

*Г.В. Смирнов, В.С. Солдаткин, В.И. Туев*

**ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Томск 2015

*Министерство образования и науки Российской Федерации*  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

**ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Учебное пособие

Разработчики:

заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.И. Туев;

профессор

\_\_\_\_\_ Г.В. Смирнов;

доцент

\_\_\_\_\_ В.С. Солдаткин.

Томск 2015

Смирнов Г.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. Приборы и датчики экологического контроля: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 117 с.

Настоящее учебное пособие составлено с учетом требований федеральных Государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) по направлениям подготовки 05.03.06 «Экология и природопользование» и 20.03.02 «Техносферная безопасность». Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих специальную дисциплину «Приборы и датчики экологического контроля» и содержат необходимую информацию, используемую в курсе лекций изучаемой дисциплины.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
Глава 1. Приборы и датчики экологического контроля. Основные понятия и определения	7
1.1 Определения и основные характеристики	7
1.2 Назначение и области применения датчиков	10
1.3 Технические характеристики	12
Глава 2. Активные, пассивные и комбинированные датчики	15
2.1 Активные датчики	15
2.2 Пассивные датчики	17
2.3 Комбинированные датчики	18
Глава 3. Шкалы термодинамических приборов	19
3.1. Шкалы Кельвина, Ренкина, градусы Цельсия и Фаренгейта	19
3.2 Измеренная и измеряемые температуры	20
Глава 4. Термометры расширения	23
4.1. Стеклянные жидкостные термометры	23
4.2 Манометрические термометры	29
Глава 5. Термоэлектрические термометры	34
5.1 Основы теории, термоэлектрические цепи	34
5.2 Устройство термоэлектрических термометров и применяемые материалы	41
Глава 6. Термометры сопротивления и методы измерения сопротивления	48
6.1. Общие сведения о термометрах сопротивления	48
6.2 Устройство термометров сопротивления	55
6.3 Особенности измерения сопротивления термометров и способы их подключения	58
Глава 7. Термопары, термотранзисторы оптическая пирометрия	62
7.1 Измерение температуры термопарой	62
7.2 Термометры термотранзисторные	65

7.3 Оптическая пирометрия	66
Глава 8. Оптические датчики	68
8.1 Общие сведения об оптических датчиках	68
8.2 Метрологические характеристики оптических датчиков	70
Глава 9. Оптико-электронные датчики	73
9.1 Фоторезисторы	73
9.2 Фотодиоды	75
9.3 Фототранзистор	76
9.4 Фотоэмиссионные	77
9.5 Фотоэлектронные умножители	79
Глава 10 Тепловые приёмники излучения, датчики изображения, волоконная оптика, лазерные и волоконно-оптические гироскопы	80
10.1 Тепловые приемники излучения	80
10.2 Датчики изображения	81
10.3 Волоконная оптика	85
10.4 Лазерные и волоконно-оптические гироскопы	87
Глава 11. Датчики деформации	89
11.1 Общие сведения о датчиках деформации	89
11.2 Закон Гука	89
11.3 Экстензометр с вибрирующей струной	95
Глава 12. Электрохимические датчики	96
12.1 Общие сведения	96
12.2 Потенциометрические датчики	97
Глава 13. Датчики влажности воздуха	99
13.1 Общие сведения	99
13.2 Конденсационные гигрометры	100
13.3 Сорбционные датчики	100
Глава 14. Датчики газового состава	106
14.1 Общие сведения	106
14.2 Датчик на основе твердых электролитов	106

14.3 Кварцевый пьезоэлектрический датчик	109
14.4 Катарометры	110
14.5 Парамагнитные датчики	111
Глава 15. Приборы для определения радиационного фона	114
Список литературы	116
Приложение А. – Диапазоны электромагнитных волн	118

# ГЛАВА 1. ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1 Определения и основные характеристики

*Физическая величина* – какое-либо свойство физического объекта (предмета, процесса).

*Датчик (сенсор, от англ. sensor)* – первичный преобразователь, элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы. Датчик – это устройство, которое, подвергается воздействию физической величины, выдавая эквивалентный сигнал, являющийся функцией измеряемой величины:

$$S = F(m) \quad (1.1)$$

где  $S$  – выходная величина датчика,

$m$  – входная величина.

*Сигнал* (от лат. *signum* — знак) – знак, физический процесс или явление, несущие сообщение о каком-либо событии, состоянии объекта, либо передающие команды управления, оповещения и т. д. Посредством совокупности сигналов можно с той или иной степенью полноты представить любое, сколь угодно сложное событие. По своей природе сигнал может быть механическим, тепловым, световым, электрическим, электромагнитным, звуковым и др.

Соотношение (1.1) в общей форме выражает физические законы, положенные в основу работы датчика. Однако характеристики преобразования в численной форме определяются экспериментально в результате градуировки.

*Градуировка* – измерение значений  $S$  для ряда точек известных значений  $m$ , что позволяет построить градуировочную кривую.

*Градуировка средств измерений* (от лат. *gradus* – шаг, ступень, степень),

метрологическая операция, при помощи которой средство измерений (меру или измерительный прибор) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Отметки шкалы должны с требуемой точностью соответствовать значениям измеряемой величины, а таблица (кривая) с требуемой точностью отражать связь эффекта на выходе прибора с величиной, подводимой к входу (например, зависимость ЭДС термопары пирометра от температуры её рабочего спая).

На практике целесообразно использовать датчики, у которых существует линейная зависимость между малыми приращениями входной  $m$  и выходной  $S$  величинами:

$$S = s \times m, \quad (1.2)$$

где  $s$  – чувствительность датчика.

*Чувствительность* – способность объекта реагировать определённым образом на определённое малое воздействие, а также количественная характеристика этой способности.

Важнейшей проблемой при проектировании датчика и использовании датчиков является обеспечение постоянства чувствительности датчика, которая должна как можно меньше зависеть от входной величины, частоты измерений, времени и воздействия других физических величин, характеризующих окружающие объекты.

*Мера* – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

*Погрешность ( $\Delta$ )* – это разность между показаниями средства измерения (СИ)  $X$  и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины ( $Q$ ):

$$\Delta = X - Q.$$

Случайная погрешность – неизбежна и неустранима.

Систематическая погрешность – постоянная погрешность результата измерений.

Погрешность является показателем точности.



*Эталон* – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины с целью передачи ее другим средствам измерений данной величины.

*Единство измерений* – состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в РФ единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Классификация физических величин приведена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Классификация физических величин

Величины		
Реальные		Идеальные
Физические	Нефизические	Математические
Измеряемые		
Оцениваемые		

Таблица 2. Классификация физических величин

	Величины	
Энергетические (активные)	Вещественные (пассивные)	Характеризующие процессы

Энергетические (активные) – т.е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии.

Вещественные (пассивные) – описывающие физические и физико-химические свойства вещества, материалов и изделий из них.

Характеризующие протекание процессов во времени – различного вида спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

Измерения бывают прямые и косвенные: прямые – искомое значение – непосредственно из опытных данных; косвенные – на основании зависимости между искомой и полученной при прямом измерении величинами.

Средства измерения бывают механические, пневматические, оптические, электрические.

## 1.2 Назначение и области применения датчиков

Сравнение биологическая и техническая система принятия, хранения и преобразования информации схематически представлено на Рис.1.

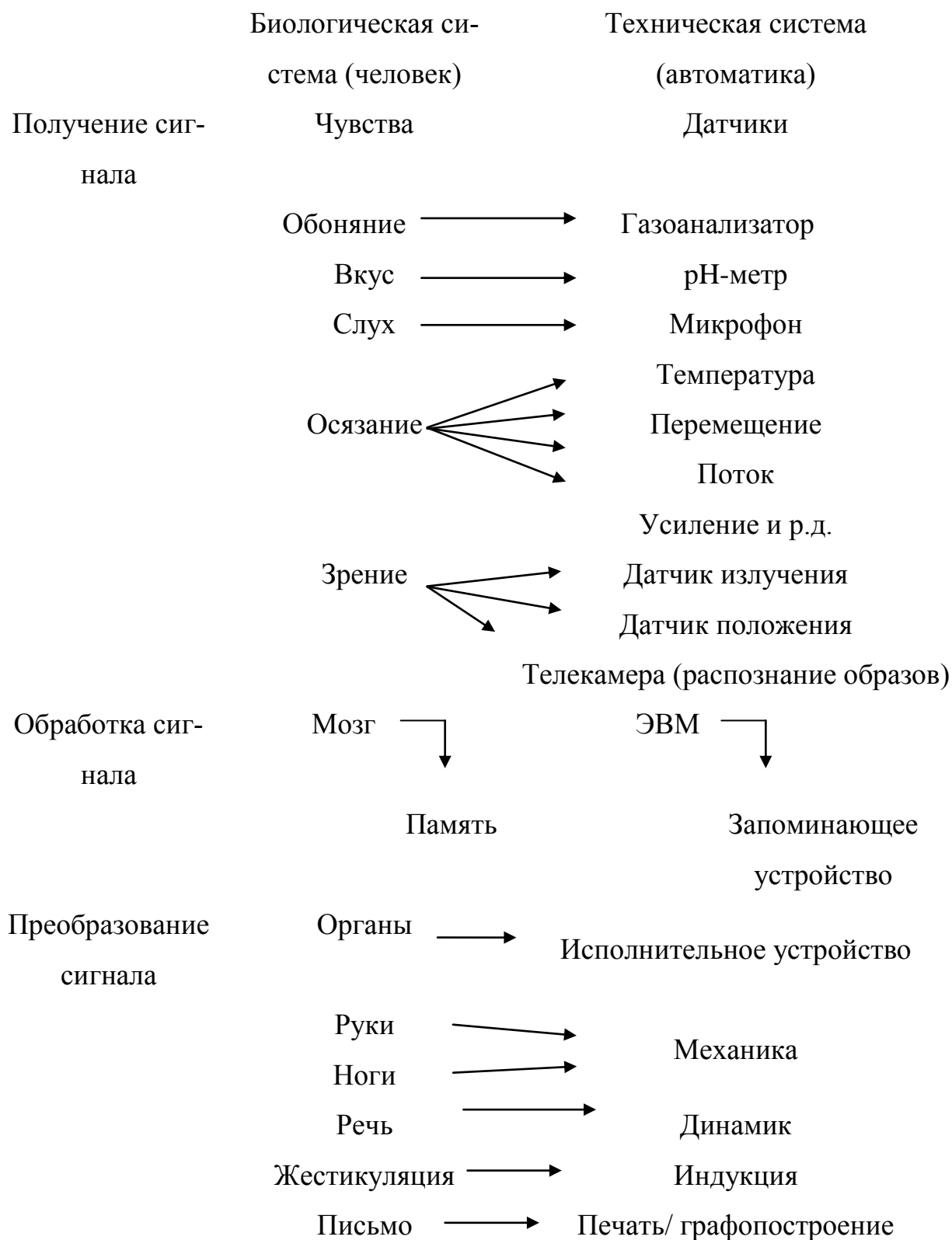


Рисунок 1. Сравнение биологической и технической систем принятия, хранения и преобразования информации

