниевого нитрата. Путём адиабатического размагничивания парамагнитных солей можно достичь температуры порядка $0,001$ К.

Уравнение, связывающее термодинамическую температуру с физическими величинами, определяющими свойства термометрического вещества, имеет сложный вид. Для точного определения термодинамической температуры следует учитывать квантово-механическое взаимодействие парамагнитных ионов термометрического вещества и отклонения от закона Кюри.

В 1976 г. была принята Временная температурная шкала в диапазоне $0,5...30$ К на основе магнитного термометра с использованием парамагнитных веществ. Практически измерения выполнялись с применением в качестве термометрического парамагнитного вещества метафосфата гадолиния, этилсульфата неодима и др.

Шумовые термометры

Принцип измерения термодинамической температуры с помощью шумовых термометров (ШТ) основан на формуле Найквиста, устанавливающей зависимость между термодинамической температурой T , спектральной плотностью шумового напряжения U и активным сопротивлением R :

$$U = 4kTR,$$

где k – постоянная Больцмана.

Шумовое напряжение U обусловлено хаотическим тепловым движением носителей электрических зарядов (электронов, ионов) в электропроводной среде и возникает на сопротивлении R , включённом в замкнутую электрическую цепь.

Для среднего квадрата шумового напряжения в полосе частот Δf справедлива формула

$$\overline{U}^2 = 4kTR\Delta f .$$

Формулы проверяли экспериментально при различных частотах для термочувствительных преобразователей из металла, сплавов, графита, электролитов, полупроводников. Шумовые термометры использовались для измерений температуры плазмы, в активной зоне ядерных реакторов, в объектах с высоким давлением. В пределах погрешности измерений формула Найквиста оказалась справедливой.

Первый шумовой термометр был создан в 1949 г. К настоящему времени разработано значительное число схемных решений.

Шумовые термометры (рис. 1.22) состоят из следующих структурных элементов: первичных измерительных преобразователей (*ПИП*), линий связи (*ЛС*), масштабных (*МП*) и промежуточных (*ПрП*) преобразователей и регистрирующих устройств (*РУ*).

Все известные методы измерения с помощью ШТ можно разделить на две группы: метод сравнения с мерой и метод непосредственной оценки.

Метод сравнения предполагает наличие в схеме термометра коммутатора и дополнительного опорного первичного преобразователя *ОПП* в виде известного сопротивления R_0 , находящегося при температуре T_0 и соединённого с регулируемой ёмкостью C_0 линией связи *ОЛС*.

При реализации нулевого метода сравнения тепловой шум *ПИП* с помощью коммутатора замещается равным ему шумом, воспроизводимым мерой *ОПП*.

Рабочая формула имеет вид

$$T = T_0 R_0 / R.$$

В методе непосредственной оценки используют основной канал *ШТ* без дополнительного опорного преобразователя *ОПП*.

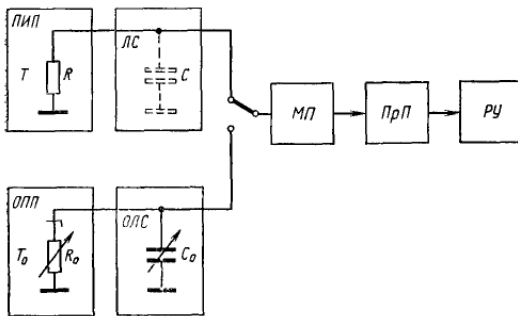


Рис. 1.22. Блок-схема шумового термометра

ПНП разработаны для измерений температуры от сотых долей кельвина до тысяч кельвинов. *ПНП*, используемые в шумовых термометрах, делятся на контактные и бесконтактные. В контактных *ПНП* в качестве чувствительного элемента применяют платину, константан, манганин и нихром. Полупроводниковые *ПНП* нашли применение при измерениях низких температур.

Термоиндикаторы

Термоиндикатор – вещество (смесь веществ), изменяющее свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определённой температуре.

Термоиндикатор плавления – это термоиндикатор, у которого цвет изменяется при критической температуре в связи с плавлением одного или нескольких составляющих компонентов.

Жидкокристаллический термоиндикатор – это термоиндикатор, содержащий жидкокристаллическое вещество, которое в определённом интервале температур изменяет свою структуру так, что падающий на него свет белого источника отражается с изменением цвета, резко зависящим от температуры.

Термоиндикаторы плавления необратимы, т.е. изменяют свой цвет при достижении критической температуры, а затем после снижения температуры, например до нормальной, свой цвет не восстанавливают. Это свойство позволяет применять термоиндикаторы плавления для измерений объектов в труднодоступных местах, для испытаний в полевых условиях с тем, чтобы зафиксировать и затем даже через длительное время (если необходимо) расшифровать в лабораторных условиях картину теплового поля объекта.

По своим электрическим свойствам термоиндикаторы плавления являются диэлектриками, их удельное объёмное электрическое сопротивление, как правило, имеет значения $10^{14} \dots 10^{15}$ Ом·см, а тангенс угла потерь не превышает значения 10^{-3} . Это позволяет применять их в условиях СВЧ-поля и высоких электрических напряжений.

Методика применения термоиндикаторов плавления проста. Термоиндикаторы наносятся кисточкой или стеклянной палочкой на чистую, обезжиренную поверхность объекта измерений. Минимальный диаметр термоиндикаторной метки 1...2 мм. Время высыхания термоиндикаторных меток 30 – 40 мин. При необходимости определить локальную температуру наносится ряд последовательных меток термоиндикаторами с различными критическими температурами. Измеренное значение температуры равно среднему арифметическому значению критических температур термоиндикатора с максимальной температурой из числа изменивших цвет и минимальной из числа не изменивших цвет.

Достоинство термоиндикаторов – возможность нанесения на большие участки объекта измерений, т.е. определения картины теплового поля.

Измерить температурные поля термоиндикаторами плавления можно:

1) методом последовательного нанесения термоиндикаторов на исследуемый объект: первым наносится термоиндикатор с максимальной

критической температурой, близкой (по расчётным или другим данным) к максимальной температуре объекта в наиболее нагретой зоне. Затем с учётом получения первой изотермы наносятся термоиндикаторы с меньшими значениями критической температуры на участки, где не расплавился предыдущий термоиндикатор (с большим значением критической температуры). Нерасплавившийся индикатор удаляется с поверхности объекта спиртом или скипидаром;

2) методом одновременного нанесения узких (1...2 мм) полосок термоиндикаторов с последующим анализом зон плавления и определения изотерм, соответствующих критическим температурам;

3) методом разделения исследуемого объекта на зоны с помощью координатной сетки с последующим нанесением в узлах сетки нескольких (4 – 6) малогабаритных меток (1...2 мм). После проведения измерений точки, имеющие равную температуру, соединяются линиями, образующими изотермы.

Методы нашли применение в промышленности при тепловых испытаниях и конструировании аппаратуры.

Первый метод даёт наиболее полную картину теплового поля объекта, но зато наиболее трудоёмкий. Кроме того, нанесение термоиндикатора на значительную (50...100%) площадь поверхности объекта может исказить температурное поле, обусловленное изменением условий теплообмена объекта измерений с окружающей средой. Оценка погрешности показывает, что в условиях принудительной воздушной конвекции её значение не превышает 1 К при отличии коэффициентов излучения объекта и термоиндикатора до 0,3 и удельных тепловых потоках с поверхности объекта не более $100 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$. В случаях естественной конвекции в воздухе значения погрешности возрастают до 3...5 К, а при пониженном давлении достигают максимального значения 10 К.

В связи с этим в условиях пониженного давления (менее 100 мм рт. ст.) метод последовательного нанесения применять нецелесообразно.

В *жидкокристаллических термоиндикаторах* используются органические соединения, которые при нагревании до определённой температуры плавятся и в процессе плавления проявляют особые свойства. В зависимости от положения молекул в расплавах различаются три жидкокристаллические фазы, называемые мезафазами: смектическая, нематическая и холестерическая. Наиболее ценны как жидкокристаллические термоиндикаторы вещества холестерической структуры. Молекулы в холестерических жидких кристаллах составляют слои, а внутри каждого слоя расположение удлинённых осей молекул параллельно друг другу. Ориентация молекул в каждом из слоёв такова, что от слоя к слою направление изменяется на значение около 15 мин. Это приводит к поляризации света, отражённого от жидкого кристалла, и изменению его цвета. Например, при освещении белым светом, нагреваясь, жидкокристаллический термоиндикатор при определённой температуре становится красным; потом,

нагреваясь до более высокой температуры, он становится оранжевым, затем жёлтым, зелёным, синим, фиолетовым, т.е. образует различную гамму цветов в зависимости от температуры участков объекта измерений. Жидкие кристаллы реагируют на очень незначительные изменения температуры, иногда в пределах 0,01...0,1 К.

Жидкие кристаллы относятся к обратимым термоиндикаторам. Они изменяют цвет при нагревании до температуры, равной или выше критической, а при понижении температуры ниже критической восстанавливают свой первоначальный цвет и структуру. Таким образом, они могут использоваться многократно.

Методика измерения температуры с помощью жидкокристаллических термоиндикаторов заключается в нанесении их на поверхность объекта и освещении белым светом. Для большей цветовой контрастности поверхность объекта целесообразно зачернить (чёрным лаком, тонкой чёрной бумагой или подложкой другого типа). Цветовая картина фиксируется визуально или с помощью фото- или видеоаппаратуры.

Жидкокристаллические термоиндикаторы нашли наиболее широкое распространение при контроле температуры объектов микроэлектроники, а также в медицине при диагностике заболеваний и в других областях науки и техники.

Достоинства жидкокристаллических термоиндикаторов: обратимость; возможность проведения непрерывных измерений и получения полной картины температурного поля (картины изотерм) с помощью одного термоиндикатора; малая инерционность; высокая чувствительность (0,01...0,1 К); сравнительная простота применения.

Недостатки жидкокристаллических термоиндикаторов: сильная подверженность влиянию СВЧ-полей и ряду механических и климатических воздействий (а точнее, их изменению) давления, ультрафиолетового излучения, ударов, γ -облучения и др.; значительная подверженность старению, которая заключается в изменении физических и оптических свойств в процессе эксплуатации и даже хранения – например, снижается температура фазовых переходов, сужается температурный интервал жидкокристаллического состояния, уменьшается интенсивность цвета вплоть до его исчезновения. В целом погрешность измерения температуры с помощью жидкокристаллических термоиндикаторов составляет единицы кельвина.

1.6. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ [1, 3]

При автоматическом измерении температуры с помощью термопар используются два основных метода: непосредственное измерение термоЭДС с помощью милливольтметра и компенсационный метод.

Так как значение термоЭДС, развиваемой термопарой, невелико, для непосредственного её измерения необходимы высокочувствительные

милливольтметры магнитоэлектрического типа. Приборы этого типа работают на основе взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по подвижной рамке. Для создания достаточного вращающего момента при весьма небольшом токе рамка выполняется из большого числа витков тонкого медного провода. Противоположный момент создается спиральными пружинами, по которым и подводится ток в рамку. Шкала милливольтметра градуируется непосредственно в градусах, и на ней указывается тип термопары, для которой предназначен данный милливольтметр.

Обозначим через R_B сопротивление милливольтметра, R_T – сопротивление термопары, R_{Π} – сопротивление соединительных проводов. Ток, проходящий по рамке милливольтметра под действием термоЭДС E_T ,

$$I_B = \frac{E_T}{R_B + R_T + R_{\Pi}}. \quad (1.17)$$

Из этой формулы видно, что показания прибора зависят не только от термоЭДС E_T , но и от сопротивлений R_B , R_T , R_{Π} . Так как шкала прибора уже проградуирована для термопары определённого типа, то сопротивления R_T и R_B уже учтены при градуировке. Сопротивления внешней цепи также указываются на шкале (обычно 0,6; 5; 15 или 25 Ом).

Оценим показания прибора, шкала которого проградуирована в милливольттах. Напряжение на его зажимах $U_B = I_B R_B$.

С учётом (1.17)

$$U_B = \frac{E_T R_B}{R_B + R_T + R_{\Pi}}.$$

Обозначим внешнее сопротивление цепи $R_{вн} = R_T + R_{\Pi}$ и выразим термоЭДС:

$$E_T = \frac{U_B (R_B + R_{вн})}{R_B} = U_B + U_B (R_{вн} / R_B). \quad (1.18)$$

Из формулы 1.18 видно, что измеряемое милливольтметром напряжение будет всегда меньше, чем ЭДС термопары, на $U_B (R_{вн}/R_B)$. Эта величина будет тем меньше, чем больше сопротивление милливольтметра R_B по сравнению с внешним сопротивлением $R_{вн}$. Обычно милливольтметры имеют кроме сопротивления рамки ещё добавочное сопротивление из манганина, что в сумме даёт не менее 100 Ом.

Рассмотрим измерение температуры компенсационным методом с помощью термопары и автоматического потенциометра. На рисунке 1.23 показаны термопара $ТП$, вырабатывающая термоЭДС E_d , и мостовая схема, вырабатывающая компенсирующее напряжение U_k , снимаемое между точками A и B . Разность этих напряжений подаётся на вход усилителя ($У$), который питает управляющую обмотку исполнительного электродвигателя ($ЭД$). Обмотка возбуждения $ЭД$ постоянно подключена к источнику

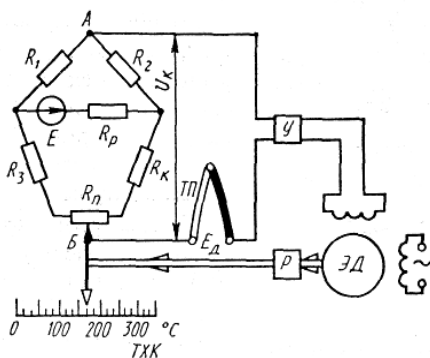


Рис. 1.23. Схема подключения термоэлектрического преобразователя к автоматическому потенциометру

сигнала датчика $E_a = f(T \text{ } ^\circ\text{C})$ соответствует определённое положение указателя на шкале. Шкала проградуирована в $^\circ\text{C}$, и на ней указан тип термопары, для которой выполнена градуировка.

Мостовая схема в данном случае служит не для измерения, а для выработки компенсирующего напряжения U_k и автоматической коррекции из-за изменения температуры холодного спаев. Плечи моста состоят из проволочных резисторов $R_1 - R_3$, выполненных из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления (например, из манганина), и терморезистора R_k , изготовленного из материала с большим температурным коэффициентом сопротивления (например, из меди или никеля). Резистор располагается вблизи холодных спаев термопары. Мост питается от источника постоянного тока E – обычно это батарейка (например, сухой элемент типа ЭСЛ-30). При всяком изменении температуры холодных спаев термопары изменяется E_d и одновременно меняется сопротивление R_k , что приводит к изменению компенсирующего напряжения U_k на ту же величину, на какую изменилось E_d . Следовательно, колебания окружающей температуры не изменяют показаний на шкале прибора. Регулирующее сопротивление R_p служит для установки тока питания моста при разряде батареи (уменьшении E).

Обычно на панели автоматического потенциометра имеется кнопка с самовозвратом, обозначенная словами «Установка рабочего тока». При нажатии этой кнопки, не показанной на рис. 1.23, рабочая цепь прибора размыкается, а усилитель включается на разность ЭДС батарейки и специального стабильного нормального элемента. Если батарейка разрядилась, то под действием разности этих ЭДС, усиленной усилителем, электродвигатель ЭД перемещает движок регулирующего резистора R_p , автоматически устанавливая требуемое значение тока питания моста.

переменного напряжения, а скорость вращения ЭД зависит (примерно пропорционально) от напряжения на его управляющей обмотке. Электродвигатель (ЭД) через редуктор (P) перемещает движок калиброванного реохорда (потенциометрического датчика) R_n до тех пор, пока напряжение U_k не сравняется с E_d . Одновременно перемещаются указатель на шкале прибора и перо самописца. При $U_k = E_d$ напряжение на входе усилителя равно нулю ($U_k - E_a = 0$) и электродвигатель (ЭД) остановится. Каждому значению выходного

1.7. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ [4]

Термопреобразователи сопротивления (ТПС) относятся к параметрическим датчикам температуры, поэтому всегда измерительные схемы на основе ТПС должны иметь источник питания.

При этом источник питания должен быть таким, чтобы разогревом чувствительного элемента за счёт протекания по нему тока можно было пренебречь.

Как правило, измерительный преобразователь подключается к измерительной схеме за счёт соединяющего кабеля, имеющего своё собственное сопротивление, которое к тому же может зависеть от температуры окружающей среды. Если термопреобразователь подключён по *двухпроводной* схеме, то может возникнуть погрешность измерения температуры в месте установки чувствительного элемента (рис. 1.24). Это объясняется тем, что в данном случае к падению напряжения на термопреобразователе прибавляется падение напряжения на сопротивлениях $R_{л}$ подводящих проводов.

Если изменится температура окружающей среды, то это вызовет изменение сопротивления $R_{л}$, падения напряжения на этом сопротивлении и напряжения $U_{\text{вых}}$, по которому судят о температуре объекта контроля.

Чувствительность к температуре окружающей среды можно уменьшить, добавив в измерительную систему один или два дополнительных провода, получив таким образом трёхпроводную или четырёхпроводную схему включения.