По назначению и области применения, датчики можно классифицировать:

✓ по измеряемой физической величине

(давление, температура, вибрация, частота вращения, усиление, деформация, линейные скорость и ускорение, длина и плоский угол, влажность, расход, уровень, сплошность, масса, состав и свойства жидкостей и газов и т.д.);

✓ по характеру изменения измеряемой физической величины

(квазистатические, статические, динамические, импульсные);

✓ по свойствам физической величины

(агрессивная, неагрессивная);

✓ по контакту с измеряемой величиной

(контактные, бесконтактные);

✓ по категории применения

(многократное, непрерывное, однократное, общее);

✓ по этапам применения

(разработка, производство, испытание, эксплуатация);

✓ по условиям эксплуатации

(обычные, умеренно холодные, тропические и т.д.);

✓ по виду объектов применения

(наземные стационарные, наземные подвижные, морские, авиационные, космические, универсальные);

✓ по области применения

(приборы и системы управления, приборы и системы регулирования, приборы и системы контроля, измерительные системы, системы диагностирования, приборы и системы сигнализации, системы жизнеобеспечения, системы энергопитания, навигационные системы, телеметрические системы, производственные роботизированные системы).

### 1.3 Технические характеристики

Для установления технических характеристик датчиков используют различные методики измерения этих характеристик.

*Методика (метод) измерений* – совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Для проведения измерений интересующих технических характеристик необходимо наложить ограничения на воздействующие величины, чтобы они не влияли на исследуемую величину. Например, когда говорят об относительной влажности, обязательно указывают при какой температуре проводятся измерения (относительная влажность 80% при температуре 25<sup>0</sup> C).

Внешние воздействующие факторы (ВВФ) можно разделить на механические, климатические, электрические, биологические, радиационные, световые и т.д. В Технических условиях и, как правило, в инструкции по эксплуатации на любой датчик указывают его диапазон измерений, точность (погрешность) и условия эксплуатации.

Для исключения погрешности измерений, связанных с измерением одной и той же величины при разных внешних условиях и корректного сопоставления результатов исследований, необходимо указывать условия проведения исследований.

Как правило, техническими характеристиками датчика являются: диапазон чувствительности (отношение изменения сигнала  $\Delta y$  на выходе СИ к вызвавшему это изменение изменению  $\Delta x$  сигнала на входе ( $S=\Delta y/\Delta x$ )), диапазон измерений (область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаяемые пределы погрешности СИ), предел измерений (наибольшее или наименьшее значение диапазона измерения), цена деления шкалы (разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы), погрешности, габаритные размеры, масса, а так же требования к электропитанию и т.д.

*Шкалы измерений:* Шкалы наименований (классификации) (основаны на

приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен, (например шкала цветов), шкалы порядка (рангов) (описывают свойства величин, упорядоченные по возрастанию или убыванию оцениваемого свойства, например определение твёрдости или вязкости), шкалы интервалов (разностей) (дальнейшее развитие шкал порядка, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности (равнозначности), порядка и аддитивности (прибавления), например шкала Цельсия), шкалы отношений (описывают свойства величин, для множества количественных проявлений которых применимы логические отношения эквивалентности, порядка и пропорциональности, а для некоторых шкал отношение суммирования, например шкала масс).

*Быстродействие* – это параметр датчика, позволяющий оценить, как выходная величина следует во времени за изменениями измеряемой величины.

Параметр, используемый для количественного описания быстродействия – это время установления, т. е. интервал времени, который должен пройти после ступенчатого изменения измеряемой величины, чтобы сигнал на выходе датчика достиг уровня, отличающегося на определенную, обычно фиксированную величину от установившегося значения.

Чем меньше время установления, тем выше быстродействие датчика.

В случае ступенчатого изменения измеряемой величины обычно различают:

а) *время задержки нарастания* - время, необходимое для того, чтобы сигнал на выходе увеличился от начального значения до 10% своего полного изменения;

б) *время нарастания*, соответствующее увеличению выходного сигнала от 10 до 90% своего полного изменения.

## ГЛАВА 2. АКТИВНЫЕ, ПАССИВНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАТЧИКИ

### 2.1 Активные датчики

Принцип работы активных датчиков основан на физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму сигнала.

Таблица 3 Используемый эффект в активных датчиках

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический	Заряд
	Внешний фотоэффект	Ток
	Внутренний фотоэффект	Напряжение
Механическое воздействие (сила, ускорение, давление)	Пьезоэлектрический	Напряжение
Скорость, перемещение	Электромагнитный	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

**Пироэлектрический эффект** – заключается в том, что ряд кристаллов испытывают спонтанную электрическую поляризацию, зависящую от температуры, и на двух противоположных поверхностях появляются электрические заряды противоположных знаков. Поглощённый кристаллом поток излучения приводит к росту его температуры и к соответствующему изменению поляризации. Напряжение на зажимах конденсатора будет пропорционально значению потока оптического излучения.

**Пьезоэлектрический эффект** – изменение механического напряжения в кристалле пьезоэлектрика, например кварца, приводит к деформации, вызывающей появление на противоположных поверхностях кристалла одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов. Таким образом, изменение силы или приводимых к ней величин (давления, ускорения) осуществляется измерением напряжения между зажимами пьезоэлектрика.

**Эффект электромагнитной индукции** – при перемещении проводника в постоянном электромагнитном поле, возникает ЭДС, пропорциональная

скорости изменения магнитного потока.

**Внешний фотоэффект** – наблюдается в вакуумном фотоэлементе. Под воздействием светового потока фотоэлектроны покидают освещённый фотокатод и образуют пропорционально освещённости ток, текущий к аноду под действием электрического поля.

**Внутренний фотоэффект** – наблюдается в полупроводниковом фотодиоде, электроны и дырки образованные в окрестностях  $p-n$  – перехода в полупроводнике, перемещаются под действием электрического поля, вызывая изменение напряжения на границах полупроводника.

**Фотоэлектромагнитный эффект** – наблюдается в датчиках, содержащих чувствительный полупроводниковый монокристалл, размещённый между наконечниками магнита.

Поток оптического излучения, поглощённый поверхностью кристалла, создаёт вблизи неё повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, диффундирующих внутрь кристалла. Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, и между электродами устанавливается разность потенциалов, пропорциональная освещённости. Фотоэлектрический эффект является основой фотометрии и обеспечивает передачу информации, носителем которой является свет.

**Эффект Холла** – принцип работы датчиков на основе эффекта Холла заключается в том, что при пропускании электрического тока через пластину полупроводника, находящейся в однородном магнитном поле в направлении, перпендикулярном полю, возникает ЭДС. Постоянный магнит датчика механически связывают с объектом, и при смещении магнита пропорционально изменяется выходное напряжение датчика.

## 2.2 Пассивные датчики

В пассивных датчиках параметры комплексного сопротивления (импеданса) могут меняться под воздействием измеряемой величины. На величину комплексного сопротивления оказывают влияние два основных фактора: геометрия и размеры элементов датчика. Помимо этих факторов на величину комплексного сопротивления оказывают влияние: свойства материалов датчика, такие как: удельное сопротивление, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость.

Таблица 4 Используемые эффекты в пассивных датчиках

Измеряемая величина	Изменяющаяся электрическая характеристика датчика	Тип используемого материала
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика
Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля
Перемещение	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
Влажность	Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, полимеры

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента зависят от переменных физических величин: температуры, давления, влажности, освещённости и т.д. Если менять только одну величину, а остальные поддерживать постоянными, то по градуировочной кривой, можно оценить соответствие между значениями этой величины и комплексным сопротивлением. Зная градуировочную кривую, по результатам измерения комплексного сопротивления можно определить значение измеряемой величины.

Комплексное сопротивление пассивного датчика и его изменение можно измерить только включив датчик в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала.

Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов:



- потенциометрическая схема, содержащая соединённые параллельно источник напряжения и датчик – потенциометр;
- мостовая схем, разбаланс которой характеризует изменение импеданса датчика;
- колебательный контур, включающий комплексное сопротивление датчика.

### **2.3 Комбинированные датчики**

В случаях, когда не электрические величины не удаётся преобразовать в электрическую величину, осуществляют двойное преобразование исходной величины – в промежуточную не электрическую величину, которая преобразуется затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух измерительных преобразований образуют комбинированный датчик.

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента к которому чувствителен вторичный преобразователь.

Давление можно измерять с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину датчика, реагирующим на механическое смещение. Так мембрана электродинамического микрофона является первичным преобразователем, деформация которой, вызванная воздействием акустического давления, преобразуется в электрический сигнал.

## ГЛАВА 3 ШКАЛЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

### 3.1 Шкалы Кельвина, Рэнкина, градусы Цельсия и Фаренгейта

Шкала Цельсия получается из абсолютной шкалы Кельвина, если за нуль принять температуру замерзания воды. Градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) равен одному градусу Кельвина:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,16. \quad (3.1)$$

Шкала Фаренгейта получается смещением нуля абсолютной шкалы Рэнкина:

Единица измерения – градус Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ )-равен одному градусу Рэнкина

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(\text{R}) - 459,67. \quad (3.2)$$

Формулы перехода из одной шкалы к другой имеют вид:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32](5/9), \quad (3.3)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{C}) \times (9/5) + 32. \quad (3.4)$$

Для осуществления на практике точных измерений были выбраны три физические величины: сопротивление, электродвижущая сила (ЭДС) термопары, и излучение черного тела, являющихся функциями температуры, численное значение которых определяется в реперных точках.

В интервале температур от минус  $259,34^{\circ}\text{C}$  (тройная точка водорода) до температуры  $630,74^{\circ}\text{C}$  (точка затвердевания сурьмы) используется температурная зависимость сопротивления проволоки, изготовленной из чистой платины. В интервале температур от 0 до  $630,74^{\circ}\text{C}$  измеренное сопротивление  $R(T)$  выражается через температуру  $T^{\circ}\text{C}$  в виде:

$$R(T) = R_0 (1 + A T + B T^2) \quad (3.5)$$

где  $R_0$  – сопротивление при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , а значения  $A$  и  $B$  вычисляются по результатам измерений  $R$  при температурах кипения воды ( $100^{\circ}\text{C}$ ) и серы ( $444,6^{\circ}\text{C}$ ).