При *трёхпроводной* схеме включения (рис. 1.25) к чувствительному элементу термопреобразователя сопротивления R_K подключаются три

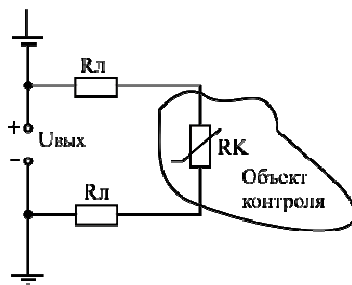


Рис. 1.24. Двухпроводная схема подключения термопреобразователей

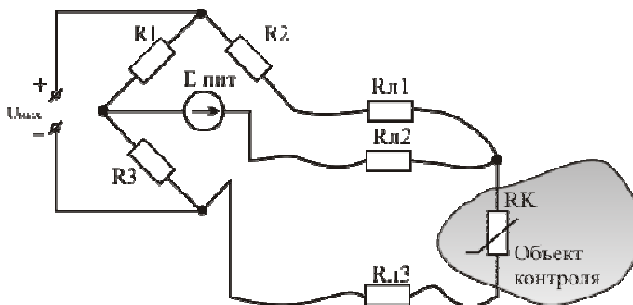


Рис. 1.25. Трёхпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления

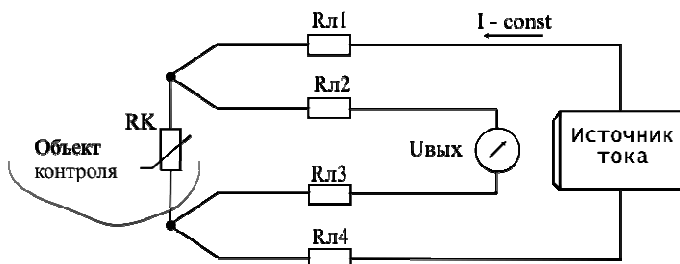


Рис. 1.26. Четырёхпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления

провода, один из которых является питающим, а два других включены в смежные плечи мостовой схемы. Изменение температуры окружающей среды не будет сказываться на напряжении $U_{\text{вых}}$, при условии, что проводники с сопротивлением $R_{\text{л1}}$ и $R_{\text{л3}}$ всегда имеют одинаковые температуры.

Сопротивления подводящих проводов при такой схеме включения необходимо подгонять до одного из стандартных значений: 2,5 Ом, 5 Ом или 10 Ом, иначе изменение длины кабеля может повлиять на точность измерения температуры.

При *четырёхпроводной* схеме включения (рис. 1.26) по двум проводам с сопротивлениями $R_{\text{л1}}$ и $R_{\text{л4}}$ к термопреобразователю подводится постоянный ток (обычно 5 мА), а с помощью проводников с сопротивлениями $R_{\text{л2}}$ и $R_{\text{л3}}$ от термопреобразователя на измерительный прибор отводится падение напряжения, пропорциональное сопротивлению R_K и температуре объекта контроля.

Если источник тока обеспечивает стабильный ток при различных сопротивлениях нагрузки, а входное сопротивление измерительного прибора достаточно велико, то результат измерения не зависит ни от температуры подводящих проводов, ни от их длины.

1.8. ЦИФРОВЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ [1, 2]

Рассмотрим один из наиболее распространённых вариантов устройства цифрового термометра (ЦТ), входным датчиком которого является термоэлектрический преобразователь.

На рисунке 1.27 приведена упрощённая структура контактного ЦТ, которая напоминает структуру любого цифрового измерительного прибора.

Термопара подключается к входу усилителя, назначение которого поднять уровень входного сигнала с единиц-десятков милливольт до единиц вольт. Аналого-цифровой преобразователь преобразует усиленный сигнал ТП в цифровой код, пропорциональный уровню термоЭДС и, следовательно, значению измеряемой температуры. В автономных ЦТ, как правило, применяются АЦП, использующие интегрирующие методы пре-



Рис. 1.27. Структурная схема цифрового термометра

образования, обеспечивающие высокие точность, чувствительность, разрешающую способность, высокое подавление периодических помех общего и нормального вида, уровень которых может быть значительным. Выходной код АЦП запоминается (и затем некоторое время хранится) в регистре и выводится на цифровой индикатор (цифровое отсчётное устройство). Микропроцессорный контроллер управляет работой всех узлов прибора. Он же выполняет функцию линейаризации статической характеристики. С помощью клавиатуры оператор задаёт режимы работы. В структуре прибора может присутствовать интерфейс для обмена информацией с внешними цифровыми устройствами (например, для передачи результатов регистрации в персональный компьютер и(или) в систему автоматизированного управления).

1.9. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ [4]

Для измерения температуры можно использовать тепловое излучение, так как известно, что различные свойства (параметры) теплового излучения нагретых тел зависят от их температуры. При этом, естественно, нет необходимости в непосредственном контакте средства измерения и объекта измерения. Таким образом, методы, основанные на различных принципах преобразования теплового излучения объекта измерения в непосредственно измеряемую физическую величину, называют бесконтактными или **пирометрическими методами измерения** температуры, а средства измерения, реализующие эти методы, – пирометрами.

Раздел температурных измерений, который изучает методы и средства измерения температуры бесконтактным способом, называют пирометрией.

Тепловое излучение – излучение, возникающее в результате теплового возбуждения частиц вещества (атомов, молекул). Энергия такого излучения определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Тепловое излучение носит электромагнитный характер, т.е. представляет собой совокупность электромагнитных волн или фотонов. Оно, как и всякое излучение, описывается энергетическими и спектральными (частотными) характеристиками.

Область частот, в которой имеет место излучение, иными словами, спектр излучения, может быть сплошным, линейчатым и полосовым. Спектр газов носит линейчатый или полосовой характер. Для твёрдых и жидких тел характерно наличие сплошного спектра излучения. В дальнейшем мы будем иметь в виду сплошной спектр.

В спектре электромагнитных излучений выделяют несколько областей, в том числе: оптическую, гамма-излучений, радиочастот. В пирометрии в основном используется оптическая область спектра и менее – область радиочастот.

Оптическая область, в свою очередь, подразделяется на области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения.

Диапазон ультрафиолетового излучения распространяется от 50 \AA до $0,40 \text{ мкм}$. Видимая область спектра, т.е. область, в которой чувствительность человеческого глаза отлична от нуля, весьма узка – от $0,40$ до $0,76 \text{ мкм}$. Инфракрасная область спектра распространяется от $0,76$ до 1000 мкм .

Монохроматическим называют излучение, соответствующее достаточно узкому интервалу частот, который может быть охарактеризован одним значением частоты (длины волны).

Интегральное излучение – это излучение, соответствующее всему спектру частот (длин волн) в пределах от нуля до бесконечности.

С энергетической точки зрения излучение могут характеризовать следующие величины: поток излучения, сила излучения, энергетическая светимость, энергетическая яркость.

Поток излучения Φ (мощность излучения) равен энергии W , излучаемой поверхностью в полусферу в единицу времени: $\Phi = dW/dt$. Измеряется поток излучения в ваттах.

Сила излучения I – это пространственная плотность излучения, равная энергии, излучаемой телом в данном направлении за единицу времени внутри единичного телесного угла Q : $I = d\Phi / d\Omega$. Измеряется в ваттах на стерадиан.

Энергетическая светимость M равна потоку излучения, отнесённому к единице излучающей поверхности A : $M = d\Phi / dA$. Измеряется в ваттах на квадратный метр.

Энергетическая яркость L равна энергии излучения, испускаемого в единицу времени в единичный телесный угол в данном направлении площадью, проекция которой на плоскость, перпендикулярную к данному направлению, равна единице площади.

Всякое тело, температура которого отлична от абсолютного нуля, излучает, и энергия этого излучения зависит от температуры тела и его оптических свойств. Широкое различие этих свойств приводит к тому, что излучение различных тел даже при одинаковой температуре будет весьма

различно. Сравнить излучение этих тел удобно, вводя понятие коэффициента излучения, т.е. коэффициента, который характеризовал бы излучение интересующего нас тела по отношению к какому-либо принятому за образцовое (опорное). В этом случае коэффициент будет отражать различие в оптических свойствах тел.

В качестве образцового принимают так называемое «чёрное тело» или «абсолютно чёрное тело», излучение которого зависит только от его температуры. Такие тела в природе не встречаются, приближением к ним являются различные виды сажи и металлической черни. Ещё лучшим приближением в широком диапазоне температур являются равномерно нагретые полости различной конфигурации, которые и используют на практике в качестве моделей чёрного тела.

«Чёрное тело» поглощает всё падающее на него излучение (отсюда и его название) независимо от длины волны этого излучения, направления падения и его поляризации. Следовательно, излучение любого тела может оцениваться через коэффициент излучения как доля чёрного излучения. Различают спектральный и интегральный коэффициенты излучения, которые обычно обозначают соответственно через $\varepsilon_\lambda = L_\lambda / L_\lambda^0$ и $\varepsilon = L_\Sigma / L_\Sigma^0$, где L_λ^0 и L_λ – спектральные энергетические яркости чёрного и реального тел при одинаковой температуре и длине волны; L_Σ^0 и L_Σ – интегральные энергетические яркости тех же тел.

Очень часто используется понятие «серое тело». Это неселективный излучатель с коэффициентом излучения, меньшим единицы. Характер спектрального распределения излучения таких тел подобен чёрному. Обычно реальные тела имеют «серый» характер излучения в каком-либо ограниченном участке спектра. В этом случае говорят, что тело серое в данном участке спектра. С достаточным приближением серым излучением обладают некоторые диэлектрики в ИК-области спектра или окисленные и шероховатые металлические поверхности.

Распределение спектральной энергетической яркости абсолютно чёрного тела хорошо описывается законом Планка

$$L_\lambda^0 = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1},$$

где λ – длина волны; T – абсолютная температура; c_1, c_2 – константы излучения.

Изотермы излучения абсолютно чёрного тела приведены на рис. 1.28.

Для абсолютно чёрного тела (которое поглощает 100% падающего на него излучения) характерны следующие закономерности теплового излучения (см. рис. 1.28):

- при повышении температуры тела возрастает спектральная энергетическая яркость и светимость на всех длинах волн;

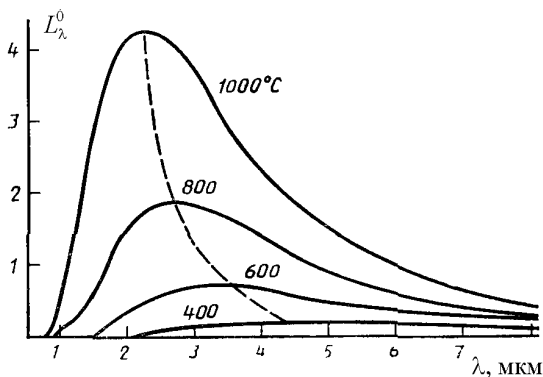


Рис. 1.28. Изотермы излучения абсолютно чёрного тела

- при нагревании тела максимум спектральной светимости смещается в сторону более коротких длин волн (закон смещения Вина);
- с ростом температуры тела возрастает полная (интегральная) светимость поверхности объекта.

Данные закономерности положены в основу принципа действия яркостных, цветовых и радиационных пирометров.

1.9.1. Яркостные пирометры

Зависимость спектральной энергетической яркости теплового излучения тела от температуры этого тела положена в основу принципа яркостных пирометров, один из вариантов исполнения которых показан на рис. 1.29.

На рисунке 1.29 изображена схема оптического пирометра «с исчезающей нитью», принцип действия которого основан на сравнении яркости объекта измерения и яркости градуированного источника излучения в определённой длине волны.

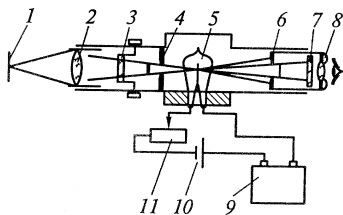


Рис. 1.29. Схема яркостного пирометра:

- 1 – излучатель; 2 и 3 – линза;
4 и 6 – диафрагма; 5 – нить накаливания;
7 – светофильтр; 8 – линза окуляра;
9 – регистрирующий прибор;
10 – источник питания; 11 – реостат

Изображение излучателя 1 с линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется в плоскости нити накаливания 5. Оператор через диафрагму 6, линзу окуляра 8, красный светофильтр 7 на фоне раскалённого тела видит нить лампы. Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркостей нити и излучателя. Момент «исчезания»

нити на фоне объекта соответствует равенству яркостей нити и объекта излучения. Регистрирующий прибор 9 фиксирует силу тока, соответствующую этому моменту, и позволяет произвести считывание результата измерения температуры объекта излучения, °С. Красный светофильтр 7 пропускает область излучения с шириной около 0,1 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм. Данный тип пирометров позволяет измерять температуры в интервале 700...8000 °С. Основная допустимая погрешность измерения для интервала температур 1200...2000 °С составляет ± 20 °С.

Достоинством таких приборов является простота и удобство в работе. Недостатком – субъективизм, а также то, что измеряется так называемая яркостная температура, которая отличается от действительной. **Яркостная температура** – условная температура нечёрного тела, численно равная такой температуре чёрного тела, при которой их спектральные энергетические яркости равны. Для определения действительной температуры следует ввести поправку на степень черноты поверхности объекта.

1.9.2. Цветовые пирометры

Чем выше температура и интенсивней тепловое движение носителей заряда в теле объекта, тем на более высоких частотах идёт излучение. Растёт значение спектральной энергетической светимости на всех длинах волн, но преимущественно на коротких. Кривая спектра, поднимаясь, одновременно сдвигается в сторону коротких волн. Положение максимума λ_{\max} смещается по правилу $\lambda_{\max} = b/T$, где b – константа. Это закон Вина.

Таким образом, при увеличении температуры вместе с ростом интенсивности света, воспринимаемой зрением как яркость, меняется соотношение различных частотных составляющих. Меняется относительное возбуждение различных типов чувствительных клеток сетчатки – колбочек, меняется воспринимаемый зрением цвет. Очень условно можно предполагать, что железная кочерга, нагретая до температуры до 1000 К, излучает только инфракрасное излучение. При дальнейшем увеличении температуры спектр переходит в видимый диапазон, и тело начинает светиться темно-красным цветом (красное каление). Затем свет станет ярче, в спектре появится оранжевый цвет, затем увеличится доля жёлтого, зелёного, голубого, синего и фиолетового (в соответствии с правилом *Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан*). Цвет перейдёт из тёмно-красного в красно-оранжевый = светло-красный, затем в красно-оранжево-жёлтый = рыжий, затем красно-оранжево-жёлто-зелёный = рыже-жёлтый, затем в красно-оранжево-жёлто-зелёно-голубой = светло-жёлтый, затем в красно-оранжево-жёлто-зелёно-голубо-синий = очень светло-жёлтый, затем в спектре будут почти в равном соотношении все цвета радуги, и цвет станет почти белым (белое каление). Температура рыжего пламени свечи – 1900 К, рыже-жёлтой нити накаливания – 3200 К, светло-жёлтой поверхности солнца – 5600 К.

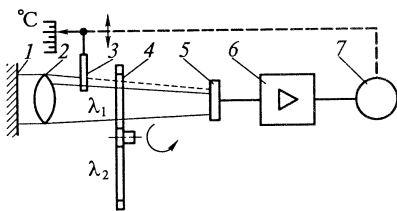


Рис. 1.30. Функциональная схема цветового пирометра:

- 1 – объект измерения; 2 – объектив;
 3 – фильтр; 4 – obtюратор;
 5 – фотоэлемент; 6 – усилитель;
 7 – реверсивный двигатель

Таким образом, цвет нагретого объекта зависит от его температуры. Приборы, основанные на использовании данной закономерности, называются цветовыми пирометрами. Как правило, они определяют температуру по отношению светимостей для фиксированных длин волн излучения. Это отношение однозначно зависит от положения максимума спектральной энергетической светимости, а значит и от температуры.

Функциональная схема цветового пирометра приведена на рис. 1.30.

Эти пирометры измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определённых участках спектра. Основное преимущество таких пирометров заключается в независимости их показаний от излучательной способности объекта, а также от наличия дыма, пыли и испарений в пространстве между объектом и пирометром.

Световой поток от объекта измерения 1 прерывается obtюратором 4 с двумя светофильтрами, пропускающими излучение на двух длинах волн λ_1 и λ_2 к фотоэлементу 5, что вызывает появление на выходе фотоприёмника переменного сигнала, амплитуда которого пропорциональна отношению спектральных светимостей входных потоков света. Таким образом, амплитуда переменной составляющей выходного сигнала зависит от температуры поверхности объекта контроля. Переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника усиливается в усилителе 6 и подается на реверсивный двигатель 7, который перемещает уравнивающий фильтр 3 до тех пор, пока не уравниваются интенсивности излучения на обеих длинах волн. В положении равновесия переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника исчезает, а перемещение фильтра 3 является мерой измеряемой температуры.

Диапазон измерения от 1000 до 2500 °С. При использовании инфракрасных фотоприёмников нижний предел температурного диапазона может быть уменьшен до 20...50 °С. Достоинством таких приборов является то, что для «серых» тел измеряется действительная температура. Напомним, что серым называется тело, степень черноты поверхности которого можно принять постоянной в широком диапазоне длин волн излучения.

1.9.3. Радиационные пирометры (полного излучения)

На использовании зависимости полной (интегральной) светимости теплового излучения тела от температуры основан принцип действия радиационных пирометров. Приборы такого типа широко используют

для измерения низких температур – 20...100 °С.

Приёмники полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянно в широком диапазоне длин волн – от дальней инфракрасной области до ближней ультрафиолетовой. Для увеличения поглощательной способности чувствительные поверхности приёмников излучения окрашивают в чёрный цвет. Для уменьшения теплоотвода в среду приёмник помещают в вакуумированные или газонаполненные корпуса.

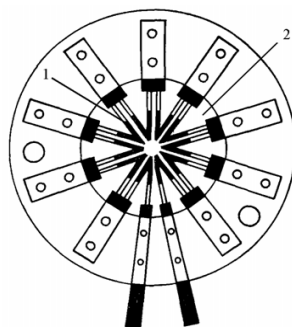


Рис. 1.31. Конструкция термопары

В качестве приёмников применяются термопары или болометры.

Термопары – последовательно соединённые термоэлектрические преобразователи (до 20 термопар). Их горячие спаи 1 (рис. 1.31) располагаются на узком участке зачернённой поверхности 2, на который фокусируется излучение.

Болометры – это термометры сопротивления, изготовленные либо из фольги проводящих материалов, либо из полупроводников (термисторов).

Тепловые быстродействующие индикаторы выполняются в виде тонкослойной термопары или болометра, в которых активный слой имеет хороший тепловой контакт с основанием. Это даёт возможность повысить быстродействие (время успокоения до 10^{-9} с). Они применяются для идентификации мощных сигналов, например лазерного излучения.

Пироэлектрические приёмники – это кристаллы с определённым видом симметрии, в которых в зависимости от изменения температуры проявляется эффект спонтанной поляризации.

Пирометры полного излучения подразделяются на пирометры с преломляющей оптической системой (рис. 1.32, а) и пирометры с отражающей оптической системой (рис. 1.32, б).