В диапазоне температур от минус  $259,39$  до  $0^{\circ}\text{C}$  температура

определяется из формулы:

$$R(T) = R_0 [1 + A T + B T^2 + C (T - 100) T^3], \quad (3.6)$$

где  $R_0$ ,  $A$ ,  $B$  – величины, определенные в предыдущем интервале, а  $C$  определяется по измеренному сопротивлению в точке кипения кислорода минус  $182,962$  °С

В интервале температур от  $630,74$  до  $1064,3$  °С (точка затвердевания золота) измеряется ЭДС термопары платинородий – платина, зависимость которой от температуры выражается:

$$e(T) = a + b T + c T^2, \quad (3.7)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяются по результатам измерения  $e$  при температурах затвердевания сурьмы ( $630,74$  °С), серебра ( $961,93$  °С) и золота ( $1064,43$  °С) в условиях когда температура нулевого спая равна  $0$  °С.

При температурах выше  $1064,43$  °С абсолютная температура определяется по интенсивности излучения  $L(T)$  черного тела на длине волны  $\lambda$ :

$$\frac{L(T)}{L(T_{Au})} = \frac{\exp\left(\frac{A}{\lambda T_{Au}} - 1\right)}{\exp\left(\frac{A}{\lambda T} - 1\right)}, \quad (3.8)$$

где  $L(T_{Au})$  – интенсивность излучения на длине волны  $\lambda$  при температуре плавления золота,  $A = 0,014388$  К м – константа. Интенсивность излучения измеряют с помощью монохроматического оптического пирометра.

### 3.2 Измеренная и измеряемые температуры

Температура  $T_c$ , измеренная с помощью резистора или термопары, фактически является температурой датчика. Она зависит от температуры  $T_x$  среды и от существующего теплообмена.

Наименьшая погрешность при измерении температуры достигается при условии, что тепловой поток от исследуемой среды существенно больше теплового потока от внешней среды. Инерционность датчика определяется постоянной времени запаздывания  $\tau$ . Равновесная температура устанавливается

тем быстрее, чем меньше теплоемкость датчика и чем выше тепловая проводимость между датчиком и исследуемой средой согласно теплового закона Ома:

$$P_{ab} = \lambda_{ab} ( T_a - T_b ) \quad (3.9)$$

где  $P_{ab}$  – тепловой поток между плоскостями  $a$  и  $b$  с температурами  $T_a$  и  $T_b$ ;  
 $\lambda_{ab}$  – тепловая проводимость.

Проводимость  $G_{ab}$  максимальна в случае датчика без защитной оболочки, однако такая конструкция используется редко, поскольку датчик необходимо защитить от химического воздействия паров, ударов и вибрации.

При измерении температуры внутри твердого тела датчик размещается в углублении, просверленном в твердом теле. Исходя из теплового закона Ома, необходимо чтобы глубина сверления была, по крайней мере, на порядок больше радиуса датчика, а для уменьшения теплового сопротивления зазор между внутренней поверхностью углубления и корпусом должен быть сведен к минимуму и заполнен материалом с высокой теплопроводностью.

При измерении температуры в жидкостях и газах необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на показания датчика, таких как свойства среды, скорость течения газа или жидкости, влияния излучения стенок объекта измерения. Теплообмен между датчиком и средой сильно зависит от параметров, характеризующих свойства среды – вязкости, теплопроводности и скорости – одновременно от времени запаздывания зонда, отличия его температуры от температуры среды и его саморазогрев в процессе измерений, например, в случае термометра сопротивления.

Трубопровод, по которому течет поток, обычно имеет температуру, отличную от температуры текущей среды. В связи с возникающими при этом радиальными градиентами температуры возникает задача о наилучшем расположении зонда в потоке; кроме того, в ряде случаев радиационный теплообмен между зондом и стенками канала может приводить к существенному изменению равновесной температуры зонда. Наконец, при больших скоростях течения в жидкостях может происходить нагрев зонда

вследствие трения, а в газах – нагрев вследствие сжатия газа перед препятствием, которое представляет собой зонд.

Поэтому в каждом конкретном случае необходимо производить оценку погрешностей измерения и вводить необходимые корректировки.

В микроэлектронике для оценки способности конструкции отводить тепло от активной области кристалла, используя следующие формулы для определения теплового сопротивления:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (3.10)$$

где  $P_e$  – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;

$T_1, T_2$  – значения температуры двух тел или тела и среды ( $T_1$  более высокая температура, чем  $T_2$ );

$R_t$  – тепловое сопротивление.

Для слоистой структуры тепловое сопротивление каждого слоя приближённо оценивается по формуле:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (3.11)$$

где  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

$\lambda$  – теплопроводность вещества (Вт/м·К).

## ГЛАВА 4. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

### 4.1. Стекланные жидкостные термометры

Принцип действия стекланных жидкостных термометров основан на расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре, при увеличении температуры. Стекланные термометры по своей конструкции бывают палочные и с вложенной шкалой.

*Стекланный термометр с вложенной шкалой*, состоит из стеклнного резервуара 1 и припаянного к нему стеклнного капилляра 2 (рис. 3, а). Вдоль капилляра расположена шкала 3, которая, как правило, наносится на пластине молочного стекла. Резервуар, капилляр и шкала помещаются в стеклнную оболочку 4, которая припаивается к резервуару.

*Палочные стеклнные термометры* изготавливаются из толстостенных капилляров 1, к которым припаивается резервуар 2. Шкала термометра 3 наносится на наружной поверхности капилляра (рис. 3, б). Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар и часть капилляра, определяется по положению уровня жидкости в капилляре, которое отградуировано в градусах Цельсия. В связи с тем, что одновременно с расширением термометрической жидкости происходит также расширение резервуара и капилляра, фактически мы судим о температуре не по изменению объема жидкости, а по видимому изменению границы термометрической жидкости в стекле. Поэтому видимое расширение жидкости несколько меньше действительного. В табл. 4 приведены некоторые термометрические жидкости. Среди жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные стеклнные термометры. Химически чистая ртуть как термометрическое вещество имеет ряд достоинств: она остается жидкостью в широком интервале температур, не смачивает стекло, легко может быть получена в чистом виде. Однако ртуть имеет относительно малый температурный коэффициент объемного расширения, что требует изготовления термометров с тонкими капиллярами. Нижний предел измерения ртутных

термометров минус  $35^{\circ}\text{C}$  определяется температурой затвердевания ртути. Верхний предел измерения  $+600^{\circ}\text{C}$  определяется прочностными характеристиками стекла. В связи с тем, что температура кипения ртути при атмосферном давлении значительно меньше верхнего предела применения ртутных термометров, в термометрах, предназначенных для измерения высоких температур, капилляр над ртутью заполняется инертным газом, например азотом. При этом для исключения образования паров ртути в капилляре давление газа должно быть тем больше, чем выше верхний предел измерения. Для термометров с верхним пределом измерения  $600^{\circ}\text{C}$  давление газа над ртутью превышает 3 МПа ( $30 \text{ кгс/см}^2$ ). Стеклообразные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале температур от минус  $200^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Однако, эти жидкости смачивают стекло, и поэтому требуют применения капилляров с относительно большим диаметром канала.

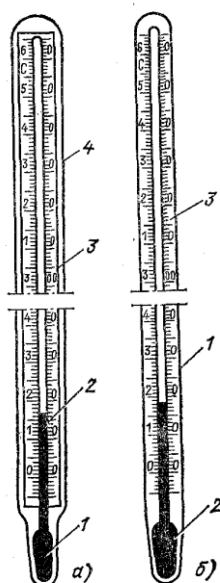


Рисунок 3. Лабораторные ртутные термометры:

а — палочный; б — с вложенной шкалой

К достоинствам стеклянных жидкостных термометров относятся высокая точность измерения, простота и дешевизна. Недостатками стеклянных термометров являются относительно плохая видимость шкалы, практическая

невозможность передачи показаний на расстояние и, следовательно, невозможность автоматической регистрации показаний, а также невозможность ремонта термометров.

В зависимости от области применения по методике градуировки термометры делятся на две группы: термометры, градуируемые при полном погружении, и термометры, градуируемые при неполном погружении (как правило, при определенной длине погружения нижней части). Термометры первой группы применяются, как правило, в лабораторных условиях и позволяют обеспечить более высокую точность. Глубина их погружения должна изменяться при изменении температуры.

Таблица 4. Термометрические жидкости

	Средняя температура, °С		Пределы применения, °С		Средний температурный коэффициент объемного расширения, $10^5 \text{ К}^{-1}$	
	затвердевания	кипения	нижний	верхний	действительный	видимый
Ртуть	-38,9	356,6	-35	600	18	16
Толуол	-97,2	109,8	-90	200	109	107
Этиловый спирт	-114,5	78,0	-80	70	105	103
Керосин	-	До 325	-60	200	95	93
Петролейный эфир	-	До 70	- 120	25	152	150
Пентэн	-200	36	-200	20	92	90

Термометры второй группы – технические – применяются для измерения температур в промышленности; глубина их погружения должна быть постоянной. В связи с этим конструктивно технические термометры выполнены таким образом, что диаметр их нижней («хвостовой») части существенно меньше диаметра их верхней части, в которой расположена шкала. Эти термометры погружаются в измеряемую среду на глубину нижней части. Различие в градуировке и применении стеклянных термометров вызвано тем, что при измерении температуры могут иметь место систематические погрешности, характерные для данного средства измерения. Одной из них является погрешность за счет выступающего столбика термометра. Если



термометр градуировался при полном его погружении в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки, а на практике он не был погружен до этой отметки, и часть столбика термометрического вещества находилась вне измеряемой среды, выступала из нее, то может иметь место погрешность за счет выступающего столбика. Эта погрешность существует, когда температура выступающей части столбика термометрической жидкости и части, погруженной в измеряемую среду, будет различной, а значит, будет различным и расширение погруженной и выступающей частей жидкости. Поправка на выступающий столбик к показаниям термометра может быть определена в градусах из выражения

$$\delta(t) = n \times \gamma(t - t_{в.с}), \quad (4.1)$$

где  $n$  – число градусов в выступающем столбике, °С;

$\gamma$  – видимый температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле,  $K^{-1}(C^{-1})$ ;

$t$  – температура, показываемая термометром, °С;

$t_{в.с}$  – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, °С.