В первом случае излучение от объекта измерения 1 через линзовый объектив 2 и диафрагму 3 поступает на приёмник полного излучения 4. Для

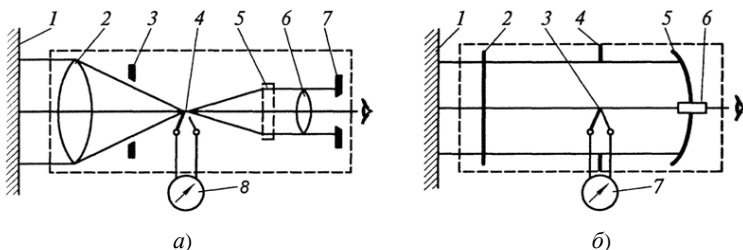


Рис. 1.32. Схема пирометров полного излучения

наводки на объект измерения служит окуляр 6 с дымчатым светофильтром 5 и диафрагмой 7. Отсчётным устройством является милливольтметр 8.

В пирометрах с отражающей оптической системой (см. рис. 1.32, б) излучение от объекта измерения 1 попадает на приёмник излучения 3 после прохождения через защитную полиэтиленовую плёнку 2, диафрагму 4 и зеркальный объектив 5. Для наводки на объект излучения служит зрительная труба 6. Отсчёт показаний производится по шкале милливольтметра 7. Полиэтиленовая плёнка прозрачна для инфракрасного излучения и служит для защиты оптической системы пирометра от загрязнения потоков воздуха.

1.9.4. Тепловизоры

Пирометры позволяют измерять температуру локальной точки объекта контроля. Для визуализации температурных полей применяют тепловизоры.

Принцип действия сканирующего тепловизора (рис. 1.33) заключается в просмотре по заданному закону движения поверхности объекта узким лучом, сформированным оптической системой. Обзор происходит с помощью сканирующей системы в пределах угла поля зрения за время, которое принято называть временем кадра. По такому же закону движения происходит перемещение луча по экрану кинескопа. При этом интенсивность луча и яркость изображения зависят от сигнала приёмника ИК-лучей, который в свою очередь зависит от температуры участка поверхности объекта. Таким образом, на экране кинескопа получают области с различной градацией яркости, которые и составляют тепловое изображение объекта.

Детектором современных тепловизоров (рис. 1.34) является матрица из неохлаждаемых микроболометров, на которую проецируется изображение объекта. По сигналам совокупности микроболометров, преобразованным в цифровой вид, можно восстановить тепловое изображение

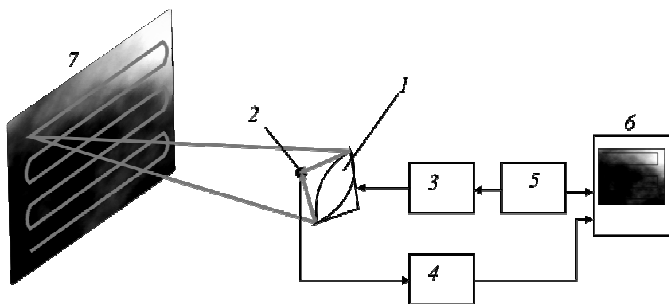


Рис. 1.33. Структурная схема сканирующего тепловизора:

1 – приёмная оптическая система; 2 – приёмник ИК-лучей;
3 – сканирующая система; 4 – усилитель; 5 – система синхронизации и развёртки; 6 – кинескоп; 7 – поверхность объекта контроля

объекта. Использование микропроцессора в современных тепловизорах позволяет осуществить следующие функции:

- композитное отображение термограммы и видеоизображения;
- изменение уровня температур и чувствительности в режиме стоп-кадра;
- индикация температуры в нескольких точках объекта;
- индикация значения разности температур между двумя точками;
- индикация максимальной/минимальной температуры, измеряемой по всему изображению или по отдельной его части (с фиксацией максимальных значений);
- выделение нескольких областей измерений с индикацией максимальной, минимальной и средней температуры.

Современные тепловизоры имеют диапазон измерения от -40 до 2000 °С и разрешение по температуре не больше $0,1...0,3$ °С. Существенным неудобством является то, что приёмник ИК-излучения некоторых тепловизоров должен охлаждаться жидким азотом или термоэлектрическим микрохолодильником.

В последние годы во многих странах тепловизоры внедрены для контроля за тепловым загрязнением водоёмов, для обнаружения утечек горячей воды и пара из тепловых коммуникаций, утечек тепла из зданий и сооружений. В железобетонных трубах тепловым контролем выявляются следующие дефекты: трещины, нарушения сцепления бетона с арматурой, места течей конденсата, разрушения швов бетонирования. Эти дефекты влияют на температурное поле трубы и вызывают повышенное потребление энергоносителя котлом. Обычный визуальный осмотр сопряжён со значительными трудностями при работе на высоте, требует остановки котлоагрегатов на 2–3 суток. А использование тепловизора позволяет найти дефекты в течение нескольких часов без остановки котла.

Тепловизор – дорогостоящий прибор: стоимость его от 25 долларов до 80 тыс. долларов. Но, по зарубежным данным, он окупает себя всего за 3 месяца, поскольку около 10% всех дымовых труб оказываются повреждёнными, один неисправный паровой кран может причинить ущерб до 1,5 тыс. долларов в год. Своевременное обнаружение и ликвидация этих повреждений уберёжет предприятие от огромных убытков. В отдельных случаях за один день работы можно обнаружить столько дефектов, что это окупит стоимость тепловизора. Например, на химических, металлургических, машиностроительных заводах, не говоря уже об объектах атомной энергетики, стоимость ликвидации аварии может во много раз превышать стоимость тепловизора.



Рис. 1.34. Внешний вид современного тепловизора

2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ [5, 6]

2.1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Теплофизические свойства принято делить на несколько групп. Первую группу составляют равновесные теплофизические свойства веществ, являющиеся функциями состояния. К этой группе относятся так называемые термодинамические свойства, которые в свою очередь подразделяются на термические и калорические. К термическим свойствам относят плотность вещества, к калорическим свойствам – внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию, теплоёмкость.

Ко второй группе теплофизических свойств веществ относят «переносные» свойства, такие как теплопроводность, вязкость, диффузия. Эти свойства характеризуют неравновесные процессы в физических средах. К теплофизическим свойствам относят также некоторые оптические свойства, связанные с поглощением и испусканием теплового излучения.

Рассмотрим некоторые теплофизические свойства веществ и материалов, методы и средства их измерения и контроля.

Единицей количества теплоты Q является джоуль (Дж). Джоуль – это количество теплоты, эквивалентное механической работе (энергии) 1 Дж. В технике пока ещё нередко применяется старая (внесистемная) единица количества теплоты – калория (кал). Соотношение между ними:

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Тепловой поток Φ – это количество теплоты, проходящей через поперечное сечение за единицу времени t : $\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau}$.

Тепловой поток измеряется в единицах мощности (Дж/с), которые могут быть переведены в другие единицы мощности:

$$1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м/с}.$$

Для грубых практических расчётов можно принимать $1 \text{ ккал/ч} = 1 \text{ Вт}$.

Плотность теплового потока q определяется как количество теплоты, проходящей за единицу времени через единицу площади поверхности (S).

Единицей измерения плотности теплового потока является Дж/(с·м²).

Теплоёмкость вещества C (ранее называвшаяся также водяным эквивалентом) означает изменение теплосодержания вещества (энтальпии) при изменении его температуры на 1 К:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}.$$

Единицей измерения теплоёмкости является джоуль на кельвин; $1 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}$ – это теплоёмкость тела, температура которого повышается на 1 К при подведении к нему количества теплоты 1 Дж.

Напомним, что кельвин (К) – это 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Удельная теплоёмкость вещества – это величина, равная количеству теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 К.

Единица удельной теплоёмкости – джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг·К)).

Молярная теплоёмкость – это величина, равная количеству теплоты, необходимой для нагревания 1 моля вещества на 1 К:

$$C_m = \Delta Q / \nu \Delta T ,$$

где ν – количество вещества, выражающее число молей.

Моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг.

Удельная теплоёмкость c связана с молярной C_m следующим соотношением:

$$C_m = cM ,$$

где M – молярная масса вещества.

Различают теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении, если в процессе нагревания вещества его объём или давление поддерживается постоянным.

Внутренняя энергия моля твёрдого тела определяется из зависимости

$$U_m = 3RT ,$$

где R – молярная газовая постоянная.

Молярная теплоёмкость твёрдого тела (химически простых тел) не зависит от температуры, Дж/(моль·К):

$$C_v = 3R = 25 .$$

Молярная теплоёмкость твёрдых химических соединений, Дж/(моль·К):

$$C_v = 3nR \approx 25n ,$$

где n – число атомов в молекуле.

Вблизи нуля кельвина теплоёмкость тел пропорциональна T^3 . Алмаз, например, имеет теплоёмкость, равную $3R$ при 1800 К. Если в одной области вещества (газа, жидкости, твёрдого тела) энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, иными словами, выравнивания температур. Изменение температуры в пространстве характеризуется градиентом температуры.

Передача теплоты вследствие наличия такого свойства вещества, как теплопроводность, всегда происходит в направлении уменьшения температуры.

Теплопроводность – это величина, численно равная плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице.

Теплопроводность λ характеризует способность вещества проводить теплоту. Она зависит от природы вещества, температуры и в меньшей степени от давления. Единица измерения – ватт на метр-кельвин (Вт/(м·К)).

При температуре больше 100 К значения теплопроводности изменяются в следующих пределах: для газов – 0,005...0,5 Вт/(м·К); для капельных жидкостей – 0,08...0,7 Вт/(м·К); для твёрдых тел – 0,02...400 Вт/(м·К). Для твёрдых тел нижняя часть диапазона λ (0,02...3,0 Вт/(м·К)) относится к диэлектрикам; материалы с коэффициентом менее 0,2 Вт/(м·К) используются как теплоизоляционные, а значения коэффициента λ от 20 до 400 Вт/(м·К) характерны для металлов и сплавов.

Коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, где ρ – плотность

материала. В английском языке этот коэффициент называется «thermal diffusivity», т.е. коэффициент диффузии тепла.

Коэффициент теплообмена характеризует процесс обмена теплотой между твёрдой поверхностью и жидкостью (газом) путём и теплопроводности, и конвекции одновременно. Единица измерения – ватт на квадратный метр-кельвин (Вт/(м²·К)).

Существуют три различных способа передачи тепла – кондуктивный, конвективный и лучистый. *Кондуктивный теплообмен* – теплообмен вследствие молекулярного переноса теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры. *Конвективный теплообмен* – теплообмен внутри области, заполненной жидкой или газообразной средой, вследствие перемещения этой среды. *Лучистый теплообмен* – теплообмен между телами или частями тела, обусловленный переносом теплоты в виде электромагнитных волн.

В действительности элементарные виды теплообмена не обособлены и в чистом виде встречаются редко. В большинстве случаев один вид теплообмена сопровождается другим. Например, обмен теплотой между твёрдой поверхностью и жидкостью (или газом) осуществляется в основном путём кондуктивного и конвективного теплообмена при наличии лучистой составляющей теплообмена.

Коэффициент теплопередачи K характеризует процесс переноса тепла от одной жидкой среды к другой через разделяющую их твёрдую стенку. Единица измерения коэффициента теплопередачи аналогична коэффициенту α – Вт/(м²·К).

Важными величинами теплофизических свойств веществ и материалов являются температурные коэффициенты линейного и объёмного расширения.

Температурный коэффициент линейного расширения α – это изменение тела длиной в 1 м при изменении его температуры на 1 К. Единица измерения – метр на метр-кельвин (м/(м·К)).

Температурный коэффициент объёмного расширения α_v – это изменение объёма тела (вещества) в 1 м^3 при изменении его температуры на 1 К . Единица измерения – кубический метр на кубический метр-кельвин ($\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$).

Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание двух соприкасающихся газов, жидкостей и твёрдых тел. Диффузия сводится к обмену масс частиц этих тел; она возникает и продолжается, пока существует градиент плотности.

Плотность потока массы – величина, определяемая массой вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси.

Диффузия (*коэффициент диффузии*) численно равна плотности потока массы при градиенте плотности, равном единице.

Методы и средства измерения и контроля теплофизических свойств веществ и материалов достаточно разнообразны.

Теплофизические измерения подразумевают определение пространственно-временного изменения так называемого температурного поля

$$T = f(x, y, z, \tau),$$

характерного для рассматриваемого процесса. В формуле использованы обозначения: T – температура; x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе; τ – время; f – обозначение функции, определяющей зависимость температуры T от координат x, y, z и времени τ .

Температурное поле – совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого тела или системы тел в данный момент времени, описываемая математически скалярной функцией координат.

Стационарным температурным полем называется такое поле, значение которого в любой его точке не изменяется во времени, т.е. является функцией только пространственных координат x, y, z :

$$T = F(x, y, z), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0.$$

Температурные поля (2.1) трёхмерные, так как являются функциями трёх координат. Если температура есть функция только двух пространственных координат x, y :

$$T = f_2(x, y, \tau), \quad (2.2)$$

$$T = F_2(x, y), \quad (2.3)$$

то температурные поля (2.2), (2.3) называют двухмерными. Если же температуры представляют собой функции одной пространственной координаты x :

$$T = f_1(x, \tau); \quad (2.4)$$

$$T = F_1(x), \quad (2.5)$$

то соответствующие температурные поля (2.4) и (2.5) называются одномерными.

Примером одномерных температурных полей могут служить:

- поле неограниченной пластины, ширина и длина которой очень велики по сравнению с её толщиной;
- поле неограниченного цилиндра, длина которого очень велика по сравнению с его диаметром (радиусом);
- поле шара.

Принимая во внимание, что температура является скалярной величиной, можно утверждать, что температурное поле является скалярным полем.

Если точки поля, имеющие одинаковые температуры, соединить, то получим изотермическую поверхность (рис. 2.1). Пересечение изотермической поверхности плоскостью даёт на этой плоскости изотерму (линию, соответствующую одинаковой температуре).

Вдоль изотермической поверхности температура не изменяется. Наибольшее изменение температуры на единицу длины происходит в направлении нормали n к изотермической поверхности и характеризуется

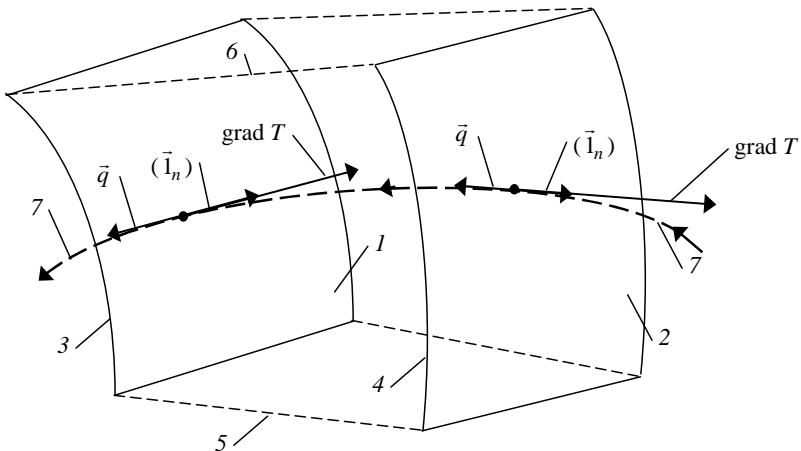


Рис. 2.1. Определение понятий изотермической поверхности, вектора градиента температуры $\text{grad } T$ и вектора теплового потока \vec{q} :

$1, 2$ – изотермические поверхности с температурами T_1 и $T_2 = T_1 + \Delta T$;

$3, 4$ – изотермы (линии пересечения изотермических поверхностей 1 и 2 с плоскостью, представленной пунктирными линиями $5, 6$); 7 – линия теплового потока

градиентом температуры, представляющим собой вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры:

$$\text{grad}T = (\vec{i}_n) \frac{\partial T}{\partial n},$$

где (\vec{i}_n) – единичный вектор, направленный по нормали в сторону возрастания температуры; $\frac{\partial T}{\partial n}$ – производная температура по направлению нормали n к изотермической поверхности.

Градиент температуры $\text{grad}T$ часто обозначают также символом ∇T . Составляющие градиента температуры по осям декартовой системы координат равны соответствующим частным производным:

$$\text{grad}T = \nabla T = 1_x \frac{\partial T}{\partial x} + 1_y \frac{\partial T}{\partial y} + 1_z \frac{\partial T}{\partial z},$$

где $1_x, 1_y, 1_z$ – ортогональные между собой векторы единичной длины, направленные вдоль осей x, y, z соответственно; $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$ – частные производные температуры $T(x, y, z, \tau)$ по координатам x, y, z .

2.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Современные теплофизические методы и приборы основаны на том, что искомое теплофизическое свойство проявляется через температурный отклик исследуемого образца на внешнее тепловое воздействие, которому этот образец подвергается в ходе специально организованного эксперимента.

Обобщённая схема установки для измерения теплофизических свойств веществ представлена на рис. 2.2.

Устройство задания тепловых воздействий (УЗТВ) позволяет при подготовке к эксперименту создать в образце необходимые начальные условия (НУ) за счёт управления граничными условиями (ГУ) и внутренними источниками тепла (ВИТ), а затем в ходе эксперимента изменять значения ГУ и ВИТ по закону, заданному программным обеспечением персонального компьютера (ПК). Устройство УРО и СКД служит для размещения образца и для создания контактного давления на внешних поверхностях образца, что позволяет снизить контактные тепловые сопротивления на граничных поверхностях образца.