Аналогичная погрешность может иметь место и у технических термометров, которые обычно градуируются при погружении всей нижней части, если температура выступающей части существенно отличается от ее температуры при градуировке термометра. В этом случае поправка определяется из выражения

$$\delta(t) = n \times \gamma(t_{в.с.град} - t_{в.с}), \quad (4.2)$$

где  $t_{в.с.град}$  – температура выступающего столбика при градуировке, °С.

Следует отметить, что погрешность за счет выступающего столбика у ртути примерно на порядок меньше, чем у органических термометрических жидкостей, за счет существенного различия значений температурного коэффициента расширения.

Другой погрешностью, характерной для стеклянных термометров расширения, является смещение нулевой точки термометра. Это смещение

наблюдается после нагрева термометра до температур, близких к верхнему пределу измерения. При последующем охлаждении термометра до  $0^{\circ}\text{C}$  стеклянный капилляр не сразу приобретает те же размеры, которые он имел до нагревания. Поэтому ртуть, объем которой стал равен первоначальному, будет расположена в капилляре, сечение которого еще не уменьшилось до первоначального – несколько ниже отметки  $0^{\circ}\text{C}$ . Это смещение нулевой точки термометра может достигать у технических термометров со шкалой  $0\div 600^{\circ}\text{C}$  значения  $3^{\circ}\text{C}$ . У термометров с меньшим верхним пределом измерения это смещение меньше.

В настоящее время выпускаются следующие разновидности стеклянных термометров.

1. Технические ртутные термометры с вложенной шкалой прямые (рис. 4, а) и угловые (рис. 4, б), выпускаются 11 модификаций со шкалами:  $-90\div +30$ ;  $-60\div +50$ ;  $-30\div +50$ ;  $0\div 100$ ;  $0\div 160$ ;  $0\div 200$ ;  $0\div 300$ ;  $0\div 350$ ;  $0\div 450$ ;  $0\div 500$  и  $0\div 600^{\circ}\text{C}$ . Цена деления шкалы составляет от  $0,5^{\circ}\text{C}$  (шкала  $-30\div +50^{\circ}\text{C}$ ) до 5 и  $10^{\circ}\text{C}$  (шкала  $0\div 600^{\circ}\text{C}$ ).

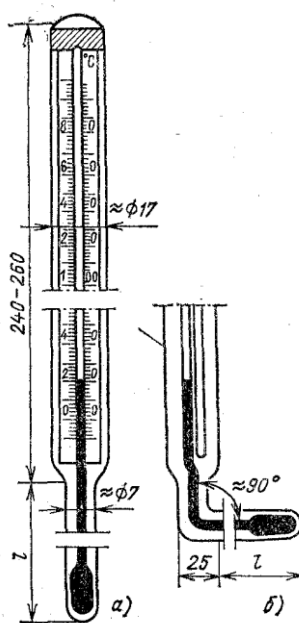


Рисунок 4. Технические стеклянные термометры  
а-прямой; б – угловой

2. *Лабораторные ртутные термометры палочные* (рис. 3,б) и с вложенной шкалой (рис. 3, а) предназначены для измерения температур от – 30 до + 600°C. Эти термометры погружаются в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Термометры подразделяются на четыре группы. Термометры с ценой деления 0,1°C имеют диапазон измерения 55 °С (например, 0÷55 °С или 200÷ 255°C) с верхним пределом измерения не более 305°C. Для больших диапазонов измерения 0÷500 °С, 0÷600°C цена деления шкалы 2°C.

3. *Жидкостные (не ртутные) термометры* (ГОСТ 9177-74) выпускаются палочные, с вложенной шкалой и с наружной шкальной пластиной на пределы измерения от – 200 до +200°C с ценой деления от 0,2 до 5°C.

4. *Термометры ртутные повышенной точности и образцовые* (ГОСТ 13646-68) выпускаются с узкими диапазонами измерения (от 4 до 50 °С) и с ценой деления от 0,01 до 0,1 °С.

5. *Термометры ртутные электроконтактные* (ГОСТ 9871-75) выпускаются для поддержания постоянной температуры или сигнализации заданной температуры в интервале от – 30 до + 300°C. Термометры выпускаются с постоянным рабочим и с подвижным рабочим контактами, которые могут быть установлены на любом значении температуры в пределах шкалы.

6. *Специальные термометры:* медицинские (максимальные), метеорологические (максимальные, минимальные, психрометрические, почвенные и др.) и другого назначения.

Допускаемые погрешности технических термометров не должны превышать деления шкалы. Например, при цене деления 0,5°C предел допускаемой погрешности составляет  $\pm 0,5$  °С, а при цене деления 10°C предел составляет  $\pm 10$ °С. Для других разновидностей термометров пределы допускаемых погрешностей определяются техническими требованиями, причем они могут быть больше цены деления. Например, для лабораторных термометров с ценой деления 0,5°C предел допускаемой погрешности

составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$ , а для образцовых термометров с ценой деления  $0,01^\circ\text{C}$  предел допускаемой погрешности составляет  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

Стеклянные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры.

#### 4.2 Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры.

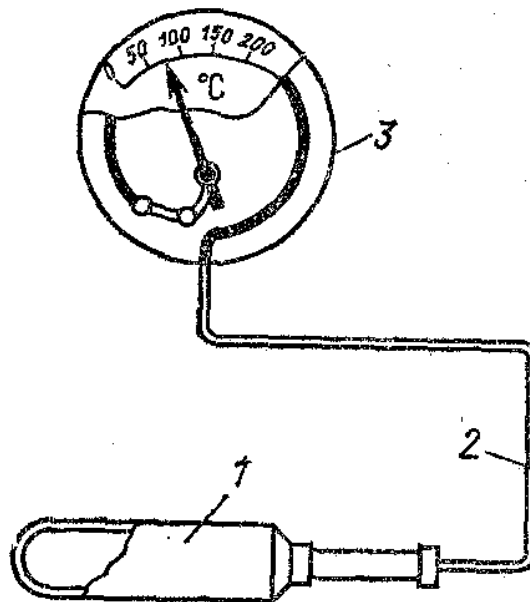


Рисунок 5. Манометрический термометр

Термосистема манометрического термометра (рис. 5) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный конец пружины соединен со стрелкой измерительного прибора 3.

Манометрические термометры в зависимости от вида рабочего (термометрического) вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные. Манометрические термометры изготавливаются для измерения температур от  $-200$  до  $+600^\circ\text{C}$ , конкретные

диапазоны измерения определяются заполнителем термосистемы. Термометры со специальным заполнителем применяются для измерения температур от 100 до 1000°С (ГОСТ 8624-80). Термобаллон термометра погружается в измеряемую среду, и рабочее вещество, находящееся в термобаллоне, принимает температуру измеряемой среды. При этом в термосистеме устанавливается давление, определяемое температурой измеряемой среды. При повышении температуры давление повышается, при уменьшении температуры понижается. Изменение давления рабочего вещества через гибкий капилляр передается на измерительный прибор, являющийся частью манометрического термометра. Измерительный прибор является пружинным манометром, рассчитанным на те диапазоны измерения давления, которые имеют место в термосистемах манометрических термометров.

*Газовые манометрические термометры* предназначены для измерения температуры от - 200 до +600 °С. В качестве рабочего вещества в газовых термометрах применяется азот. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме описывается линейным уравнением

$$p_t = p_0(1 + \beta t), \quad (4.3)$$

где  $p_t$  и  $p_0$  – давление газа при температурах 0 и  $t$ °С;

$\beta$  – температурный коэффициент расширения газа,  $\beta = 1/273$  или  $0,00366 \text{ K}^{-1}$ .

Уравнение шкалы газового манометрического термометра будет также линейным:

$$p_k - p_n = p_n \times \frac{\beta \times (t_k - t_n)}{1 + \beta t_n}, \quad (4.4)$$

где  $p_n$  и  $p_k$  – давление газа при температурах, соответствующих началу  $t_n$  и концу  $t_k$  шкалы термометра.

В связи с тем, что при изменении температуры за счет теплового расширения изменяется объем термобаллона, а также изменяется с давлением внутренний объем манометрической пружины, объем термосистемы не постоянен. Поэтому реальное уравнение шкалы несколько отличается от

линейного уравнения (4.4). Однако это отклонение незначительно и можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров являются равномерными. Диапазон изменения рабочего давления в термосистеме может быть увеличен путем увеличения начального давления азота в термосистеме. Это позволяет унифицировать манометрические пружины, а также уменьшает барометрическую погрешность манометрического термометра. Пружинные манометры измеряют избыточное давление, и поэтому изменение барометрического давления может вызвать изменение их показаний. Если измеряемое давление будет значительным, то колебания барометрического давления практически не будут влиять на показания прибора. Изменение температуры окружающего воздуха будет влиять на расширение рабочего вещества в капилляре и манометрической пружине, что будет вызывать изменение давления в термосистеме и соответствующее изменение показаний термометра. Для уменьшения этого влияния стремятся уменьшить отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона. Для этого увеличивают длину термобаллона или его диаметр. Длина термобаллона газового манометрического термометра не должна превышать 400 мм, а диаметр термобаллона выбирается из ряда 5, 8, 10, 12, 16, 20, 25 и 30 мм (ГОСТ 8624-80). Длина капилляра может составлять от 0,6 до 60 м. Для уменьшения температурной погрешности в некоторых измерительных приборах внутри устанавливают термокомпенсаторы. Специально изготовленные газовые манометрические термометры могут применяться и для измерения температур более низких, чем  $0^{\circ}\text{C}$ . Например, водородный газовый термометр может применяться до минус  $250^{\circ}\text{C}$ , а гелиевый – до минус  $267^{\circ}\text{C}$ .

*Жидкостные манометрические термометры* предназначены для измерения температуры от минус  $150$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ . В качестве рабочего вещества, заполняющего термосистему, применяют ртуть, пропиловый спирт, метаксиллол и другие жидкости. Рабочее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо. Поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры на величину,

соответствующую диапозону измерения, вызовет такое увеличение давления в термосистеме, при котором манометрическая пружина изменит свой внутренний объем на величину изменения объема жидкости. Давление, при котором это будет иметь место, зависит от жесткости пружины и для различных манометрических пружин может быть различным. В жидкостных манометрических термометрах погрешность, вызванная изменением барометрического давления, как правило, отсутствует, так как давление в системе значительно. Погрешность, вызываемая изменением температуры окружающей среды, имеет место и в жидкостных манометрических термометрах. Для ее уменьшения применяют те же способы, что и в газовых манометрических термометрах: уменьшают относительный объем жидкости, находящейся при температуре окружающей среды, уменьшая внутренний объем термокапилляра и пружины, или внутрь измерительного прибора встраивают специальные термокомпенсаторы погрешности.