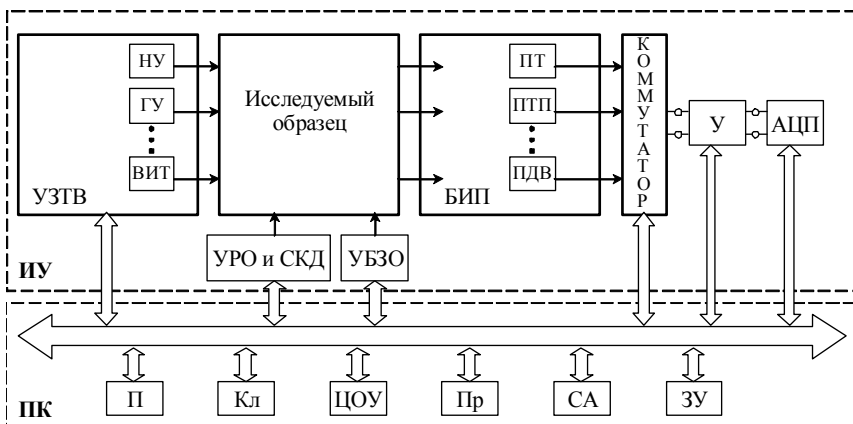


Рис. 2.2. Структурная схема компьютерного устройства для измерения теплофизических свойств веществ:

ИУ – измерительное устройство; УЗТВ – устройство задания тепловых воздействий на образец, обеспечивающее управление начальными условиями (НУ), граничными условиями (ГУ) и внутренними источниками тепла (ВИТ); БИП – блок измерительных преобразователей, включающий в себя преобразователи температуры (ПТ), преобразователи теплового потока (ПТП), преобразователи других величин (ПДВ); У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УРО и СКД – устройство для размещения образца и создания контактного давления; УБЗО – устройство боковой защиты образца от теплообмена с окружающей средой; ПК – персональный компьютер, включающий в себя: П – процессор; Кл – клавиатуру; ЦОУ – цифровое отсчётное устройство; Пр – принтер; СА – сетевой адаптер; ЗУ – запоминающее устройство

Блок измерительных преобразователей (БИП) включает в себя преобразователи температуры (ПТ), преобразователи теплового потока (ПТП), преобразователи других величин (ПДВ), например устройства для измерения электрической мощности, тока, напряжения и т.п. Коммутатор обеспечивает возможность подключения выходного сигнала любого из измерительных преобразователей ко входу усилителя У, коэффициент передачи которого задаётся персональным компьютером (ПК). Выходной сигнал усилителя преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой сигнал, воспринимаемый персональным компьютером (ПК). Устройство боковой защиты образца (УБЗО) позволяет создать необходимые тепловые условия на боковых поверхностях исследуемого образца, например адиабатические условия, позволяющие исключить теплообмен боковых поверхностей образца с окружающей средой.

Персональный компьютер (ПК) обеспечивает управление ходом эксперимента, как во время его подготовки, так и во время активной стадии проведения эксперимента.

2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Методы и приборы, предназначенные для измерения теплофизических свойств веществ, могут быть классифицированы по различным признакам.

I. По измеряемому теплофизическому свойству различают:

1) теплофизические методы и приборы для измерения одной теплофизической величины, например:

- удельной теплоёмкости c , Дж/(кг · К) ;
- объёмной теплоёмкости c_p , Дж/(м³ · К) ;
- теплопроводности λ , Вт/(м · К) ;
- температуропроводности a , м²/с;
- динамической вязкости μ , Па · с ;
- коэффициента диффузии a_m , м²/с, и т.п.

2) теплофизические методы и приборы для одновременного измерения комплекса теплофизических величин, например:

- объёмной теплоёмкости c_p , теплопроводности λ и температуропроводности $a = \lambda/c_p$;
- теплопроводности λ и вязкости μ ;
- температуропроводности a и коэффициента диффузии a_m и т.п.

II. В зависимости от требований к форме и размерам образцов различают:

1) теплофизические методы и приборы, работающие с одномерными образцами простой формы, например в виде:

- неограниченной пластины;
- неограниченного цилиндра;
- шарового слоя;

2) теплофизические методы и приборы, работающие с двумерными образцами простой формы, например в виде:

- неограниченного бруса;
- полупространства;
- цилиндра ограниченной длины и т.п.;

3) теплофизические методы и приборы, работающие с трёхмерными образцами, например в виде:

- параллелепипеда;

- цилиндра ограниченной длины, обогреваемого неравномерно распределенным внешним тепловым потоком и т.п.

Примечание. Простейший вид имеют решения одномерных краевых задач теплопроводности. Двухмерность и трёхмерность температурных полей обычно не обеспечивают улучшения эксплуатационных показателей метода (устройства), однако при этом значительно ухудшаются метрологические характеристики этого метода (устройства). Поэтому при разработке теплофизических методов и приборов стараются согласовать пространственное расположение источника теплового воздействия с геометрией образца таким образом, чтобы этот образец можно было считать одномерным (плоским, цилиндрическим, сферическим) в ходе активной стадии эксперимента.

III. В зависимости от характера изменения во времени температур и тепловых потоков в исследуемом образце в ходе рабочей стадии измерительного эксперимента различают:

1) стационарные методы и приборы, предназначенные для измерения теплофизических свойств веществ после завершения всех тепловых переходных процессов в исследуемом образце, т.е. в условиях, когда $T = \text{const}$,

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \text{ и } q = \text{const}, \quad \frac{\partial q}{\partial \tau} = 0;$$

2) нестационарные методы и приборы, предназначенные для измерения теплофизических свойств веществ в ходе теплового переходного процесса, когда $T \neq \text{const}$,

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0 \text{ и(или) } q \neq \text{const}, \quad \frac{\partial q}{\partial \tau} \neq 0.$$

Принимая во внимание, что тепловой переходный процесс в исследуемом образце принято делить на три стадии (рис. 2.3), различают:

- нестационарные теплофизические методы и приборы, основанные на закономерностях начальной стадии теплового переходного процесса;
- нестационарные методы и приборы, основанные на закономерностях регулярной стадии теплового переходного процесса (это так называемые методы и приборы регулярных режимов первого, второго и третьего рода);
- нестационарные методы и приборы, основанные на закономерностях начальной и регулярной стадий теплового переходного процесса;
- нестационарные методы и приборы, основанные на закономерностях регулярной и квазистационарной стадий теплового переходного процесса;
- нестационарные методы и приборы, основанные на закономерностях всех трёх стадий (начальной, регулярной и квазистационарной) теплового переходного процесса (например, методы и приборы, основанные на использовании временных и(или) пространственно-временных интегральных характеристик температур и тепловых потоков);

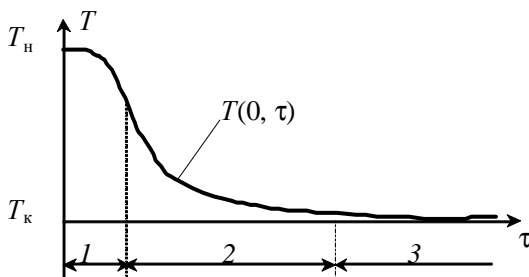


Рис. 2.3. Характерные стадии теплового процесса изменения температуры $T(0, \tau)$ на оси цилиндра при скачкообразном изменении температуры на его внешней поверхности $T(R, \tau)$ от начального значения $T_n > T_k$ до конечного значения T_k :

1 – начальная стадия процесса, для которой характерно сильное влияние начальных условий на измеряемую температуру; *2* – нестационарная регулярная стадия переходного процесса, на которой начальное распределение температуры $T(r, 0)$ почти не влияет на измеряемую температуру $T(0, \tau)$; *3* – заключительная квазистационарная стадия

- комбинированные методы и приборы, основанные на закономерностях как нестационарного, так и стационарного тепловых процессов в исследуемых образцах.

IV. По характеру изменения во времени внешнего теплового воздействия на исследуемый образец различают следующие виды нестационарных методов и приборов для измерения теплофизических свойств:

- методы и приборы со ступенчатым изменением температуры (теплового потока) во времени (рис. 2.4, а, б);
- методы и приборы с импульсным изменением температуры (теплового потока) на поверхности образца во времени (см. рис. 2.4, в, г);
- методы и приборы с линейным изменением температуры поверхности образца во времени (см. рис. 2.4, д);
- методы и приборы с периодическим (гармоническим или импульсным) изменением температуры поверхности образца (см. рис. 2.4 е, ж);
- методы и приборы с тепловым воздействием на исследуемый образец за счёт изменения объёмной плотности W [Вт/м³] внутренних источников тепла, действующих внутри образца, например:
 - за счёт пропускания электрического тока через электропроводный образец;
 - за счёт пропускания тока через электронагреватель, рассматриваемый в качестве одного из слоёв многослойного образца, и т.п.

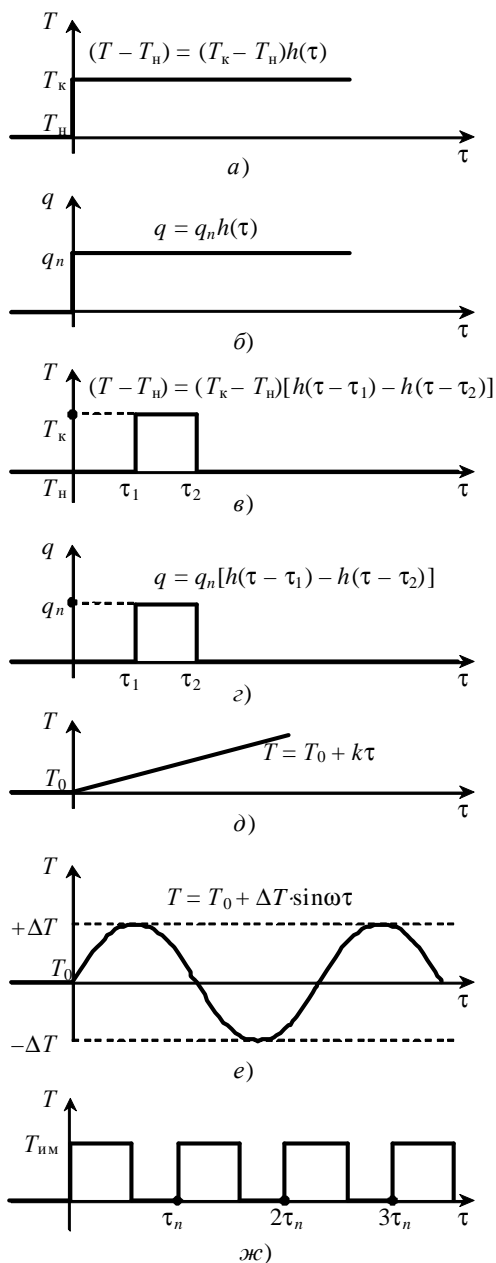


Рис. 2.4. Характер изменения тепловых воздействий на внешние поверхности исследуемых образцов

V. В зависимости от вида исследуемого вещества различают методы и приборы, предназначенные для измерения теплофизических свойств:

- газов;
- жидкостей и растворов;
- эмульсий (суспензий);
- пастообразных материалов;
- насыпного слоя сыпучих (дисперсных) материалов;
- твёрдых материалов.

VI. В зависимости от возможности проконтролировать теплофизические свойства материалов и изделий без разрушения их целостности различают:

- обычные (разрушающие) методы и приборы, позволяющие измерять и контролировать теплофизические свойства материалов и изделий только после изготовления из них образцов заданной формы и размеров;
- неразрушающие методы и приборы теплового контроля материалов и изделий без нарушения их целостности.

Методы неразрушающего контроля теплового вида (ГОСТ 18353–79) используют при исследовании тепловых процессов в изделиях. При нарушении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает избыточное температурное поле, характер которого позволяет получить информацию об интересующих свойствах объектов.

Методы теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическими чувствительными элементами (термопарой, фотоприёмником, жидкокристаллическим индикатором и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор.

Достоинствами теплового контроля являются: дистанционность (для ИК-систем: тепловизоров, тепловых дефектоскопов); высокая скорость обработки информации; высокая производительность испытаний; высокое линейное разрешение; возможность контроля при одно- и двустороннем подходе к изделию; теоретическая возможность контроля любых материалов; многопараметрический характер испытаний; возможность взаимодополняющего сочетания ТНК с другими видами неразрушающего контроля; сочетаемость со стандартными системами обработки информации; возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами.

Контроль теплофизических характеристик объектов является частным случаем активного теплового неразрушающего контроля (АТНК). В свою очередь в АТНК можно выделить три основных направления развития:

- 1) тепловая дефектоскопия (ТД);
- 2) тепловая дефектометрия (ТД);
- 3) тепловая томография (ТТ).

Тепловая дефектоскопия состоит в определении факта наличия дефекта и его расположения в объекте контроля. Метод основан на зависимости характера распределения температурного поля на поверхности объекта от факта наличия в нём различных дефектов (трещин, несплошностей и т.д.) В настоящее время это наиболее разработанное направление.

Тепловая дефектометрия – направление АТНК, представляющее методы и средства количественной оценки глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров. С математической точки зрения ТД требует решения обратных теплофизических задач.

Тепловая томография (ТТ) является последующим развитием ТД и состоит в послойном синтезе внутренней структуры объекта контроля на основе использования методов проективной компьютерной томографии.

Пассивный тепловой неразрушающий контроль не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия (ИТВ) – тепловое поле в объекте контроля (ОК) возникает при его эксплуатации (изделия радиоэлектроники, энергетическое оборудование, металлургические печи и т.п.) или изготовлении (закалке, отжиге, сварке и т.п.).

2.4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Под дифференциальным уравнением теплопроводности понимают математическую зависимость, обычно выражаемую дифференциальным уравнением в частных производных, характеризующую протекание физического явления переноса тепла и позволяющую рассчитать температурное поле в любой внутренней точке тела в любой момент времени.

В случае трёхмерного температурного поля дифференциальное уравнение теплопроводности записывают в виде

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right) + W(x, y, z, \tau).$$

Здесь $W = W(x, y, z, \tau)$ – функция внутренних источников тепла, зависящая от координат и времени.

Данное уравнение записано для тел в декартовой системе координат. Часто требуется запись уравнений для цилиндрической или сферической системы координат. В этом случае пользуются понятием «коэффициент формы γ »:

$\gamma = 0$ для плоской (декартовой) системы координат;

$\gamma = 1$ для цилиндрической системы координат;

$\gamma = 2$ для сферической системы координат.

С использованием коэффициента формы γ дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{x^{\Gamma}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda x^{\Gamma} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + W. \quad (2.6)$$

Для того чтобы воспользоваться любым из этих уравнений, их надо дополнить краевыми условиями, включающими в себя:

- 1) задание геометрии рассматриваемого тела;
- 2) задание начального условия, определяющего распределение температуры в теле в начальный момент времени;
- 3) задание граничных условий первого, второго, третьего или четвёртого рода, определяющих закономерности теплообмена на граничных поверхностях рассматриваемого образца (тела).

2.5. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Граничные условия – условия теплового взаимодействия тела с окружающей средой. Они могут быть заданы в виде граничных условий первого, второго, третьего или четвёртого рода.

Граничные условия первого рода обычно задают в виде известного закона изменения во времени температуры на поверхности исследуемого образца. Например, для пластины толщиной H граничные условия запишутся следующим образом:

$$T(0, \tau) = \varphi_1(\tau),$$

$$T(H, \tau) = \varphi_2(\tau).$$

Функции $\varphi_1(\tau), \varphi_2(\tau)$ могут иметь вид

$$T(0, \tau) = \varphi_1(\tau) = T_0(1 - e^{-2\tau}),$$

$$T(H, \tau) = \varphi_2(\tau) = k\tau.$$

В общем случае граничные условия имеют вид

$$T(x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}}, \tau) = \varphi_1(x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}}, \tau),$$

где $x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}}$ – координаты точек поверхности тела.

Граничные условия второго рода обычно задают в виде известных функций изменения во времени теплового потока на поверхности тела.

С учётом закона Фурье $q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ получаем запись граничных условий

второго рода:

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_1(\tau),$$

$$\lambda \frac{\partial T(H, \tau)}{\partial x} = q_2(\tau).$$

В простейшем случае

$$q_1(\tau) = \text{const},$$

$$q_2(\tau) = \text{const}.$$

Граничные условия третьего рода описывают взаимодействие тела с окружающей средой по закону конвективного теплообмена, предложенному Ньютоном и имеющему вид

$$q = \alpha(T^c - T_n),$$

где α – коэффициент теплообмена [Вт/(м²·К)], T^c – температура греющей среды; T_n – температура поверхности.

С учётом того, что

$$q(0, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x},$$

$$q(H, \tau) = \lambda \frac{\partial T(H, \tau)}{\partial x},$$

для пластины толщиной H получаем запись граничных условий третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [T_1^c(\tau) - T(0, \tau)],$$

$$\lambda \frac{\partial T(H, \tau)}{\partial x} = \alpha_2 [T_2^c(\tau) - T(H, \tau)].$$

Граничные условия четвёртого рода задаются на внутренних границах контакта двух твёрдых тел или на границах контакта твёрдое тело-жидкость (газ) следующим образом:

$$\begin{cases} T(h-0, \tau) = T(h+0, \tau), \\ \lambda_1 \frac{dT(h-0, \tau)}{dx} = \lambda_2 \frac{dT(h+0, \tau)}{dx}. \end{cases}$$

Согласно граничным условиям четвёртого рода (ГУ-4) на границе контакта обеспечивается одновременная непрерывность изменения как температур, так и тепловых потоков, хотя производные температурного поля по координате при этом могут иметь разрыв.

В некоторых случаях на практике используют граничные условия четвёртого рода специального вида, учитывающие наличие поверхностного источника тепла $p(\tau)$, [Вт/м²], действующего на поверхности раздела соседних слоёв. Например, в случае если на поверхности $x = h$ действует источник тепла с удельной поверхностной мощностью $p(\tau)$, то ГУ-4 специального вида могут быть записаны в виде

$$\begin{cases} T(h-0, \tau) = T(h+0, \tau), \\ \lambda_1 \frac{\partial T(h-0, \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T(h+0, \tau)}{\partial x} = p(\tau). \end{cases}$$

2.6. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

2.6.1. Прямая краевая задача теплопроводности

Простейшую аналитическую запись при прочих равных условиях имеет одномерное температурное поле в образцах простой формы.

Прямые краевые задачи теплопроводности по известным (заданным):

- виду уравнения теплопроводности;
- геометрии образца и его размерам;
- теплофизическим свойствам (a , λ);
- начальным условиям;
- граничным условиям.

позволяют найти (рассчитать) температурное поле $T(x, \tau)$, которое будет иметь место в рассматриваемом теле (в любой точке $0 < x < H$ и в любой момент времени $\tau > 0$).

2.6.2. Обратная (инверсная) краевая задача теплопроводности относительно коэффициентов (теплофизических свойств)

Пусть известны:

- дифференциальное уравнение теплопроводности;
- геометрия образца ($\Gamma = 0$) и его размеры $0 < x < H$;
- начальное условие;
- граничное условие слева;
- граничное условие $T(H, \tau) = 0$ справа, причём в ходе эксперимента определена функция $T(H/2, \tau) = f_3(\tau)$, а требуется найти значение коэффициента теплопроводности a , при котором расчётные значения $T(H/2, \tau)$ и экспериментально измеренная функция $f_3(\tau)$ будут мало отличаться друг от друга.