В жидкостных манометрических термометрах может иметь место гидростатическая погрешность, возникающая при различных уровнях расположения термобаллона и измерительного прибора. Для снижения возможных гидростатических погрешностей длину капилляра уменьшают до 10 м. Допускаемые расстояния по высоте между термобаллоном и измерительным прибором указываются в инструкциях к приборам.

*Конденсационные манометрические термометры* предназначены для измерения температур от - 50 до +300 °С. Термобаллон термометра, примерно на  $\frac{3}{4}$ , заполнен низкокипящей жидкостью, а оставшая часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар. В качестве рабочей жидкости применяются фреон-22, пропилен, хлористый метил, ацетон и этилбензол. Капилляр и манометрическая пружина заполняются, как правило, другой жидкостью. Давление в термосистеме конденсационного манометрического термометра будет равно давлению насыщенного пара рабочей жидкости, определяемому в свою очередь

температурой, при которой находится рабочая жидкость, т. е. температурой измеряемой среды, с помещенным в нее термобаллоном. Эта зависимость давления насыщения пара от температуры имеет нелинейный вид, она однозначная, когда измеряемая температура не превышает критическую. В связи с тем, что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, на показания термометра не будет оказывать влияние температура окружающей среды. Практически небольшая погрешность за счет механизма передачи внутри манометра будет иметь место, но сам принцип измерения обеспечивает независимость от температуры окружающей среды. Гидростатическая погрешность вызывается разностью высот расположения термобаллона и измерительного прибора, причем эта погрешность будет зависеть от показаний прибора: в начале шкалы она будет больше, а в конце – меньше. Длина капилляра для уменьшения этой погрешности не превышает 25 м. Барометрическая погрешность у конденсационных манометрических термометров может иметь место на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. В остальных случаях влияние давления будет пренебрежимо мало. Специально изготовленные конденсационные манометрические термометры применяются для измерения сверхнизких температур. Конденсационные термометры, заполненные гелием, используются для измерения температур от 0,8 К. Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью дистанционной передачи показаний и автоматической записи. Одним из важных преимуществ является возможность их использования в пожаро-и взрывоопасных помещениях. К недостаткам относится трудность ремонта при разгерметизации системы, ограниченное расстояние дистанционной передачи показаний и во многих случаях большие размеры термобаллона. Газовые и жидкостные манометрические термометры имеют класс точности 1; 1,5 и 2,5, конденсационные – 1,5; 2,5 и 4.



## ГЛАВА 5 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

### 5.1. Основы теории, термоэлектрические цепи

Применение термоэлектрических термометров для измерения температуры основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры. Термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников при неравенстве температур в местах соединения этих проводников (рис. 5.1).

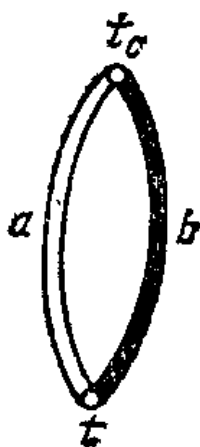


Рисунок 6. Термоэлектрическая цепь

Современная физика объясняет термоэлектрические явления следующим образом. С одной стороны, вследствие различия уровней Ферми у различных металлов при их соприкосновении возникает контактная разность потенциалов. С другой стороны, концентрация свободных электронов в металле зависит от температуры. При наличии разности температур в проводнике возникает диффузия электронов, приводящая к образованию электрического поля. Таким образом, термоэлектродвижущая сила складывается из суммы скачков потенциала в контактах (спаях) термопары и суммы изменений потенциала, вызванных диффузией электронов, и зависит от рода проводников и их температуры.

Если в цепи (рис. 6) температуры мест соединения проводников  $a$  и  $b$  будут одинаковы и равны  $t$ , то и разности потенциалов будут равны по

значению, но иметь разные знаки:

$$e_{ab}(t) = -e_{ba}(t), \quad (5.1)$$

а суммарная термо-ЭДС и ток в цепи будут равны нулю:

$$E_{ab}(t,t) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t) = 0. \quad (5.2)$$

Если  $t \neq t_0$ , то суммарная термо-ЭДС не равна нулю:

$$E_{ab}(t,t) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0) \neq 0, \quad (5.3)$$

так как разности потенциалов для одних и тех же проводников при разных температурах не равны:  $e_{ab}(t) \neq e_{ab}(t_0)$ .

Результирующая термо-ЭДС (5.3) зависит для данных проводников  $a$  и  $b$  от температур  $t$  и  $t_0$ . Чтобы получить однозначную зависимость термо-ЭДС от измеряемой температуры  $t$ , необходимо другую температуру  $t_0$  поддерживать постоянной.

Для измерения термо-ЭДС в цепь термоэлектрического термометра включают измерительный прибор, причем его включение вводит в цепь по крайней мере еще один, третий проводник.

Для того чтобы выяснить, как влияет включение в цепь термоэлектрического термометра третьего проводника, рассмотрим цепь, составленную из трех различных проводников  $a, b, c$  (рис. 7,а).

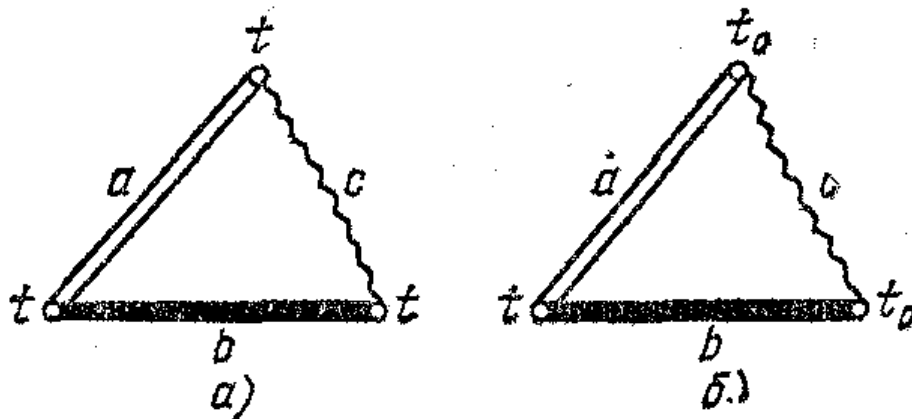


Рисунок 7. Включение третьего проводника в цепь термопары

Термо-ЭДС такой цепи при равенстве температур всех мест соединения равна

$$E_{abc}(t) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t) + e_{ca}(t) = 0 \quad (5.4)$$

или

$$e_{ab}(t) = -e_{bc}(t) - e_{ca}(t). \quad (5.5)$$

Рассмотрим термоэлектрическую цепь, состоящую из трех проводников, для случая, когда температура мест подсоединения третьего проводника  $c$  не равна измеряемой температуре (рис. 5.2, б):

$$E_{abc}(t, t_0) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0). \quad (5.6)$$

Из (5.4) следует, что:

$$e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0) = -e_{ab}(t_0). \quad (5.7)$$

Тогда (5.4) можно записать так:

$$E(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0), \quad (5.8)$$

т. е. термо-ЭДС цепи, составленной из трех разнородных проводников, не отличается от термо-ЭДС цепи, составленной из двух проводников (5.3), если температура мест подсоединения третьего проводника равна. Из закономерностей включения третьего проводника можно сделать следующие выводы:

✓ включение одного, двух или нескольких проводников в цепь термоэлектрического термометра не вызовет искажения термо-ЭДС термометра, если места подсоединения каждого из этих проводников будут иметь одинаковую температуру;

✓ рабочий конец термоэлектрического термометра можно изготавливать путем сварки или пайки, если температура во всех точках спая будет одинакова.

На основании особенностей включения третьего проводника в цепь термоэлектрического термометра могут быть использованы два варианта включения измерительного прибора (ИП) в цепь термоэлектрического термометра: в разрыв электрода (рис. 8, а) и в разрыв спая (рис. 8, б).

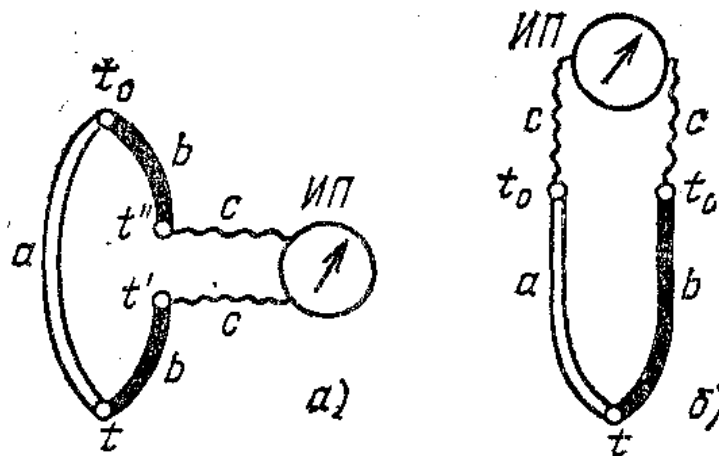


Рисунок 8. Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра

В первом случае измеряемая температура (температура рабочего конца) будет  $t$ , температура свободных концов, поддерживаемая постоянной,  $t_0$  и температуры мест подсоединения третьего проводника с измерительным прибором  $t_1'$  и  $t_1''$ . Чтобы не было искажения развиваемой термо-ЭДС, температуры  $t_1'$  и  $t_1''$  должны быть равны:  $t_1' = t_1''$ , а температура свободных концов  $t_0 = const$ . Во втором случае третий проводник с измерительным прибором включается в разрыв свободных концов, поэтому места подсоединения третьего проводника одновременно являются свободными концами термоэлектрического термометра. Эти температуры должны быть одинаковы, как концы третьего проводника, и постоянны, как свободные концы. Если выполнены эти условия, то включение измерительного прибора не искажает термо-ЭДС термометра.

Для измерения температуры термоэлектрическим термометром необходимо измерить термо-ЭДС, развиваемую термометром, и температуру свободных концов. Если температура свободных концов термометра при измерении температуры равна  $0^\circ\text{C}$ , то измеряемая температура определяется сразу из градуировочной характеристики (таблиц, графиков) (рис. 9), устанавливающей зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего спая.

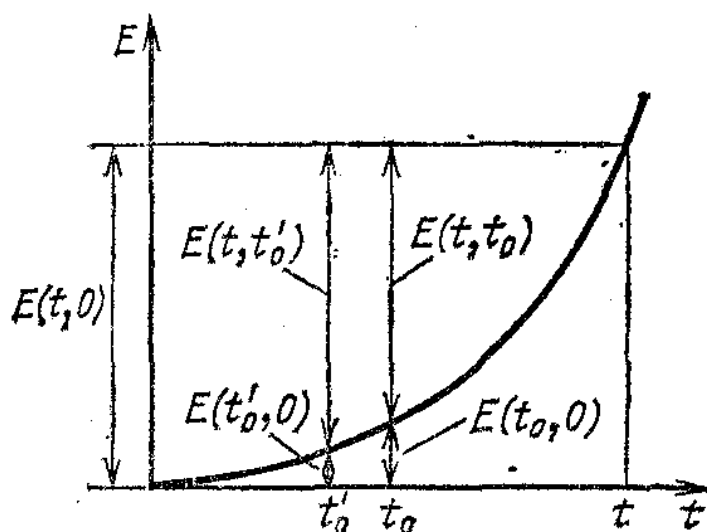


Рисунок 10. Введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра

Градуировочные характеристики термоэлектрических термометров определены, как правило, при температуре свободных концов, равной  $0^{\circ}\text{C}$ . Если температура свободных концов на практике отличается от  $0^{\circ}\text{C}$ , но остается постоянной, то для определения температуры рабочего конца по градуировочной характеристике необходимо знать не только термо-ЭДС, развиваемую термометром, но и температуру свободных концов  $t_0$ . Чтобы ввести поправку на температуру свободных концов  $t_0$ , если  $t_0 \neq 0$ , необходимо к термо-ЭДС, развиваемой термоэлектрическим термометром  $E(t, t_0)$ , прибавить  $E(t_0, 0)$ , чтобы получить значение термо-ЭДС  $E(t, 0)$ :

$$E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 0). \quad (5.9)$$

Такую термо-ЭДС  $E(t, 0)$  развивает термоэлектрический термометр при температуре рабочего спая  $t$  и температуре свободных концов  $0^{\circ}\text{C}$ , т. е. при условиях градуировки.

Если в процессе измерения температура свободных концов примет какое-то новое значение  $t'_0$ , то термо-ЭДС, развиваемая термометром, будет  $E(t, t'_0)$  (рис. 10) и величина поправки на температуру свободных концов будет  $E(t'_0, 0)$ , а термо-ЭДС, соответствующая условиям градуировки

$$E(t, t'_0) + E(t'_0, 0) = E(t, 0). \quad (5.10)$$

Значение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра зависит от градуировочной характеристики термометра, определяемой материалами проводников, из которых изготовлен термоэлектрический термометр. Независимо от способа введения поправки (расчетного или автоматического), методика введения поправки остается неизменной: определяется расчетным путем или автоматически в схеме получаемы значение  $E(t_0, 0)$ , которое затем суммируется с термо-ЭДС термопары. Суммарная термо-ЭДС  $E(t, 0)$  соответствует градуировочному значению.

Для решения отдельных задач измерений температуры применяют различные способы соединения термоэлектрических термометров. Наиболее распространенные из них — термобатарей и дифференциальная термопара. Для увеличения коэффициента преобразования термоэлектрического термометра применяют последовательное включение нескольких термопар (термобатарей) (рис. 11).

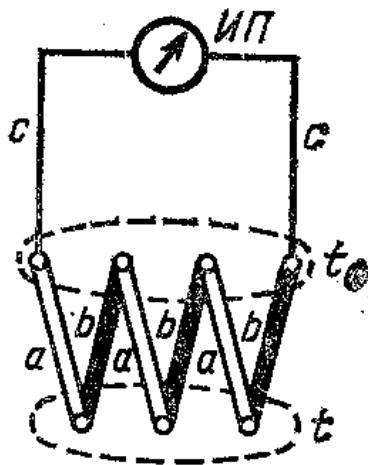


Рисунок 11. Термобатарей

При этом термо-ЭДС, развиваемая термопарами, суммируется, т. е. термо-ЭДС термобатарей, состоящей из  $n$  термопар, в  $n$  раз больше термо-ЭДС отдельной термопары. Такое включение применяют для измерений при малых разностях температур рабочего  $t$  и свободного  $t_0$  концов. Однако, как правило, температуры в различных точках расположения рабочих и свободных концов

не совсем одинаковы вследствие неоднородности температурных полей. Поэтому термобатарея, увеличивая термо-ЭДС термометра, позволяет уменьшить погрешность измерения термо-ЭДС, но не повышает существенно точности измерения температуры.

В некоторых случаях возникает необходимость измерения разности температур в двух точках. Для этого располагают рабочий спай термопары в одной из точек, а свободные концы – в другой точке (рис. 12).

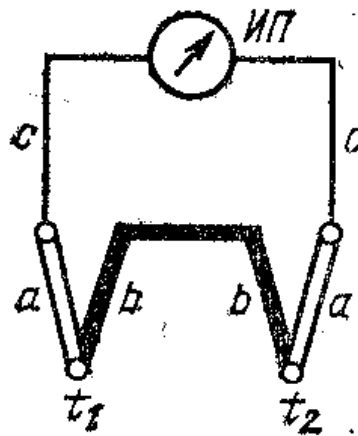


Рисунок 12. Дифференциальный термоэлектрический термометр

В этом случае термо-ЭДС, развиваемая термометром, будет определяться температурами рабочего спая  $t_1$  и свободных концов  $t_2$ :

$$E(t_1, t_2) = e(t_1) - e(t_2). \quad (5.11)$$

Если в интервале температур  $t_1 \div t_2$  зависимость термо-ЭДС от температуры может быть аппроксимирована линейной зависимостью, то уравнение (5.1) примет вид:

$$E(t_1, t_2) = k(t_1 - t_2). \quad (5.12)$$

Такая линейная аппроксимация обычно справедлива для любой термопары при разности температур, не превышающей 20 – 25 °С.

## 5.2. Устройство термоэлектрических термометров и применяемые материалы

К материалам, используемым для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляется целый ряд требований: жаростойкость, жаропрочность, химическая стойкость, воспроизводимость, стабильность, однозначность и линейность градуировочной характеристики, и ряд других. Среди них есть обязательные и желательные требования.

К числу *обязательных требований* относятся стабильность градуировочной характеристики и (для стандартных термометров) воспроизводимость в необходимых количествах материалов, обладающих вполне определенными термоэлектрическими свойствами. Все остальные требования являются *желательными*. Например, могут быть жаропрочные материалы, воспроизводимые с однозначной и линейной градуировочной характеристикой и высоким коэффициентом преобразования. Но если градуировочная характеристика этих материалов нестабильна, то измерять таким термометром нельзя. С другой стороны, материалы, имеющие низкий коэффициент преобразования, нелинейную градуировочную характеристику, но имеющие стабильную характеристику, используются для термоэлектрических термометров.

В соответствии со стандартами СЭВ (СТ СЭВ 1059-78) будут применяться следующие стандартные термоэлектрические термометры, характеристики которых приведены в табл. 5 и 6.

*Медь-копелевые и медь-медноникелевые типа T* (близкие к медь-константановым) термоэлектрические термометры применяются главным образом для измерения низких температур в промышленности и лабораторной практике. Применение этих термометров для температур менее  $-200^{\circ}\text{C}$  осложняется существенным уменьшением коэффициента преобразования с уменьшением температуры. При температурах свыше  $400^{\circ}\text{C}$  начинается интенсивное окисление меди, что ограничивает применение термометров этих типов.



Железо-медноникелевые, близкие к железо-константовым термоэлектрическим термометры типа *J* применяются в широком диапазоне температур от – 200 до +700°C, а кратковременно – 200 и до 900 °С. Они имеют достаточно большой коэффициент преобразования (около 55 мкВ/°С).

Таблица 5. Стандартные термоэлектрические термометры

Тип термопары термоэлектрического термометра	Обозначение новое (старое)	Рабочий диапазон длительного режима работы, °С	Максимальная температура кратковременного режима работы, °С
Медь-копелевая	$\bar{—}$	–200 ÷ +100	—
Медь-медноникелевая	<i>T</i>	–200 ÷ +400	—
Железо-медноникелевая	<i>J</i>	–200 ÷ +700	9 00
Хромель-копелевая	(ХК)	–50 ÷ +600	800
Никельхром-медноникелевая	<i>E</i>	–100 ÷ +700	900
Никельхром-никельалюминиевая (хромель-алюмелевая)	К (ХА)	–200 ÷ +1000	1300
Платинородий (10 %) -платиновая	S (ПП)	0 ÷ +1300	1600
Платинородий (30 %) -платинородиевая (6 %)	В (ПР)	300 ÷ 1600	1800
Вольфрамрений (5 %) -вольфрамрениевая (20 %)	(ВР)	0 ÷ —2200	2500

Верхний предел измерения ограничен окислением железа и медноникелевого сплава. Хромель-копелевые термоэлектрические термометры обладают наибольшим коэффициентом преобразования из всех стандартных термометров (около 70 ÷ 90 мкВ/°С). Для термометров с термоэлектродами диаметром менее 1 мм верхний предел длительного применения менее 600°C и составляет, например, для термоэлектродов диаметром 0,2 ÷ 0,3 мм только 400°C. Верхний предел применения определяется стабильностью характеристик копелевого термоэлектрода.