Тогда обратная краевая задача теплопроводности (относительно неизвестного коэффициента теплопроводности $a = ?$) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \\ \tau > 0, \quad 0 < x < H, \\ T(x, 0) &= T_H = \text{const}, \\ \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} &= 0, \\ T(H, \tau) &= 0\end{aligned}$$

с дополнительным условием

$$T(H/2, \tau) = f_3(\tau).$$

Требуется найти такое значение коэффициента a , которое минимизирует функционал

$$\int_0^{\tau_k} [T(H/2, \tau) - f_3(\tau)] d\tau = \min.$$

Отметим, что обратные краевые задачи теплопроводности относительно коэффициентов (теплофизических свойств) называют инверсными краевыми задачами теплопроводности.

2.7. РЕАЛИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЛОСКОГО СЛОЯ

2.7.1. Физическая модель устройства для реализации метода

Положим, имеем (рис. 2.5) однородную плоскую неограниченную пластину (стенку) толщиной H из материала, теплопроводность λ которого надо измерить.

Если в эксперименте создать условия, когда через эту пластину будет проходить неизменный во времени и равномерно распределённый тепловой поток q , условно показанный стрелками на рис. 2.5, то после достижения стационарного режима в этой пластине установится линейное распределение температуры, а на поверхностях пластины можно измерить два значения температур T_1 и T_2 .

Постараемся найти ответ на вопрос – каким образом по измеренным значениям физических величин q , T_1 , T_2 , H можно определить искомое значение теплопроводности λ .

Математическая модель метода и устройства

Принимая во внимание, что на двух поверхностях пластины нам известны два измеренных значения температур, а именно

$$\text{при } x = 0 \quad T(0) = T_1,$$

$$\text{при } x = H \quad T(H) = T_2,$$

а, кроме того, при $x = 0$ измерен тепловой поток $q = -\lambda \frac{\partial T(0)}{\partial x}$, математическая

модель температурного поля образца для рассматриваемого метода и устройства может быть записана в виде

$$c_p \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right],$$

$$\tau > 0, \quad 0 < x < H,$$

$$T(x, 0) = T_H(x),$$

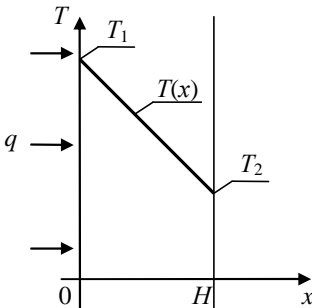


Рис. 2.5. Схематическое представление физической модели измерительного устройства

$$T(0, \tau) = T_1 = \text{const},$$

$$T(H, \tau) = T_2 = \text{const}$$

с дополнительным условием

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q = \text{const}.$$

Эта задача представляет собой пример нестационарной обратной (инверсной) краевой задачи теплопроводности относительно неизвестного коэффициента теплопроводности λ . По истечении большого промежутка времени в исследуемой пластине устанавливается стационарный режим переноса теплоты, когда распределение температуры $T(x)$ в стационарном режиме может быть получено из решения краевой задачи теплопроводности при $\tau \rightarrow \infty$. Причём при $\tau \rightarrow \infty$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = 0,$$

температура $T(x, \tau) = T(x)$ перестаёт зависеть от времени, а начальное условие совершенно не сказывается на стационарном распределении температуры в используемой пластине.

С учётом сказанного выше краевая задача для стационарного процесса переноса тепла примет вид

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda \frac{dT(x)}{dx} \right] = 0, \quad 0 < x < H, \quad (2.7)$$

$$T(0) = T_1 = \text{const},$$

$$T(H) = T_2 = \text{const}$$

с дополнительным условием

$$-\lambda \frac{dT(0)}{dx} = q = \text{const}. \quad (2.7a)$$

Полученная задача представляет собой пример обратной (инверсной) стационарной задачи теплопроводности относительно неизвестного пока параметра – искомой теплопроводности λ .

Проинтегрируем уравнение (2.7a), взяв неопределённый интеграл от его левой и правой частей:

$$\int \frac{d}{dx} \left[\lambda \frac{dT(x)}{dx} \right] dx = \int 0 dx,$$

или

$$\lambda \frac{dT(x)}{dx} = C = \text{const}. \quad (2.8)$$

Сравнивая (2.8) с (2.7a), получаем

$$C = -q.$$

Тогда уравнение (2.8) приобретает вид

$$\lambda \frac{dT(x)}{dx} = -q,$$

или

$$\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{q}{\lambda}.$$

Проинтегрируем последнее выражение в пределах от $x = 0$ до $x = H$. В результате получаем

$$\int_0^H \frac{dT(x)}{dx} dx = -\frac{q}{\lambda} \int_0^H dx,$$

$$T(x)|_0^H = -\frac{q}{\lambda} x|_0^H,$$

$$T(H) - T(0) = -\frac{q}{\lambda} (H - 0),$$

откуда следует основное расчётное соотношение рассматриваемого стационарного метода плоского слоя

$$\lambda = -\frac{qH}{T(H) - T(0)},$$

которое с учётом приведённых на рис. 2.5 обозначений

$$T(H) = T_2,$$

$$T(0) = T_1$$

приобретает вид

$$\lambda = \frac{qH}{T_1 - T_2}.$$

2.7.2. Порядок осуществления измерительных операций

Из изложенного выше вытекает следующий примерный порядок осуществления эксперимента при измерении теплопроводности λ стационарным методом.

1. Из исследуемого материала изготавливают образец (или несколько образцов) в виде пластины необходимой формы, например в виде диска или пластины квадратной формы с заданными размерами.

2. С использованием микрометра (в крайнем случае штангенциркулем) многократно (n раз) измеряют значение толщины H пластины в нескольких местах поверхности и находят среднее значение этой толщины

$$\overline{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n}.$$

3. Образец (или несколько образцов) помещают в измерительную ячейку и начинают подводить постоянный во времени тепловой поток q к этому образцу (образцам).

4. Через определённые промежутки времени контролируют значения температур T_1, T_2 на внешних поверхностях исследуемого образца.

5. После достижения стационарного распределения температуры в исследуемом образце, когда $T_1 = \text{const}, T_2 = \text{const}, q = \text{const}$, измеряют значение теплового потока q и значение температур T_1, T_2 .

6. Исследуемую теплопроводность λ рассчитывают по формуле

$$\lambda = \frac{qH}{T_1 - T_2} \text{ по измеренным значениям } H, q, T_1 \text{ и } T_2.$$

2.8. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТИ

Если известны теплопроводность λ , температуропроводность a и плотность ρ , то теплоёмкость может быть вычислена по формуле

$$c = \frac{\lambda}{a\rho}.$$

Тепло- и температуропроводность могут быть измерены каким-либо из перечисленных выше нестационарных методов. Определение плотности обычно не представляет трудностей.

Существуют и другие методы измерения теплоёмкости, также основанные на использовании стационарного или нестационарного процесса нагрева или охлаждения.

Наиболее распространённым является метод адиабатического калориметра.

2.8.1. Адиабатический калориметр

Адиабатический калориметр (рис. 2.6) представляет собой цилиндрический сосуд с двойными стенками, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом.

В сосуд 2 помещают образец 1 изучаемого вещества, заполняют водой или другой жидкостью с известной теплоёмкостью (калориметрической жидкостью) и закрывают крышкой 6, на которой смонтировано устройство 5 для перемешивания жидкости и термометр 3 для регистрации её температуры.

Включая электронагреватель 4 на определённое время, вводят в калориметр известное количество тепла $U\tau$, которое расходуется на нагрев образца и калориметрической жидкости. Поскольку полная теплоёмкость калориметра известна, то, измерив изменение температуры калориметрической жидкости, можно определить теплоёмкость образца c :

$$c = \frac{U\tau - c_{\text{ж}} m_{\text{ж}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{m_{\text{х}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}.$$

Калориметрический метод разработан в различных модификациях. Несмотря на наличие теплоизоляции, теплообмен калориметра с воздухом всё же происходит, поэтому для повышения точности этот теплообмен учитывают с помощью эмпирических поправочных коэффициентов. При учёте этой поправки калориметрический метод обеспечивает достаточно высокую точность измерений теплоёмкости (около 1%).

2.8.2. Зондовые методы

Для определения теплоёмкости и теплопроводности сыпучих веществ (например, почвы или рыхлого грунта) часто используют методы, основанные на измерении скорости нагрева или охлаждения зонда. Зонд представляет собой тонкий (диаметром от нескольких миллиметров до 2–3 см) металлический цилиндр длиной 30 – 40 см, внутри которого вмонтирован датчик температуры (термопара или термистор), позволяющий регистрировать температуру зонда, а также (иногда) электронагреватель заданной мощности. С помощью этого электронагревателя или с помощью горячей воды зонд нагревают (либо охлаждают его в холодной воде) до заданной температуры, затем вводят в исследуемое вещество и в течение нескольких минут наблюдают за изменением температуры зонда. По скорости этого изменения с помощью простых расчётных формул можно определить коэффициент теплопроводности λ и объёмной теплоёмкости (т.е. произведение $c\rho$) исследуемого вещества. Точность зондовых методов невысока (~10%), но они позволяют исследовать вещество в полевых условиях без отбора образцов.

2.8.3. Метод монотонного нагрева

Метод монотонного нагрева реализован в измерителе теплоёмкости ИТ-с-400, предназначенном для исследования температурной зависимости теплоёмкости твёрдых тел, сыпучих, волокнистых материалов, жидкостей с плотностью не менее 800 кг/м³.

Тепловая схема с-калориметра типа ИТ-с-400 представлена на рис. 2.7.

В процессе подготовки к работе образец 1 помещают в ампулу, выполненную в виде стакана 2 с крышкой 3. Стакан размещают на тепломере 4, закреплённом на основании 5 с встроенным нагревателем 6. Тепловая связь образца 1, находящегося в стакане 2 с крышкой 3, с внешней

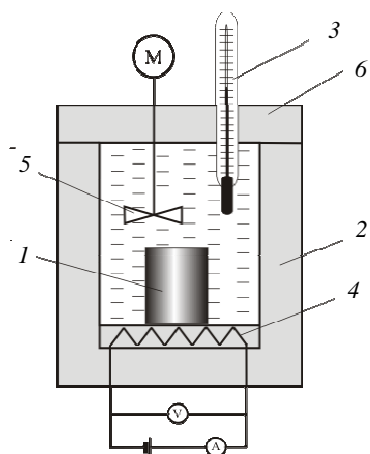


Рис. 2.6. Схема адиабатического калориметра

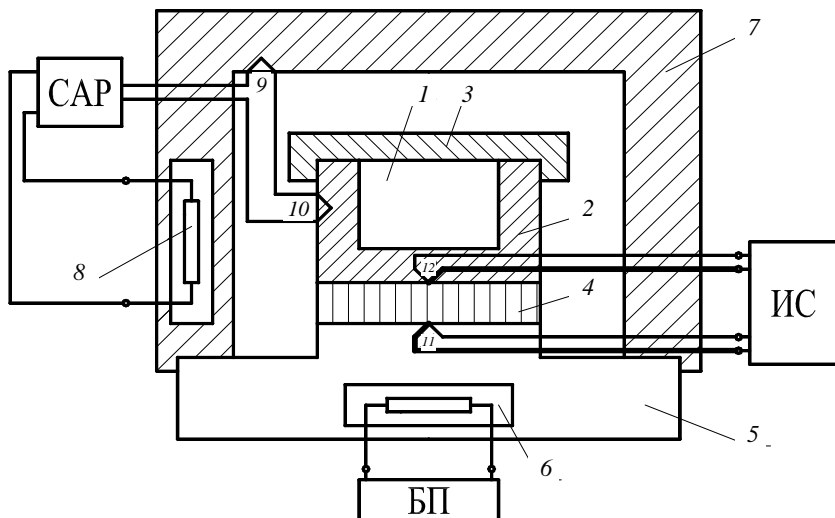


Рис. 2.7. Схема динамического *c*-калориметра типа ИТ-*c*-400

средой допускается только через тепломер 4. Поэтому внешние поверхности стакана 3 отделены от окружающей среды адиабатической оболочкой, выполненной в виде колпака 7 со встроенным в него нагревателем 8. Система автоматического регулирования САР поддерживает нулевую разность между температурой колпака 7 (измеряемой термопарой 9) и температурой стакана 2 (измеряемой термопарой 10) путём изменения электрической мощности, подводимой к нагревателю 8, равномерно распределённому по боковой поверхности колпака 7. Монотонный нагрев образца 1 и ампулы осуществляется за счёт подвода электрической мощности к нагревателю 6, встроенному в основание 5.

Количество тепла, проходящее в единицу времени через сечение тепломера 4, расходуется как на разогрев образца 1, так и на разогрев ампулы в виде стакана 2 с крышкой 3:

$$P_T = P_o + P_a, \quad (2.9)$$

где P_o – мощность (количество тепла в единицу времени), идущая на разогрев образца; P_a – мощность (количество тепла в единицу времени), идущая на разогрев ампулы; P_T – полная мощность (количество тепла в единицу времени), проходящая через тепломер 4.

Величины P_o , P_a могут быть рассчитаны по формулам:

$$P_o = cm_o b,$$

$$P_a = c_a m_a b = C_a b,$$

где c, c_a – удельная теплоёмкость образца и ампулы [Дж/(кг·К)];
 m_o, m_a – массы образца и ампулы [кг]; $b = \frac{dT}{dt}$ – скорость разогрева [К/с];
 $C_a = c_a m_a$ – полная теплоёмкость ампулы [Дж/К].

Полная теплоёмкость $C_a = C_a(T)$ является постоянной характеристикой ампулы, выполненной в виде стакана с крышкой, и зависит только от температуры T .

О величине тепловой мощности P_T , проходящей через тепломер 4, можно судить по величине перепада температуры Θ на тепломере 4 и по коэффициенту K_T тепловой проводимости тепломера, определённым в ходе независимых градуировочных экспериментов:

$$P_T = K_T \Theta.$$

Параметр $K_T = K_T(T)$ является постоянной характеристикой тепломера и зависит только от температуры T . С учётом изложенного выше уравнение теплового баланса (2.9) для ампулы с размещённым в ней образцом можно записать в виде

$$K_T \Theta = cm_o b + C_a b,$$

откуда получается расчётная формула

$$c = \frac{1}{m_o} \left[\frac{K_T \Theta}{b} - C_a \right]. \quad (2.10)$$

На рисунке 2.8 показаны графики, иллюстрирующие изменение температур, измеряемых (см. рис. 2.7) термopарами 11 и 12. Отметим, что термopара 11 измеряет температуру $T_n(\tau)$ нижней части тепломера 4, а термopара 12 измеряет температуру $T_a(\tau)$ ампулы, опирающейся на верхнюю часть тепломера 4 (см. рис. 2.7).

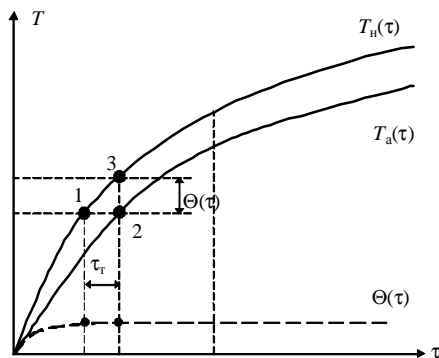


Рис. 2.8. Характер изменения температур $T_n(\tau)$ и $T_a(\tau)$ во времени

Из рисунка 2.8 видно, что перепад $\Theta(\tau)$ температуры на тепломере представляет собой разность между температурами $T_n(\tau)$ и $T_a(\tau)$, т.е.

$$\Theta(\tau) = T_n(\tau) - T_a(\tau).$$

Если рассмотреть треугольник 1–2–3 на рис. 2.8, то легко получить соотношение

$$\frac{dT}{d\tau} = b \approx \frac{\Theta}{\tau_T} \quad \text{или} \quad \Theta \approx b\tau_T,$$

где τ_T – время запаздывания температуры на тепломере. Подставив последнее выражение в формулу (2.10), получим расчётную зависимость

$$c = \frac{1}{m_0} [K_T \tau_T - C_a]. \quad (2.11)$$

Если в формуле (2.11) вынести K_T за скобку, то получим

$$c = \frac{K_T}{m_0} \left[\tau_T - \frac{C_a}{K_T} \right].$$

Если обозначить $C_a / K_T = \tau_T^n$ и принять во внимание, что величина τ_T^n представляет собой время запаздывания на тепломере, которое можно определить опытным путём в экспериментах с пустой ампулой, то получим формулу

$$c = \frac{K_T(T)}{m_0} [\tau_T - \tau_T^n(T)], \quad (2.12)$$

наиболее часто используемую на практике при обработке экспериментальных данных с применением динамического калориметра типа ИТ-с-400. Постоянные характеристики $K_T(T)$, $\tau_T^n(T)$ обычно приводятся в эксплуатационной документации измерителей теплоёмкости ИТ-с-400.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ВЕЛИЧИН [9]

3.1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Оптические (световые) датчики (первичные преобразователи) применяют как элемент автоматики, реагирующий на появление или исчезновение светового луча, на изменение освещённости, светового потока или на количество световых импульсов.

Оптические датчики используются в установках сортировки продуктов по цвету и зрелости, в приборах, определяющих их качество, в уст-

ройства автоматического отключения и включения уличного освещения в зависимости от смены дня и ночи, в регуляторах освещённости и интенсивности облучения в теплицах, в измерителях дымности воздуха и мутности воды, газоанализаторах, в устройствах контроля пламени в топках, работающих на жидком топливе, в различных защитных устройствах и т.п.

В качестве оптических первичных преобразователей используются фоторезисторы, электровакуумные фотоэлементы, фотодиоды, фототриоды, фототиристоры и др.