Таблица 6. Значения термоэлектродвижущей силы стандартных термопар при  $t_a=0^\circ\text{C}$

Термо-ЭДС, мВ									
Температура	Медь-копелевая	Медь-медноникелевая, тип Т	Железо-медноникелевая, тип J	Хромель-копелевая (ХК)	Никельхром-медноникелевая, тип E	Никельхром-никельалюминиевая (хромель-альмелевая), тип К (ХА)	Платинородий (10%)-платиновая, тип S(ПП)	Платинородий (30%)-платинородиевая (6%), тип В(ПР)	Вольфрам рений(5%)-вольфрамрениевая(20%), (ВР)
-200	-6,153	-5,603	-7,890		-8,8240	-5,892			
100	-3,715	-3,378	-4,632		-8,237	3,553			
0	0	0	0	0	0	0			
100 200	4,721	4,277	5,268	6,88	6,317	0	0,645	0,431	1,330
300		9,28В	10,777	14,59	13,419	4,095	1,440		2,869
		14,860	16,325	22,88	21,033	8,137	2,323		4,519
						12,207			
400 500		20,869	21,846	.31 49	28,943	16,395	3,260	0,786	6,209
600 700			27,388	40,28	36,999	20,640	4,234	1,241	7,909
800 900			33,096	49,11	45,085	24,902	5,237	1,791	9,598
			39,130	57,85	53,110	29,128	6,274	2,430	11,273
			45,498	66,47	61,022	33,277	7,345	3,154	12,929
			51 ,875		68,783	37,325	8,448	3,957	14,556
1000						41 ,269	9,585	4,833	16,136
1100						45,108	10,754	5,777	17,666
1200						48,828	11,947	6,783	19,146
1300						52,398	13,155	7,845	20,576
1400							14,368	8,9.52	21,963
1500							15,576	10,094	23,303
1600							16,771	11,257	24,590
1700								12,246	25,820
1800								13,585	26,999
2000									29,177
2200									31,136
2500									33,636

*Никельхром-медноникелевые (тип E)*, близкие к хромель-константановым, и *никельхром-никельалюминиевые (тип K)* термометры, ранее называемые *хромель-альмелевыми*, применяются для измерения температуры различных сред в широком интервале температур. Термоэлектрод из никель-алюминиевой проволоки менее устойчив к окислению, чем никельхромовый. Верхние пределы применения зависят от диаметра термоэлектродов. Для

термоэлектродов диаметром 3 ÷ 5 мм верхний предел длительного применения никельхром - никельалюминиевых термометров составляет 1000°C, а для диаметра 0,2 ÷ 0,3 мм – не более 600 °С. Для никельхром-медноникелевой термопары он не превышает 700°C.

Все вышеперечисленные термоэлектрические термометры из неблагородных материалов хорошо стоят в инертной и восстановительной атмосфере, в окислительной атмосфере их срок службы ограничен. Кроме того, термоэлектрические термометры хромель-копелевые и никельхром-никель-алюминиевые (хромель-алюмелевые) отличаются достаточно высокой стабильностью градуировочной характеристики при высокой интенсивности ионизирующих излучений.

Таблица 7. Коэффициенты для определения пределов допускаемых отклонений термо-ЭДС термопар

Тип термопары	Класс точности	Рабочий диапазон, °С	$a, ^\circ\text{C}$	$b \times 10^3$	$c, ^\circ\text{C}$
Медь-копелевая	—	—200 ÷ 0 0—100	1,3	—1,1 0	0 0
Медь-медноникелевая	—	—200 ÷ — 100 —100 ÷ 400	3	—20 0	—100 0
Железо-медноникелевая	—	—200 ÷ — 100 —100 ÷ 400 400 ÷ 900	3	—20 0 7,5	—100 0 400
Хромель-копелевая	—	—50 ÷ 300 300 — 800	2,5	0 6,0	0 300
Никельхром-медноникелевая	—	—100 ÷ 400 400 — 900	4	0 7,5	0 400
Никельхром-никельалюминиевая	—	—200 ÷ — 100 —100 ÷ 400 400— 1300	4	—10 0 7,5	—100 0 400
Платинородий (10 %) - платиновая	1	0 — 300 300 — 1600	1,5	0 2	0 300
	2	0 — 600 600 — 1600	3	0 5	0 600
Шатинородий (30 %)-платикородиевая (6 %)	—	300 — 600 600—1800	3	0 5	0 600
Больфрамрений (5 %)-вольфрам-рениевая (20 %)	—	0—1000 1000—1800 1800 — 2500	5 10	0 6,0 11,5	0 1000 1800

*Платинородий-платиновые* термоэлектрические термометры (тип S)

могут длительно работать в интервале температур от 0 до 1300°C, а кратковременно — до 1600 °С. Положительный термоэлектрод представляет собой сплав, состоящий на 10 % из родия и на 90 % из платины, отрицательный термоэлектрод состоит из чистой платины. Эти термометры сохраняют стабильность градуировочной характеристики в окислительной и нейтральной средах. В восстановительной атмосфере платинородий-платиновые термометры работать не могут, так как происходит существенное изменение термо-ЭДС термометра. Так же неблагоприятно воздействует на платинородий-платиновые термометры контакт с углеродом, парами металлов, соединениями углерода и кремния, а также рядом других материалов, загрязняющих термоэлектроды. Следует отметить, что градуировочная характеристика типа S не совпадает с градуировочной характеристикой ПП; применявшейся ранее.

*Платинородий-платинородиевые* термоэлектрические термометры (тип В) применяются длительно в интервале температур от 300 до 1600 °С, кратковременно— до 1800 °С. Положительный электрод — сплав из 30 % родия и 70 % платины, а отрицательный — из 6 % родия и 94 % платины. Эти термометры отличаются большей стабильностью градуировочной характеристики, чем платинородий-платиновые, но они также плохо работает в восстановительной среде. В связи с тем что термо-ЭДС, развиваемая платинородий-латинородиевыми термометрами в интервале температур 0 ÷ 100°C, незначительна, при технических измерениях их можно применять без термостатирования свободных концов. Например, если температура свободных концов 70°C и поправка на нее не вводится, то при температуре рабочего спая 1600 °С это вызовет погрешность около 2,1 °С. Градуировочная характеристика типа В также не совпадает с градуировочной характеристикой ПР.

*Вольфрамрений* - *вольфрамрениевые* термоэлектрические термометры предназначены для длительного измерения температур от 0 до 2200°C и кратковременно до 2500°C в вакууме, в нейтральной и восстановительной средах. Положительный термоэлектрод – сплав из 95 % вольфрама и 5 % рения, отрицательный – сплав из 80 % вольфрама и 20 % рения. Пределы допускаемых

отклонений измеренных значений термо-ЭДС термопар от основных значений, приводимых в табл. 6, должны определяться по уравнению

$$\Delta E = \pm [a + b (t - c)] dE/dt, \quad (5.13)$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты, определяемые из табл. 7;

$dE/dt$  — коэффициент преобразования термопары, определяемый по значениям, приведенным в табл. 6. Допускаемые отклонения, выраженные в градусах, определяются выражением в квадратных скобках уравнения (5.10).

Например, предел допускаемых отклонений для термопары хромель-копель в интервале  $-50 \div -300^\circ\text{C}$  составляет

$$\Delta t = \pm [2,5 + 0(t - 0)] = \pm 2,5^\circ\text{C}. \quad (5.14)$$

В интервале  $300 \div 800^\circ\text{C}$  предел допускаемых отклонений для той же термопары уже зависит от значения измеряемой температуры. Например, для  $t = 600^\circ\text{C}$  предел допускаемых отклонений  $\Delta t = \pm [2,5 + 6 \cdot 10^{-3} (600 - 300)] = \pm 4,3^\circ\text{C}$ , что соответствует  $\Delta E = \pm 4,3 \cdot 0,0878 = 0,38$  мВ.

Кроме стандартных термоэлектрических термометров находят применение в особых условиях нестандартные термоэлектрические термометры, которые либо не отвечают требованиям воспроизводимости, либо не имеют достаточно стабильную градуировочную характеристику. К ним относятся высокотемпературные термометры:

*дисилицид молибдена* — дисилицид вольфрама ( $\text{MoSi}_2$ — $\text{WSi}_2$ ) для измерения температур агрессивных газовых сред и некоторых сплавов в интервале температур до  $1700^\circ\text{C}$ ;

*углерод—борид циркония* ( $\text{C}$ — $\text{ZrB}_2$ ) измерения температур жидких металлов  $1800^\circ\text{C}$ ;

*углерод—карбид титана* ( $\text{C}$ — $\text{TiC}$ ) для измерения неокислительных газовых сред  $2500^\circ\text{C}$ ;

*карбид ниобия* — *карбид циркония* ( $\text{NbC}$  —  $\text{ZrC}$ ) для измерения в восстановительной инертной среде или в вакууме до  $3000^\circ\text{C}$ .

Для измерения низких температур (до  $-270^\circ\text{C}$ ) в промышленных установках применяют золотожелезо-никельхромовую ( $\text{AuFe}$ —  $\text{NiCr}$ )

термопару, которая практически не изменяет своего коэффициента преобразования интервале температур (- 200 ÷ - 270°C).

В лабораторных условиях для измерения температур до -270 °С могут применяться медь-медноникелевые термопары. Хотя эти термопары и отличаются стабильностью градуировочных характеристик, но их коэффициент преобразования существенно уменьшается уменьшением температуры: при изменении температуры от 0 до -270°C он уменьшается примерно в 40 раз. Поэтому возникают сложности измерения малых изменений термо-ЭДС.

В настоящее время ведутся большие работы по созданию высокотемпературных термоэлектрических термометров из монокристалла вольфрама, рения, молибдена и других металлов, имеющих стабильные градуировочные характеристики.

Для удобства применения термоэлектрический термометр специальным образом армируется. При этом преследуются следующие цели:

- ✓ электрическая изоляция термоэлектродов;
- ✓ защита термоэлектродов от вредного действия измеряемой и окружающей сред;
- ✓ защита термоэлектродов и зажимов выводов термоэлектродов от загрязнений и механических повреждений;
- ✓ придание термоэлектрическому термометру необходимой механической прочности;
- ✓ обеспечение удобства монтажа на технологическом оборудовании и удобства подключения соединительных проводов.

## ГЛАВА 6 ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 6.1 Общие сведения о термометрах сопротивления

Принцип действия термометров сопротивления основан на способности различных материалов (в первую очередь металлов) изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Параметр, характеризующий изменение электрического сопротивления с температурой, называют температурным коэффициентом электрического сопротивления. Для материалов, у которых температурный коэффициент не зависит от температуры, он может быть определен как

$$\alpha = (R_t - R_0) / (R_0 t), \quad (6.1)$$

где  $R_t$  и  $R_0$  – сопротивление при температуре  $t$  и  $0^\circ\text{C}$ .

Для материалов, у которых температурный коэффициент зависит от температуры, он может быть определен только для каждого значения температуры как

$$\alpha = (1/R_0)(dR/dt). \quad (6.2)$$

Температурный коэффициент выражается в  $^\circ\text{C}^{-1}$  или  $\text{K}^{-1}$ . Для большинства чистых металлов температурный коэффициент находится в пределах  $0,0035 \div 0,0065 \text{ K}^{-1}$ . У сплавов этот коэффициент существенно меньше и в некоторых случаях приближается к нулю (для манганина составляет  $2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ). Для полупроводниковых материалов температурный коэффициент отрицательный и на порядок больше, чем у металлов ( $0,01 \div 0,15 \text{ K}^{-1}$ ).