Несмотря на различия в физических явлениях, положенных в основу работы, и конструктивные особенности различных видов оптических датчиков, все они имеют ряд общих характеристик. Основными из них являются:

- *световая характеристика* (рис. 3.1, а) – показывает связь силы фототока I_{Φ} датчика с падающим на него световым потоком Φ_0 . Явно выраженная нелинейность световой характеристики наблюдается у фоторезисторов и фототранзисторов;

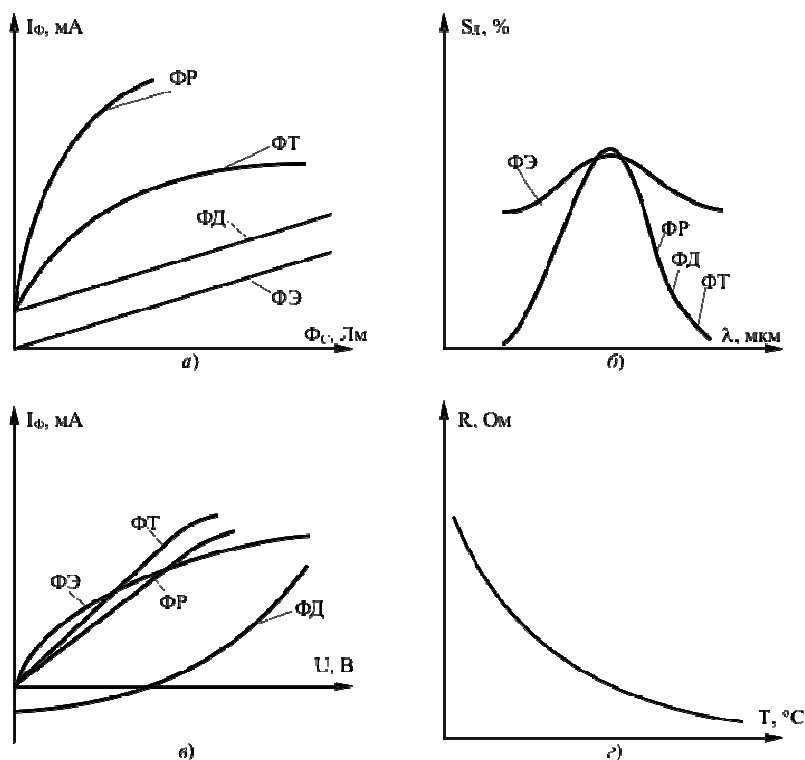


Рис. 3.1. Основные характеристики фотодатчиков:

а – световая; б – спектральная; в – вольт-амперная; г – температурная;
 ФЭ – фотоэлемент; ФР – фоторезистор; ФД – фотодиод; ФТ – фототранзистор

- *спектральная характеристика* (рис. 3.1, б) – показывает зависимость относительной чувствительности S_λ датчика от длины волны λ падающего светового потока. Эта характеристика позволяет определить диапазон спектра, в котором может быть использован датчик. Снимается спектральная характеристика при неизменном напряжении питания, а её вид определяется материалом, используемым для изготовления преобразователя;

- *вольт-амперная характеристика* (рис. 3.1, в) – устанавливает связь фототока I_Φ и приложенного напряжения U при неизменном световом потоке;

- *температурная характеристика* (рис. 3.1, з) – показывает зависимость сопротивления фотодатчика от температуры окружающей среды при неизменном световом потоке.

К числу основных параметров фотодатчиков относятся следующие:

а) *интегральная чувствительность*, которая определяется следующим образом: $S = I_\Phi / \Phi_c$, где I_Φ – фототок; Φ_c – суммарный поток излучения, падающий на датчик. При воздействии на фотодатчик монохроматического потока излучения Φ_λ величина $S_\lambda = I_\Phi / \Phi_\lambda$ называется монохроматической чувствительностью;

б) *темновое сопротивление* – величина сопротивления затемнённого фотодатчика;

в) *пороговый поток* – минимальный поток излучения, вызывающий изменение фототока, превышающее уровень шумов;

г) *рабочее напряжение*;

д) *постоянная времени*, отражающая инерционность фотодатчиков.

Рассмотрим принцип действия и устройство фотодатчиков.

Фотоэлемент (см. рис. 3.1, а) представляет собой вакуумную или газонаполненную лампу с катодом К в виде светочувствительного слоя, нанесённого на внутреннюю поверхность стеклянного баллона, и анодом А в виде кольца или пластины. В основе работы фотоэлемента лежит так называемый внешний фотоэффект (электроны, возникшие в фотоэлементе под действием световой энергии, не остаются в освещённом светочувствительном слое, а удаляются из него и движутся к аноду под действием приложенного напряжения U). Вакуумные и газонаполненные фотоэлементы малоинерционны, но сильно подвержены старению. Кроме того, у них низкая чувствительность и малая выходная мощность.

Фотоумножители лишены этих недостатков. Это специальные усилители, объединённые в одну конструкцию с фотоэлементом. В фотоумножителе (рис. 3.2, б) к эмиттерам Э1...Э5 прикладывают напряжения, возрастающие по мере приближения эмиттеров к аноду А. Вследствие этого между катодом К и первым эмиттером Э1, а также между всеми парами соседних эмиттеров создаётся разность потенциалов, под действием которой первичные электроны, испускаемые катодом К6, с возрастающими скоростями поочерёдно попадают на эмиттеры Э1...Э5 и выбивают всё большее число вторичных электронов. Выбитые из последнего эмиттера

электроны снимаются анодом А во внешнюю цепь, в которой появляется ток, во много раз превышающий ток катода (в $10^7 \dots 10^8$).

Фоторезистором называют полупроводниковый фотоэлектрический прибор с внутренним фотоэффектом (под действием светового потока увеличивается количество носителей заряда, а следовательно, и электропроводность полупроводника).

Хотя внутренний фотоэффект наблюдается во всех полупроводниках, в фоторезисторах используют лишь некоторые из них, обладающие наиболее высокой фотопроводимостью. К ним относятся сульфиды, селениды и теллуриды таких металлов, как кадмий, висмут, свинец и таллий, некоторые окислы, интерметаллические соединения, а также селен, германий и кремний.

Фоторезисторы изготовляют из полупроводникового материала 4, который наносят тонким слоем на изоляционную пластину 5 и армируют в оправку 2 с отверстием для прохода оптических излучений (рис. 3.2, в). Открытую часть полупроводникового слоя покрывают светопроницаемым лаком 3. С противоположной стороны к полупроводниковому слою крепят электроды 1 для включения фоторезистора в электрическую сеть. Если на фоторезистор воздействовать потоком оптических излучений, то сопротивление его резко уменьшается, что объясняется **внутренним фотоэффектом** – перераспределением электронов в полупроводнике при поглощении излучений.

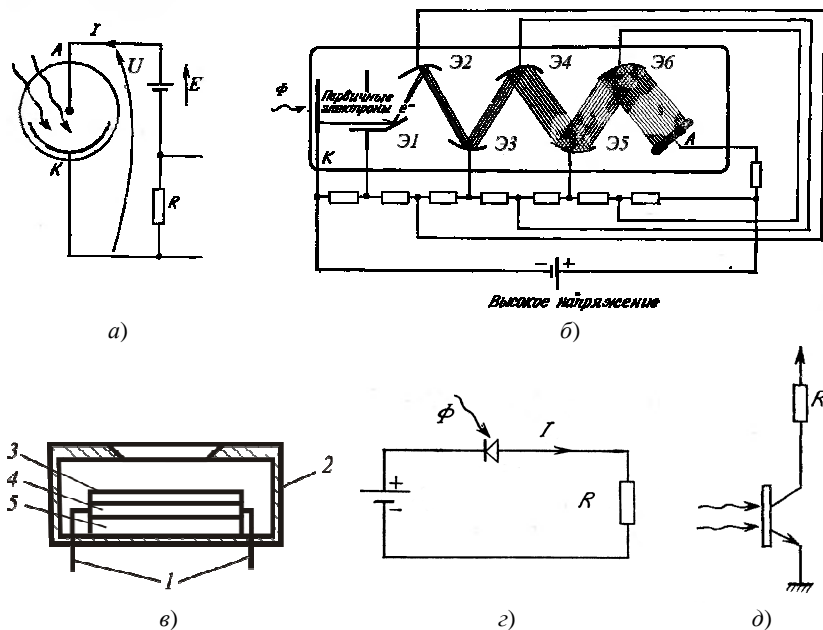


Рис. 3.2. Схемы включения фотоэлемента (а), фотоумножителя (б), фоторезистора (в), фотодиода (г) и фототранзистора (д)

Если к неосвещённому фоторезистору подключить источник питания, то в электрической цепи появится небольшой ток, называемый темновым током, обусловленный наличием в неосвещённом полупроводнике некоторого количества свободных носителей зарядов.

При освещении фоторезистора ток в цепи сильно возрастает за счёт увеличения концентрации свободных носителей заряда. Разность токов при наличии и отсутствии освещения называется световым током или фототоком, величина которого зависит от интенсивности освещения, величины приложенного напряжения, а также вида и размеров полупроводника, используемого в фоторезисторе.

Промышленность выпускает фоторезисторы для измерения видимых инфракрасных и рентгеновских излучений. Наибольшее применение получили фоторезисторы для видимых излучений, их применяют в схемах фотореле, газоанализаторах и т.д.

При включении фоторезистора в схему следует помнить, что напряжение на фоторезисторе не должно превышать значения рабочего напряжения, поэтому их практически включают через делители напряжения или ограничивающие сопротивления.

Параметры фоторезисторов, как и любых полупроводниковых приборов, существенно зависят от температуры.

Достоинства фоторезисторов: высокая чувствительность, возможность использования в видимой и инфракрасной областях спектра измерения, небольшие габариты, возможность работы в цепях постоянного и переменного тока.

В современной технике чрезвычайно широкое распространение получили полупроводниковые приборы и среди них вентильные элементы: фотодиоды, фототриоды, светодиоды, фототиристоры, принцип действия которых, как и всех полупроводниковых элементов, основан на использовании специфических свойств *p-n*-перехода (обычно в германиевом или кремниевом слое).

Первичные преобразователи на вентильных элементах используют в работе так называемый вентильный фотоэффект, который проявляется в полупроводниковом запирающем слое, между соприкасающимися полупроводником и металлом. При облучении пластины, состоящей из полупрозрачного слоя металла и нанесённого на него светочувствительного полупроводника, в промежуточном слое создаётся разность потенциалов, зависящая от световой энергии. Вентильные фотоэлементы в фотогенераторном режиме используют как преобразователи световой энергии в электрическую.

Фотодиод – это полупроводниковый преобразователь лучистой энергии, в котором происходит направленное движение носителей тока при воздействии энергии оптического излучения. Режим работы фотодиода с внешним источником питания называют *фотопреобразовательным*, а без него – *фотогенераторным*. В принципиальной схеме включения фотодиода в фотопреобразовательном режиме (рис. 3.2, з) на его

p-n-переход подаётся напряжением запирающей полярности. При освещении происходит генерация носителей электрического заряда, которые под действием электрического поля разделяются и на границе *p-n*-перехода создают разность потенциалов. Фотопреобразовательный режим даёт значительное повышение светочувствительности.

Светодиод представляет собой полупроводниковую пластинку с излучающим *p-n*-переходом, свечение которого вызывается рекомбинацией носителей тока (электронов и дырок) при приложении напряжения в прямом направлении.

Соединяя светодиод с фотодиодом, можно получить миниатюрные датчики различных контролируемых величин.

Фототриод (фототранзистор) – это полупроводниковый приёмник лучистой энергии, имеющий направленное движение носителей тока и обладающий свойством усиления фототока при действии энергии оптического излучения. Принципиальная схема включения фототриода показана на рис. 3.2, *д*.

Конструктивно фотодиод представляет собой полупроводниковую пластинку с тремя чередующимися областями *p-n-p*-проводимости. Контактные выводы этих областей служат для включения фототриода в схему. Под действием света, попадающего на базовую область типа *n*-проводимости, в ней образуются пары электрон–дырка, которые под влиянием электрического поля диффундируют в эмиттерную и коллекторную части триода. В результате создаётся ток, проходящий через эмиттерно-базовый переход, который усиливает ток коллектора (аналогично тому, как это происходит в обычном полупроводниковом триоде под действием напряжения управления, подаваемого на его базу).

Работой фототриода можно управлять не только посредством светового потока, но и одновременно посредством электрического сигнала. Кроме того, фототриоды обладают более высокой чувствительностью, чем другие фотоэлементы.

Фототиристор – это четырёхслойный полупроводниковый прибор *p-n-p-n*-структуры, управляемый светом и сочетающий в себе положительные свойства тиристора и преобразователя оптической энергии в электрическую. Принцип его действия аналогичен принципу действия фототриода. Под действием света в полупроводниковых слоях происходит генерация пар электрон–дырка, которые под влиянием приложенного электрического поля участвуют в увеличении тока, протекающего через фототиристор.

Оптрон – это преобразователь электрических и оптических сигналов с одновременным их усилением, который представляет собой соединение по определённой схеме фоторезистора с электролюминесцентным элементом.

Связь между фоторезистором Φ и электролюминесцентным элементом \mathcal{E} может быть оптической (рис. 3.3, *а*), электрической (рис. 3.3, *б*) или смешанной (рис. 3.3, *в*).

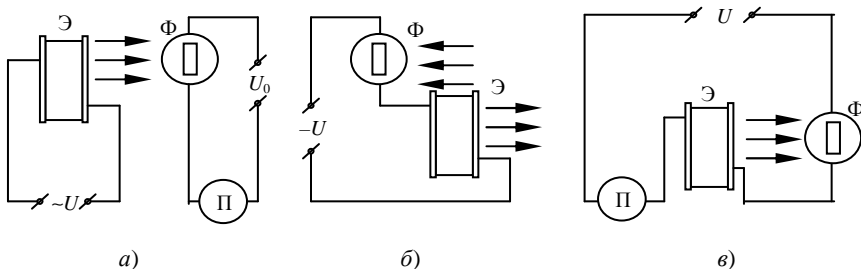


Рис. 3.3. Схемы оптронов:

a – с оптической связью; *б* – моностабильного; *в* – бистабильного

При оптической связи (см. рис. 3.3, *a*) свет, излучаемый электролюминесцентным элементом, вызывает изменение тока цепи фоторезистора.

Моностабильный оптрон – это управляемый (напряжением U) элемент при последовательном соединении фоторезистора с люминесцентным элементом (см. рис. 3.3, *б*), у которого видимое или невидимое (инфракрасное, ультрафиолетовое) излучение, принимаемое фоторезистором, преобразуется в видимое излучение электролюминесцентного элемента.

При смешанном соединении (см. рис. 3.3, *в*) получают бистабильный оптрон со сложной вольт-амперной характеристикой.

Входной световой сигнал, воспринимаемый фоторезистором Φ , вызывает увеличение напряжения на электролюминесцентном элементе \mathcal{E} и, следовательно, увеличение его яркости свечения. Так как световой поток от элемента направлен на фоторезистор, то сопротивление последнего дополнительно значительно снижается. Вследствие этого происходит усиление светового сигнала.

Оптроны применяются в устройствах приёма, хранения и считывания информации.

3.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ВЕЛИЧИН

Радиационные величины характеризуют ионизирующие излучения, под которыми понимаются излучения, обладающие энергией, достаточной для вырывания электронов из атомов вещества, которым они поглощаются. Различают излучения, ионизирующие непосредственно и косвенно. К первым относятся все корпускулярные излучения электрически заряженных частиц, т.е. быстрые электроны (бэга-лучи), альфа-лучи, быстрые протоны и потоки ионов. Напротив, косвенно ионизирующими называются те излучения, действие которых обуславливается частицами, высвободившимися в процессе поглощения, например быстрые нейтроны, которые вызывают ионизацию под действием вырванных протонов отдачи. Хотя квантовые излучения (рентгеновские и гамма-лучи) при их поглощении тоже вырывают из атомов отдельные электроны, но основная

часть работы ионизации совершается затем упомянутыми вырванными электронами при их затормаживании. Поэтому такие излучения относятся к косвенно ионизирующим.

При ионизации первоначально электрически нейтральные атомы вещества приобретают один или несколько положительных зарядов (заряжаются несколько раз) и, поскольку они могут двигаться, например в воде или воздухе, становятся ионами; это греческое слово означает «блуждающие» (в электрическом поле).

Вырванные электроны присоединяются к другим атомам. Таким образом, в любом процессе ионизации всегда образуется пара ионов с противоположными знаками заряда. Для образования одной пары ионов в среднем нужна энергия, равная примерно 34 эВ. Следовательно, доза в один грэй (1 Гй) создаёт в 1 кг воды $1,8 \cdot 10^{17}$ пар ионов.

Ионизированные атомы, в особенности если они входят в состав органических макромолекул, стойко изменяют их химические свойства (рентгеновская и гамма-фотография, радиохимия, лечение раковых опухолей, стерилизация пищевых продуктов и т.д.). Предпосылкой любого технического или биологического их применения всегда является количественное дозирование.

Разнообразные физические, химические и биологические действия (табл. 3.1) ионизирующих излучений почти все в том или ином виде были также использованы для измерения количества или качества (энергии) излучений.

3.1. Воздействия излучения, используемые при дозиметрии, и основные области их применения

Воздействие излучений	Важнейшие области применения в дозиметрии
Ионизация в воздухе и газах	Эталонная и практическая дозиметрия в медицине и ядерной технике
Изменение проводимости полупроводников	Специальная дозиметрия и спектрометрия
Возбуждение флюоресценции	Сцинтилляционные счётчики
Влияние на фосфоресцентные и люминесцентные свойства твёрдых тел	Защита от излучения в медицинской дозиметрии
Фотографические действия	Фотографическая дозиметрия в технике защиты от излучений
Изменение цвета веществ	Измерение больших доз
Высвобождение экзоэлектронов	Измерение малых доз
Нагрев материала, поглощающего излучение	Эталонная дозиметрия, определение дозиметрических единиц
Биологические действия	Сравнение с физическими дозиметрами, аварийная дозиметрия

Поле излучения, т.е. область пространства, пронизываемая излучением, может быть однозначно описано следующими величинами:

а) видом частиц (фотоны, электроны, ионы и т.д.), а также количеством частиц на 1 см^2 , их направлением и энергией;

б) величиной взаимодействия частиц с некоторым определённым веществом, находящимся в поле излучения;

в) силой (активностью, скоростью распада) источника излучения, разновидностью частиц, энергией и геометрией пучка лучей. Эти характеристики поля излучения применимы в основном к радиоактивным изотопам (радионуклидам). Исходя из их основных параметров, можно определить (рассчитать) величины, упомянутые в пп. «а» и «б».

Величины, характеризующие поле излучения

Плотность потока частиц ϕ показывает, сколько частиц в определённом месте за данный промежуток времени t проходит через пространство. Чтобы определить плотность потока частиц, рассматриваемую точку заключают в сферу с площадью большого круга ΔA и подсчитывают количество частиц ΔN , проникших в сферу за промежуток времени Δt . Плотность потока частиц при этом составляет

$$\phi = \Delta N / (\Delta A \cdot \Delta t),$$

что можно записать в виде отношения производных

$$\phi = \frac{d^2 N}{dA \cdot dt} [\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}].$$

При таком подходе можно определить и плотность потока энергии (интенсивность излучения) как сумму энергий отдельных частиц W :

$$\psi = \frac{d^2 W}{dA \cdot dt} [\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] \text{ или } [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}].$$

Поток представляет собой интеграл плотности потока за отрезок времени от t_1 до t_2 :

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \phi dt \quad [\text{см}^{-2}];$$

поток энергии излучения

$$\Psi = \int_{t_1}^{t_2} \psi dt \quad [\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] \text{ или } [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}].$$

Как указывалось выше, поле излучения полностью характеризуется в количественном отношении плотностью потока, а в качественном – энергией, а также направлением излучения.

Для описания качества используются выражения для спектральной плотности потока

$$\varphi_E = \frac{d\varphi(E)}{dE} \quad \text{или} \quad \psi_E = \frac{d\psi(E)}{dE},$$

где E – энергия частиц.

Направление распространения описывается уравнением распределения плотности потока по направлению:

$$\varphi_\Omega = \frac{d\varphi(\Omega)}{d\Omega} \quad \text{или} \quad \psi_\Omega = \frac{d\psi(\Omega)}{d\Omega},$$

где Ω – телесный угол.

Дозиметрические величины

Широкое распространение ионизирующих излучений в радиобиологии и в медицине, а также всё большее значение, которое приобретает защита от излучений, привели к тому, что в настоящее время для измерений значительно чаще используются дозиметрические величины, чем величины, характеризующие поле излучения. При промышленном использовании излучений речь идёт тоже в основном об определении действия излучения, о величине которого также можно наиболее просто судить с использованием методов дозиметрии.

Доза энергии (поглощённая) определяется как отношение

$$D = \frac{dW_D}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dW_D}{dV},$$

где dW_D – часть энергии, которая поглощается массой dm , имеющей плотность ρ и объём dV . Эту дозу энергии чисто терминологически можно сравнить с плотностью энергии или с концентрацией энергии.

Прежде употреблялась единица поглощённой дозы излучения «рад»; с 1985 г. разрешённой единицей дозы излучения является «грэй»:

$$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}; \quad 1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}; \quad 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Поглощённая доза энергии представляет собой фундаментальный показатель, потому что биологическое действие излучения может быть поставлено в связь с энергией излучения, выдерживаемой живой тканью. Впрочем, дозы, представляющие наибольший интерес, которые в практике защиты от излучений могут быть примерно в 10^8 раз меньше 1 Гр, измерить по величине нагрева невозможно. Это станет понятно, если перевести грэй в тепловые единицы:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ кал/г}.$$

Иными словами, чтобы нагреть 1 г воды на 1 К, его нужно подвергнуть облучению с энергией около $4,2 \cdot 10^3$ Гр. Поэтому остаётся только искать возможно более простую взаимосвязь между поглощённой дозой излучения в интересующем материале – поглощённой дозой в сравнительной среде и измеряемой величиной. Здесь можно воспользоваться

ионной (экспозиционной) дозой фотонного излучения в воздухе как стандартной (эталонной) среде, которая определяется по формуле

$$J = \frac{dQ}{dm_L} = \frac{1}{\rho_L} \frac{dQ}{dV},$$

где dQ – электрический заряд ионов одного знака, создаваемый излучением в 1,293 мг воздуха. Эта единица ионной (экспозиционной) дозы носит название «рентген» (Р):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

В системе СИ единицей измерения ионной дозы является «кулон на килограмм» (Кл/кг), определяемой соотношением

$$1 \text{ Кл/кг} = 3,78 \cdot 10^4 \text{ Р.}$$

Значение ионной дозы как практически измеряемой величины определяется тем, что поглощённая доза в воздухе связана с ионной дозой при использовании средней затраты энергии 33,7 эВ на образование одной пары ионов (0,869 рад = 1 Р) и что ионная доза или мощность ионной дозы хорошо поддаются измерению в диапазоне примерно 12 порядков (10^{12}).

Кроме того, сформулированы понятия специфических значений ионной дозы, например равновесной ионной дозы и ионной дозы для пустоты (вакуума), чтобы обеспечить простой пересчёт поглощённой дозы энергии излучения в воздухе на соответствующий показатель в каком-либо другом конкретном материале.

Специальным термином для области защиты от излучений является эквивалентная доза. Она отличается от поглощённой дозы энергии тем, что представляет собой чисто расчётную величину, характеризующую степень опасности частиц различного вида и с различной энергией. Эквивалентная доза D_q определяется как произведение поглощённой дозы энергии D на коэффициент оценки q :

$$D_q = qD.$$

Поскольку коэффициент оценки q безразмерен, эквивалентная доза измеряется в тех же единицах, что и поглощённая (Дж/кг). Чтобы, однако, подчеркнуть, что речь идёт о величине дозы в области защиты от излучений и что физическая измеряемая величина – поглощённая доза – умножена на условный коэффициент оценки q , старая единица эквивалентной дозы (разрешённая тоже только до 1985 г.) получила название «рэм», а новая единица системы СИ названа «зиверт» (Зв), причём соотношение между ними принято следующим:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ рэм.}$$

Коэффициент оценки q для фотонных и электронных лучей равен 1, а для плотно ионизирующих α -излучений и нейтронных лучей в зависимости от энергии, облучаемого объекта и рассматриваемой реакции он может составлять от 2 до 20.

Определение распределения энергии излучения в метрологическом отношении довольно сложно. Поэтому была введена мера «качества» излучения, по которой, как и в дозиметрических величинах, для характеристики энергии излучения используется его взаимодействие с каким-либо материалом. В качестве сравнительной величины при этом была принята толщина слоя некоторого вещества, в котором плотность потока, поток, мощность дозы или поглощённая доза воздействующего излучения уменьшаются вдвое по сравнению с их исходным значением. Необходимым условием для измерения такой толщины слоя половинного поглощения (сокращённо HWS) является формирование узко сфокусированного пучка лучей одного направления.

Характерные константы радионуклидов

Для практических целей могут иметь значение следующие данные.

Под *активностью* A некоторого количества радиоактивного изотопа, содержащего N атомов в момент времени t , понимается математическое ожидание степени превращения

$$A = dN/dt,$$

т.е. число актов распада за единицу времени.

Ранее применялась единица активности кюри (Ки), а с 1985 г. введена новая единица системы СИ, получившая специальное наименование «беккерель» (Бк), причём

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} \text{ или } 1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}.$$

Сила источника (скорость распада) B представляет собой отношение математического ожидания dN_α числа частиц или фотонов, вышедших из источников излучения за некоторый промежуток времени dt , к продолжительности этого промежутка:

$$B = dN_\alpha / dt.$$

Под *периодом полураспада* $T_{1/2}$ какого-либо радионуклида понимается промежуток времени, в течение которого количество первоначально имевшихся атомов в результате радиоактивного превращения уменьшается наполовину.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

где λ – постоянная распада радиоактивного изотопа.

По активности A и расстоянию r можно рассчитать стандартную мощность дозы D_s , зная постоянную мощности дозы Γ_δ (которая раньше называлась удельной константой γ -излучения Γ):

$$D_s = A \Gamma_\delta r^2.$$

Единицей постоянной мощности дозы Γ_δ в системе СИ является $\text{Гй} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$.

На практике применяется единица $\text{мГй} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{ГБк}^{-1}$.

3.2.1. Эффекты, используемые для измерения. Методы измерения и приборы

Ионизационные явления в газах

Методы измерения излучений и приборы, основанные на применении двух изолированных один от другого электродов, установленных друг против друга в объёме газа, отличаются простотой, высокой чувствительностью и надёжностью реализации. Вольт-амперная характеристика таких систем при этом может быть использована различным образом.

Так как газы в их исходном состоянии практически являются эффективными изоляторами, при наличии некоторой разности потенциалов между электродами ток остаётся равным нулю. Если в объёме газа под влиянием облучения образуются ионы, то появляется ток, зависящий от величины приложенного напряжения согласно рис. 3.4. Ввиду незначительной скорости дрейфа ионов имеется возможность рекомбинации положительных и отрицательных ионов в измеряемом объёме, которые при этом не попадают в результат измерения. Соответствующим повышением напряжения, приложенного к **ионизационной камере**, можно повысить напряжённость поля настолько, что (почти) все образовавшиеся ионы успеют дойти до электродов до их рекомбинации. В таком случае ионизационный ток оказывается в основном не зависящим от напряжения на камере и зависит только от плотности потока частиц или от мощности дозы. Это и является обычным режимом работы ионизационных камер.

При дальнейшем повышении напряжения ионы попадают в так называемую область пропорциональности. В этом случае кинетическая энергия

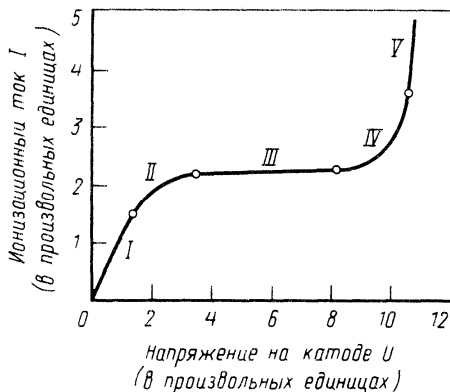


Рис. 3.4. Вольт-амперная характеристика газонаполненных детекторов излучения:

I – омическая область; II – промежуточная область без насыщения; III – область работы ионизационной камеры; IV – область работы пропорционального счётчика; V – область работы счётчика с иницированием (самостоятельным разрядом)

образовавшихся ионов настолько велика, что они при соударениях сами вновь образуют пары ионов, в результате чего обеспечивается эффект усиления. В таком диапазоне напряжений работают пропорциональные счётчики (несамостоятельного разряда). В них измеряемый эффект, т.е. сила тока, пропорционален ионизации, полученной под действием облучения.

При дальнейшем повышении напряжения можно попасть в область с самостоятельным разрядом. При этом каждая первичная ионизация вызывает возникновение разрядных импульсов в камере. Измеренный ток практически ограничивается только числом импульсов и внутренним сопротивлением источника тока и показывающего прибора. В таком режиме работают счётчики Гейгера–Мюллера и счётчики искровых разрядов.

3.2.2. Ионизационные камеры

Прибор с ионизационной камерой состоит из камеры K с одним внутренним и одним внешним электродами, источника напряжения, системы индикации (показывающего прибора) G и измерительного резистора R или измерительного конденсатора C (рис. 3.5). Ионизационный ток (плотность потока или мощность дозы) измеряют по величине падения напряжения на высокоомном резисторе R . Измерение заряда как интеграла тока по времени (измерение потока или дозы) определяется зарядкой конденсатора C .

В зависимости от требуемой чувствительности и геометрической подгонки к поставленной измерительной задаче применяют различные ионизационные камеры. Диапазон измерения детекторами, работающими по принципу ионизационной камеры, охватывает значения от долей микрогрэя до тысяч грэй (от мкГй/ч до кГй/ч).

При заполнении воздухом ионизационные камеры пригодны согласно определению для измерения ионной дозы. Впрочем, для этого необходимо применять специальные конструкции, исключающие или компенсирующие влияние стенок камеры, ограничивающих объём воздуха. Для практических измерений разработано множество измерительных камер. При их применении наряду с чувствительностью, диапазоном измерений и воспроизводимостью получаемых результатов нужно учитывать ещё и

следующие соображения:

1. Зависимость чувствительности от энергии показывает, в какой мере измеренная величина зависит от энергии излучения.

2. Зависимость чувствительности от направления полёта частиц (лучей) обусловлена самой конструкцией детектора. В зависимости от направления падения лучей не-

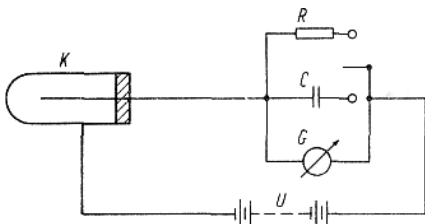


Рис. 3.5. Принципиальная схема ионизационной камеры для измерения мощности дозы или поглощённой дозы

обходимо вводить поправки, которые в свою очередь могут зависеть и от энергии излучения.

3. Зависимость чувствительности от температуры и давления проявляется в том, что при негерметизированных системах камер расчётная масса изменяется с температурой и давлением воздуха. Это тоже обуславливает необходимость в корректировочном коэффициенте, на который нужно умножать показание для получения правильного значения измеряемой величины, если чувствительность измерительной системы не была настроена заранее при помощи эталонного тока.

3.2.3. Пропорциональные счётчики

Область вольт-амперной характеристики, в которой измеренное число ионов пропорционально числу первично образованных ионов (см. рис. 3.4, область IV), имеет большое значение для техники измерений, потому что, во-первых, коэффициент газового усиления составляет здесь $10^3 \dots 10^5$ и, во-вторых, по числу первично образованных ионов можно определить вид и энергию излучения. Поэтому пропорциональные счётчики применяют в импульсном режиме, чтобы можно было полностью использовать их избирательность по энергии.

Геометрия пропорциональных счётчиков (трубок), как и в случае ионизационных камер, может быть хорошо согласована с поставленной задачей измерения. Для абсолютного измерения активностей и для очень чувствительных устройств применяют так называемые 4π -счётчики, в которых исследуемая проба находится в самом счётчике. С целью защиты от излучений находят применение пропорциональные счётчики большой площади с узким окном для входа излучения, чтобы можно было измерять также и β -лучи. Такие устройства обычно встраивают в мониторы для сигнализации о наличии радиоактивных загрязнений. Важным параметром счётчиков является вероятность их срабатывания или коэффициент полезного действия, под которым понимают отношение числа зарегистрированных частиц или квантов энергии к числу поступивших в объём счётчика.

При частицах с малой длиной пробега (α , β , протонах и т.д. сравнительно низкой энергии) можно без затруднений получить вероятность срабатывания, близкую к 100%; в случае рентгеновского и γ -излучения коэффициент полезного действия по порядку величин составляет всего около 1%. С учётом конкретной измерительной задачи может быть также выбрано различное газовое наполнение. Например, для наполнения счётчиков, предназначенных для измерения быстрых нейтронов, можно применять водород, а для измерения тепловых нейтронов – фтористый бор (BF_3). Срок службы пропорциональных счётчиков из-за необратимости изменений, происходящих в их рабочем газе, ограничен примерно 10^{12} импульсами.

3.2.4. Счётчики актов испускания

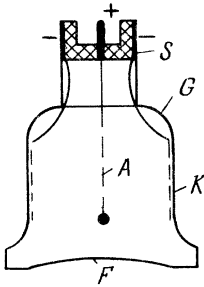


Рис. 3.6. Счётчик Гейгера–Мюллера

Счётчики актов испускания (инициирующие) или так называемые счётчики Гейгера–Мюллера имеют коэффициент газового усиления от 10^7 до 10^{10} . Представляет собой стеклянный баллон G , заполненный газом со специальной примесью (пары спирта или галоген), гасящей процесс ионизации (рис. 3.6).

Внутри баллона размещены проволочный электрод A (анод) и электрод K (катод), образованный металлизацией внутренней стенки баллона. В зависимости от типа счётчика напряжение питания электродов (подаётся через штеккер S) составляет от сотен до тысяч вольт. Поскольку в таких счётчиках отношение напряжённости поля к давлению газа в баллоне превышает аналогичное отношение для ионизационных камер, нарушается пропорциональность между числом частиц, вызванных ионизацией, и выходным сигналом. Поэтому счётчики Гейгера–Мюллера предназначены только для счёта частиц.

Характеризуется высокой чувствительностью, но относительно ограниченным сроком работы (до 10^9 импульсов), который увеличивается при использовании галогенных примесей.

3.2.5. Влияние излучения на твёрдые тела

При поглощении веществом ионизирующей энергии некоторая доля облучающей энергии затрачивается на изменение физического состояния этого вещества. Для решения задач по измерению излучений это явление используют в какой-либо эталонной среде, изменение состояния которой может быть точно измерено. Сюда наряду с эффектами ионизации в газах относятся и эффекты изменения окрашивания и люминесценции в твёрдых телах. На практике оправдали себя те методы измерений, которые позволяют на основе простых зависимостей определить основные параметры поля излучения.

3.2.6. Полупроводниковые детекторы

Кремниевые или германиевые диоды применяют аналогично газонаполненным ионизационным камерам для измерения спектрального распределения квантов излучения. Поглощённое излучение создаёт в области диода, свободной от носителей заряда, пары электрон–дырка; эти пары перемещаются в зону поля p - n -перехода и наводят соответствующий электрический сигнал. Преимущество полупроводниковых детекторов заключается в том, что для образования каждой пары электрон–дырка требуется примерно в 10 раз меньше энергии, чем для образования пары

ионов в ионизационной газонаполненной камере. Поэтому при одинаковой поглощённой энергии измерительный эффект (сигнал) получается в 10 раз больше. Ввиду большей плотности и более высокого порядкового номера твёрдого материала в единице его объёма поглощается также и значительно большее количество энергии, чем в газах. Однако для полного использования высоких качеств полупроводниковых детекторов кремниевые и германиевые детекторы необходимо охлаждать до температуры около $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также применять электронные системы преобразования импульсов с малым собственным шумом.

Для дозиметрических измерений применяют более простые системы, например кристаллы сульфида кадмия CdS , электрическая проводимость которых изменяется под действием излучения. Такие полупроводниковые зонды отличаются малыми размерами, однако существенным их недостатком является сильная зависимость характеристик от температуры и от энергии излучения.

3.2.7. Сцинтилляционные счётчики

Если через вещество – сцинтиллятор Sz – проходят элементарные частицы измеряемого излучения, то часть теряемой ими в веществе энергии выделяется в виде светового импульса. Для некоторых сцинтилляторов характерна линейная зависимость между упомянутой потерей энергии и амплитудой эмитированного светового импульса. Счётчик состоит из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя, образованного диодами D (рис. 3.7).

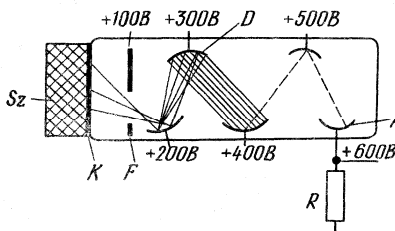


Рис. 3.7. Сцинтилляционный счётчик

Световой импульс попадает на фотокаатод K , в результате фотоэффекта образуются электроны. Они фокусируются на диодах, происходит усиление (умножение) электронного потока за счёт образования вторичных электронов, и в цепи анода A на нагрузке R формируется импульс напряжения, пропорциональный по амплитуде энергии излучения. Устройство фотоумножителя схематично показано на рис. 3.7.

Чаще всего применяют для определения энергии элементарных частиц, т.е. разделения частиц по энергиям (главным образом γ -излучение), а также для определения времени появления отдельных частиц всех видов ионизирующего излучения с разрешением 10^{-8} .

3.2.8. Термолюминесцентные детекторы

У некоторых твёрдых тел, подвергавшихся облучению, электроны, поднятые облучением на более высокие энергетические уровни, при на-

греве могут быть возвращены в исходное состояние. Часть высвобождающейся при этом энергии может излучаться в виде термлюминесцентного свечения, которое поддаётся измерению. Термлюминесценция кристаллов, например LiF, CaF₂, CaSO₄ или Li₂B₄O₇, используется в обычных имеющихся в продаже приборах для дозиметрических целей. Достижимый диапазон измерения зависит от типа и размера детектора и от чувствительности фотометрической системы. При выборе детекторов решающую роль играют чувствительность кристаллов, её зависимость от энергии излучения и способность кристаллов запоминать своё состояние (релаксация). Так как светоотдача термлюминесцентных детекторов сильно зависит от различных влияющих факторов, при измерениях необходимо строго придерживаться определённых указаний по градуировке и расшифровке получаемых результатов.

3.2.9. Радиолюминесцентные детекторы

Под воздействием ионизирующего излучения некоторые твёрдые тела изменяют характер поглощения ими светового потока. Возникающие при этом центры люминесценции используются для обнаружения ионизирующего излучения. Распространение получили детекторы из метафосфатов щелочноземельных и щелочных металлов, в которые в качестве активатора введено серебро. Расшифровывающий прибор возбуждает люминесцентные центры, пропорциональные поглощённой энергии, и измеряют получившийся при этом радиофотолюминесцентный световой поток.

3.2.10. Окрашиваемые детекторы

Многие вещества, например стёкла, кварц, алмаз и другие кристаллы, а также пластмассы, под влиянием больших доз ионизирующего излучения окрашиваются. Этот эффект после градуировки с применением известных доз тоже может быть использован для целей дозиметрии.

3.2.11. Фотографические детекторы

Почернение фотографических слоёв (фотоплёнок) уже в начальный период появления рентгенологии использовалось для целей дозиметрии. Однако очень скоро выявились недостатки этого метода, заключающиеся в плохой воспроизводимости и сильной зависимости от энергии излучения. Напротив, преимуществами фотографического (фотоплёночного) метода являются его сравнительная простота, дешевизна и высокая информативность.

Фотографическая дозиметрия получила практическое применение около 30 лет назад в основном для измерения личных доз с целью защиты от излучений производственного персонала. Для учёта зависимости результата от уровня энергии применяют два способа – компенсационный

фильтровой метод и метод фильтрового анализа. Первый метод заключается в том, что при мягких излучениях (т.е. излучениях с малой энергией) повышенная чувствительность эмульсионной плёнки ослабляется помещённым перед ней фильтром из свинца толщиной около 1 мм, поскольку этот фильтр предпочтительно задерживает мягкие составляющие излучения. При помощи таких фильтров можно измерять дозу излучения квантов с энергией начиная с 50 кэВ и более практически независимо от уровня энергии. При втором из вышеупомянутых методов перед эмульсионной плёнкой помещают несколько фильтров различной толщины и возможно из разного материала, чтобы по различному почернению плёнки за разными фильтрами можно было судить о виде излучения и о его качестве, т.е. о составе излучения.

Диапазон измерения фотографическими дозиметрами при использовании двух или трёх фотоэмульсий различной чувствительности может достигать примерно от 10 мкГй до 10 Гй (или же при дозиметрических измерениях с целью защиты от излучений от 10 мкСв до 10 Св). Такой диапазон и достигаемая точность определения дозы примерно $\pm 15\%$ достаточны для требований дозиметрии при защите от излучений. Преимуществом фотографической дозиметрии, которая позволяет определять не только количество излучения, но и его качество, а также судить о направлении падения излучения, распределении экспозиции во времени, возможных радиоактивных загрязнениях и т.д., считается большой объём информативного содержания.

3.2.12. Химическая дозиметрия

Наряду с химическими методами для абсолютного измерения поглощённой дозы – здесь следует в первую очередь назвать дозиметр Фрикке, основанный на восстановлении ионов Fe^{3+} до ионов Fe^{2+} , – определённое значение для измерения больших доз излучения получили и многие другие радиационно-химические эффекты. Для этой цели предпочтительно используют химические изменения в высокополимеризованных веществах, происходящие под влиянием излучений. Изменения цвета полимерных плёнок (из полистирола, полиамида, поливинилхлорида) тоже могут быть простыми индикаторами поглощённой дозы излучения в диапазоне от нескольких килорад до нескольких мегарад ($10^1 - 10^4$ Гй).

Среди перечисленных методов за последние годы наибольшую важность приобрели те, которые основываются на образовании свободных радикалов в некоторых органических веществах, например в аминокислотах. Эти радикалы могут быть обнаружены по способу электронно-спинового резонанса (ESR), при помощи окрашивающихся жидкостей или на основе люминесценции. Такие способы подходят в первую очередь для определения больших доз и характеризуются благоприятной зависимостью от уровня энергии излучения и хорошей точностью.

3.2.13. Экзоэлектронная дозиметрия

Во многих непроводящих веществах при поглощении ионизирующих излучений электроны переходят на более высокие энергетические уровни. С этих уровней они затем под воздействием тепла или света могут вылетать с поверхности материала, и их число может быть определено электронным счётчиком. Число подсчитанных электронов при этом будет мерой дозы излучения, поглощённой детектором. На практике в качестве материалов для детекторов предпочтительно применяют BeO , BaSO_4 или SrSO_4 , которые в сочетании с соответствующей расшифровывающей аппаратурой позволяют определять и малые дозы примерно начиная от 10^{-8} Гр или Св.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как известно, операции измерений, испытаний и контроля являются ключевыми в оценке соответствия процесса заданным требованиям и управлении качеством в дальнейшем. Особенности применения той или иной измерительной операции определяются спецификой выполняемых работ испытательной лабораторией при сертификации.

Представленное учебное пособие по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» является третьей частью в рамках данной тематики и раскрывает многообразие измерительных задач и видов измерений.

В данном учебном пособии рассмотрены основные виды измерений и контроля, применяемые при осуществлении тепловых процессов. В первую очередь внимание уделено средствам и методам измерения следующих физических величин, наиболее часто применяемых на практике:

1) средства и методы измерения температуры. Приведены различные типы термометров, изучены схемы включения и особенности применения термоэлектрических преобразователей, а также преобразователей сопротивления. Особое внимание уделено бесконтактным средствам измерения. Рассмотрены основные области применения тепловизоров при диагностировании и контроле качества различных объектов;

2) содержание, цели и задачи теплофизических измерений. Дана классификация средств измерения теплофизических величин. Рассмотрены примеры определения теплопроводности и теплоёмкости;

3) изучение видов средств измерения оптических и радиационных величин.

Знание конструкции, принципа действия, особенностей включения в электрическую сеть поможет будущим специалистам обоснованно решать измерительные задачи в инструментальном контроле качества.

ГЛОССАРИЙ

Акустические термометры – термометры, принцип действия которых основан на зависимости скорости распространения звука в среде от значения термодинамической температуры.

Дилатометрические термометры – термометры, принцип действия которых основан на использовании свойства твёрдого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры.

Биметаллический термометр – прочное соединение двух пластин металлов или сплавов с разными коэффициентами линейного теплового расширения.

Болометры – термопреобразователи сопротивления, изготовленные либо из фольги проводящих материалов, либо из полупроводников.

Внутренний фотоэффект – перераспределение электронов в полупроводнике при поглощении излучения.

Граничные условия – условия теплового взаимодействия тела с окружающей средой.

Жидкокристаллический термондикатор – термондикатор, содержащий жидкокристаллическое вещество, которое в определённом интервале температур изменяет свою структуру так, что падающий на него свет белого источника отражается с изменением цвета, резко зависящим от температуры.

Ионизационная камера – камера, заполненная газом, имеющая два электрода, сила тока между которыми зависит от величины ионизирующего излучения.

Кварцевый термометр – термометр, принцип действия которого основан на температурной зависимости собственной резонансной частоты кварцевого пьезоэлемента.

Коэффициент теплообмена характеризует процесс обмена теплотой между твёрдой поверхностью и жидкостью (газом) путём и теплопроводности, и конвекции одновременно.

Магнитный термометр – термометр, принцип действия которого основан на температурной зависимости магнитной восприимчивости парамагнитных веществ.

Метод теплового контроля – метод, основанный на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическими чувствительными элементами (термопарой, фотоприёмником, жидкокристаллическим индикатором и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор.

Оптрон – преобразователь электрических и оптических сигналов с одновременным их усилением, который представляет собой соединение по определённой схеме фоторезистора с электролюминесцентным элементом.

Пирометрические методы измерения – методы, основанные на различных принципах преобразования теплового излучения объекта измерения в непосредственно измеряемую физическую величину.

Показатель тепловой инерции – время, необходимое для того, чтобы при внесении термопреобразователя в среду с постоянной температурой разность температур среды и любой точки внесённого в неё термопреобразователя стала равной 0,37 того значения, которое будет в момент наступления стационарного теплового режима.

Пороговый поток – минимальный поток излучения, вызывающий изменение фототока, превышающее уровень шумов.

Плотность теплового потока определяется как количество теплоты, проходящей за единицу времени через единицу площади поверхности (S).

Радиационные величины – характеристики ионизирующих излучений, под которыми понимаются излучения, обладающие энергией, достаточной для вырывания электронов из атомов вещества, которым они поглощаются.

Радиационные пирометры – пирометры, основанные на использовании зависимости полной (интегральной) светимости теплового излучения тела от температуры.

Светодиод – полупроводниковая пластинка с излучающим p - n -переходом, свечение которого вызывается рекомбинацией носителей тока (электронов и дырок) при приложении напряжения в прямом направлении.

Сцинтилляционные счётчики – устройство, в котором происходит преобразование энергии ионизирующего излучения в энергию видимого излучения, преобразуемую далее фотоумножителем в электрический сигнал.

Темновое сопротивление – величина сопротивления затемнённого фотодатчика.

Температура – физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества.

Температурная шкала – это ряд последовательных значений температуры, образуемый в соответствии с выбранным законом, определяющим взаимосвязь термометрического параметра (свойства) и температуры.

Температурное поле – совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого тела или системы тел в данный момент времени, описываемая математически скалярной функцией координат.

Тепловая дефектоскопия состоит в определении факта наличия дефекта и его расположения в объекте контроля.

Тепловая дефектометрия – направление активного теплового неразрушающего контроля, представляющее методы и средства количественной оценки глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров.

Тепловая томография – направление технической диагностики, состоящее в послойном синтезе внутренней структуры объекта контроля на основе использования методов проективной компьютерной томографии.

Тепловой поток – это количество теплоты, проходящей через поперечное сечение за единицу времени t .

Теплоёмкость вещества – изменение теплосодержания вещества (энтальпии) при изменении его температуры на 1 К.

Теплопроводность – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины в направлении нормали к площадке.

Термобатарея – последовательно соединённые термоэлектрические преобразователи.

Термометрия – раздел технической физики, в котором изучаются методы и средства измерения температуры, теоретические основы способов построения

термодинамической и практических температурных шкал и созданные на этой основе эталоны и образцовые средства измерений температуры.

Термоиндикатор – вещество (смесь веществ), изменяющее свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определённой температуре.

Термоиндикатор плавления – это термоиндикатор, у которого цвет изменяется при критической температуре в связи с плавлением одного или нескольких составляющих компонентов.

Термометры расширения – приборы, в которых для измерения температуры используется свойство теплового расширения вещества: жидкости, газа или твёрдого тела.

Термопреобразователи сопротивления – это преобразователи, принцип действия которых основан на свойстве вещества изменять своё электрическое сопротивление с изменением температуры.

Термоэлектродные (компенсационные) провода – провода, применяющиеся для удлинения выводов термоэлектрических преобразователей (термопар) при подключении к вторичным измерительным преобразователям (измерительным приборам).

Термоэлектрические термометры – термометры, принцип действия которых основан на свойстве металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (термоЭДС), зависящую от температуры места соединения (спая) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов).

Удельная теплоёмкость вещества – величина, равная количеству теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 К.

Фотодиод – полупроводниковый преобразователь лучистой энергии, в котором происходит направленное движение носителей тока при воздействии энергии оптического излучения.

Фототриод – полупроводниковый приёмник лучистой энергии, имеющий направленное движение носителей тока и обладающий свойством усиления фототока при действии энергии оптического излучения.

Фотоэлемент – преобразователь, представляющий собой вакуумную или газонаполненную лампу с катодом в виде светочувствительного слоя, нанесённого на внутреннюю поверхность стеклянного баллона, и анодом в виде кольца или пластины.

Фоторезистор – полупроводниковый фотоэлектрический преобразователь с внутренним фотоэффектом.

Цветовые пирометры – термометры, измеряющие цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определённых участках спектра.

Яркостная температура – условная температура чёрного тела, численно равная такой температуре чёрного тела, при которой их спектральные энергетические яркости равны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие / С. А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстов, Р. В. Меркулов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
2. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
3. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт ; пер. с нем. – Москва : Мир, 1999. – 391 с.
4. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В. В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2005. – 656 с.
5. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2-х кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2006. – Кн. 1. – 208 с.
6. Пономарев, С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2-х кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2006. – Кн. 2. – 216 с.
7. Болтон, У. Карманный справочник инженера метролога / У. Болтон. – Москва : Издательский дом «Додека-XXI», 2002. – 384 с.
8. Профос, П. Измерения в промышленности : справочник. В 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура / П. Профос ; пер. с нем. – Москва : Металлургия, 1990. – 384 с.
9. Профос, П. Измерения в промышленности : справочник. В 3 кн. Кн. 3. Способы измерения и аппаратура / П. Профос ; пер. с нем. – Москва : Металлургия, 1990. – 344 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	4
1.1. Температура и температурные шкалы	4
1.1.1. Основные сведения о термометрии	4
1.1.2. Термодинамическая температурная шкала (ТТШ)	6
1.1.3. Практические температурные шкалы	10
1.2. Термометры расширения и манометрические термометры	12
1.2.1. Стеклянные жидкостные термометры	12
1.2.2. Манометрические термометры	23
1.2.3. Термометры дилатометрические	28
1.2.4. Термометры биметаллические	30
1.3. Термоэлектрические преобразователи (термометры)	31
1.3.1. Физические основы принципа действия термоэлектрических преобразователей	31
1.3.2. Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического термометра	33
1.3.3. Типы и характеристики термоэлектрических термометров	35
1.3.4. Удлиняющие термоэлектродные провода	38
1.3.5. Установка термоэлектрических термометров	40
1.4. Общие сведения о термопреобразователях сопротивления	41
1.4.1. Физические основы принципа действия термопреобразователей сопротивления	41
1.4.2. Типы и характеристики термопреобразователей	42
1.4.3. Устройство термопреобразователей сопротивления	43
1.4.4. Полупроводниковые терморезисторы	44
1.5. Специальные термометры	48
1.6. Схемы включения термоэлектрических преобразователей	54
1.7. Схемы включения термопреобразователей сопротивления	57
1.8. Цифровые термометры	58
1.9. Измерение температуры бесконтактным методом	59
1.9.1. Яркостные пирометры	62
1.9.2. Цветовые пирометры	63
1.9.3. Радиационные пирометры (полного излучения)	64
1.9.4. Тепловизоры	66
2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	68
2.1. Теплофизические свойства	68
2.2. Организация эксперимента при измерении теплофизических свойств веществ	73

2.3. Классификация методов и приборов для измерения теплофизических свойств	75
2.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности	80
2.5. Граничные условия краевых задач теплопроводности	81
2.6. Основные представления о прямых и обратных краевых задачах теплопроводности	83
2.6.1. Прямая краевая задача теплопроводности	83
2.6.2. Обратная (инверсная) краевая задача теплопроводности относительно коэффициентов (теплофизических свойств)	83
2.7. Реализация стационарного метода измерения теплопроводности плоского слоя	84
2.7.1. Физическая модель устройства для реализации метода....	84
2.7.2. Порядок осуществления измерительных операций	86
2.8. Методы измерения теплоёмкости	87
2.8.1. Адиабатический калориметр	87
2.8.2. Зондовые методы	88
2.8.3. Метод монотонного нагрева	88
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ВЕЛИЧИН	91
3.1. Средства измерения оптических величин	91
3.2. Средства измерения радиационных величин	97
3.2.1. Эффекты, используемые для измерения. Методы измерения и приборы	103
3.2.2. Ионизационные камеры	104
3.2.3. Пропорциональные счётчики	105
3.2.4. Счётчики актов испускания	106
3.2.5. Влияние излучения на твёрдые тела	106
3.2.6. Полупроводниковые детекторы	106
3.2.7. Сцинтилляционные счётчики	107
3.2.8. Термолюминесцентные детекторы	107
3.2.9. Радиолюминесцентные детекторы	108
3.2.10. Окрашиваемые детекторы	108
3.2.11. Фотографические детекторы	108
3.2.12. Химическая дозиметрия	109
3.2.13. Экзоэлектронная дозиметрия	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
ГЛОССАРИЙ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114