Термометры сопротивления из чистых металлов, как правило, изготавливают путем специальной намотки тонкой проволоки на каркас из изоляционного материала. Для предохранения от повреждения проволоку вместе с каркасом помещают в защитную оболочку. В настоящее время применяются и другие конструкции термометров сопротивления.

Материалы, применяемые для изготовления технических термометров сопротивления, должны отвечать тем же обязательным требованиям, которые

предъявляются к материалам, идущим на изготовление термоэлектрических термометров.

Во-первых, это требование стабильности градуировочной характеристики и, во-вторых, требование воспроизводимости. Если не выполняется хотя бы одно из этих требований, материал не может быть использован для серийного изготовления технических термометров. Все другие требования: высокая чувствительность, линейность градуировочной характеристики, большое удельное сопротивление и др. – являются не обязательными, а желательными. В настоящее время для изготовления термометров сопротивления применяются следующие металлы: медь, платина и никель. Медь является дешевым материалом, который может быть высокой чистоты. Она может быть получена в виде тонких проволок в различной изоляции. Сопротивление меди изменяется с температурой практически линейно:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (6.3)$$

где  $R_t$  и  $R_0$  – сопротивление термометра при температуре  $t$  и  $0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления медной проволоки,  $\alpha = 4,28 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

В связи с окисляемостью меди она используется для измерения температур не выше  $200^\circ\text{C}$ . К числу недостатков меди следует отнести малое удельное сопротивление:  $\rho = 0,17 \times 10^{-7} \text{ Ом} \times \text{м}$ . Удельное сопротивление влияет на габариты термометра сопротивления: чем меньше удельное сопротивление, тем больше нужно проволоки, чтобы намотать такое же сопротивление, тем больше габариты термометра.

*Медные термометры сопротивления* в соответствии с ГОСТ 6651-78 могут применяться для длительного измерения температуры от  $-200$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Они выпускаются II и III классов. Номинальные сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  составляют 10, 50 и 100 Ом (в эксплуатации пока находятся термометры с  $R_0 = 53 \text{ Ом}$ ), им соответственно присвоены следующие условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования: 10М, 50М и 100М (для термометров с  $R_0 = 53 \text{ Ом}$  принято обозначение гр. 23). Номинальные



статические характеристики преобразования для медных термометров приведены в табл. 8. Предел допускаемой основной погрешности выбирается из ряда 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 и 20 °С. Для термометров II класса он, как правило, составляет 0,3 или 0,5 °С, а для III класса 1 или 2°С.

Таблица 8. Номинальные статические характеристики преобразования медных термопреобразователей сопротивления для диапазонов температур -200 ÷ 200°С типа ТСМ

Температура термопреобразователя, °С	Сопротивление термопреобразователя °С, Ом, для температуры			Температура термопреобразователя °С	Сопротивление термопреобразователя °С, Ом, для температуры		
	100М	50М	10М		100М	50М	10М
-200	12,160			0	100,000	50,000	10,000
-190	16,270			10	104,281	52,140	10,428
-180	20,610			20	108,563	54,281	10,856
-170	25,080			30	112,844	56,422	11,284
-160	29,620			40	117,124	58,562	11,712
-150	34,180			50	121,404	60,702	12,140
-140	38,730			60	125,684	62,842	12,568
-130	43,210			70	129,963	64,981	12,996
-120	47,690			80	134,242	67,121	13,424
-110	52,160			90	138,522	69,261	13,852
-100	56,610			100	142,800	71,400	14,280
-90	61,030			110	147,079	73,539	14,708
-80	65,420			120	151,357	75,678	15,136
-70	69,790			130	155,635	77,817	15,564
-60	74,150			140	159,913	79,956	15,991
-50	78,480	39,240	7,848	150	164,192	82,096	16,419
-40	82,810	41,405	8,281	160	168,470	84,235	16,847
-30	87,120	43,560	8,712	170	172,748	86,374	17,275
-20	91,420	45,710	9,142	180	177,026	88,513	17,703
-10	95,720	47,860	9,572	190	181,305	90,653	18,130
				200	185,583	92,791	18,558

В соответствии со стандартом СЭВ 1057-78 выпускаются *никелевые термометры сопротивления* на интервал температур от - 60 до +180°С. Они выпускаются III класса. Номинальные сопротивления при 0°С составляют 50 и 100 Ом. Никель обладает высоким температурным коэффициентом, достигающим  $\alpha = 6,75 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , и большим удельным сопротивлением  $\rho = 1,28 \times 10^{-7} \text{ Ом} \times \text{м}$ , что позволяет получать достаточно малогабаритные термометры с большим коэффициентом преобразования. Номинальное

отношение  $R_{100}/R_0$  для слабо легированного никеля установлено  $1,617 \pm 0,004$ . Номинальные статические характеристики преобразования для никелевых термометров приведены в табл. 9.

Таблица 9. Номинальные статические характеристики преобразования никелевых термопреобразователей сопротивления

Температура термопреобразователя, °С	Сопротивление термопреобразователя °С, Ом, для температуры		Температура термопреобразователя °С	Сопротивление термопреобразователя °С, Ом, для температуры		Температура термопреобразователя, °С	Сопротивление термопреобразователя °С, Ом, для температуры	
-60	69,50	34,75	20	111,30	55,65	100	161,70	80,85
-50	74,20	37,10	30	117,10	58,55	по	168,70	84,35
-40	79,10	39,55	40	123,00	61,50	120	175,90	87,95
-30	84,10	42,05	50	129,10	64,55	130	183,30	91,65
-20	89,30	44,65	60	135,30	67,65	140	190,90	95,45
-10	94,60	47,30	70	141,70	70,85	150	198,70	99,35
0	100,00	50,00	80	148,20	74,10	160	206,70	103,35
10	105,60	52,80	90	151,90	75,95	170	214,90	107,45
						180	223,10	111,55

Чистая платина является одним из наиболее распространенных металлов, применяемых для изготовления термометров сопротивления. Платина отвечает обязательным требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления термометров сопротивления.

Платиновые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температур от  $-260$  до  $+1100$ °С (ГОСТ 6651-78).

Сопротивление платины имеет сложную нелинейную зависимость от температуры и для интервала температур от  $0$  до  $630$ °С может быть приближенно описано выражением

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (6.4)$$

а на интервале от  $-183$  до  $0$ °С – выражением

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)]. \quad (6.5)$$

Платиновые термометры сопротивления могут иметь следующие сопротивления при  $0$ °С: 1, 5, 10, 50, 100 и 500 Ом (в эксплуатации находятся термометры с  $R_0=46$  Ом). Этим термопреобразователям сопротивления присвоены следующие условные обозначения номинальной статической характеристики преобразования: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П (термометры с

сопротивлением  $R_0=46$  Ом обозначаются гр. 21).

Номинальные статические характеристики преобразования платиновых термометров сопротивления приведены в табл. 10.

Таблица 10. Номинальные статические характеристики преобразования платиновых термопреобразователей сопротивления

Температура термопреобразователя, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом					
	1П	5П	10П	50П	100П	500П
—260				0,203	0,406	2,03
—250				0,511	1,022	5,11
—240				1,351	2,701	13,51
—230				2,744	5,487	27,44
—220				4,529	9,058	45,29
—210				6,538	13,075	65,38
—200			1,731	8,654	17,307	86,54
—180			2,599	12,993	25,986	129,93
—160			3,455	17,276	34,552	172,76
—140			4,301	21,504	43,008	215,04
—120			5,136	25,679	51,359	256,79
—100		2,981	5,962	29,810	59,621	298,10
—80		3,391	6,781	33,806	67,812	339,06
—60		3,797	7,594	37,970	75,940	379,70
—40	0,840	4,201	8,401	42,006	84,012	420,06
—20	0,920	4,602	9,203	46,016	92,032	460,16
0	1,000	5,000	10,000	50,000	100,000	500,00
50	1,197	5,985	11,971	59,854	119,708	598,54
100	1,391	6,956	13,911	69,556	139,113	695,56
150	1,582	7,911	15,822	79,110	158,221	791,10
200	1,770	8,852	17,703	88,516	177,033	885,16
250	1,956	9,778	19,555	97,776	195,552	977,76
300	2,138	10,689	21,378	106,889	213,779	1068,89
350	2,317	11,586	23,172	115,858	231,715	
400	2,494	12,468	24,936	124,679	249,358	
450	2,667	13,335	26,671	133,353	266,707	
500	2,838	14,188	28,376	141,880	283,760	
550	3,005	15,026	30,051	150,255	300,511	
600	3,170	15,848	31,696	158,480	316,960	
650	3,331	16,655	33,310	166,549	333,098	
700	3,489	17,446	34,893	174,465	348,931	
750	3,645	18,224	36,447	182,234	364,470	
800	3,797	18,986	37,972	189,859	379,719	
850	3,947	19,734	39,467	197,336	394,672	
900	4,093	20,467	40,933	204,666	409,333	
950	4,237	21,185	42,370	211,849	423,699	
1000	4,378	21,889	43,778	218,888	437,776	
1050	4,516	22,578				
1100	4,650	23,253				

Для области температур от -260 до -200°С номинальные статические характеристики платиновых – термометров составлены с учетом реального

отношения  $R_{100}/R_0$  (ГОСТ 6651-78) и поэтому могут несколько отличаться от характеристик, приведенных в табл. 6.3.

Номинальные статические характеристики преобразования платиновых термометров сопротивления приведены в табл. 10.

Для области температур от  $-260$  до  $-200^\circ\text{C}$  номинальные статические характеристики платиновых - термометров составлены с учетом реального отношения  $R_{100}/R_0$  (ГОСТ 6651-78) и поэтому могут несколько отличаться от характеристик, приведенных в табл. 6.3.

Одним из недостатков платины является ее загрязнение в восстановительной среде парами металлов, окислами углерода и другими веществами. Особенно сильно это проявляется при высоких температурах.

Кроме металлов для изготовления термометров сопротивления применяют также полупроводниковые материалы: германий, окислы меди, марганца, кобальта, магния, титана и их смеси. Большинство полупроводниковых материалов обладает большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления и также очень большим удельным сопротивлением. Поэтому можно изготавливать очень малые по размерам чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления, обладающих значительным коэффициентом преобразования. Зависимость сопротивления полупроводникового термопреобразователя (терморезистора) от температуры может быть описана выражением

$$R_T = R_0 \exp \left( B \times \frac{T_0 - T}{T_0 T} \right) \quad (6.6)$$

Значение  $R_0$  определяется сопротивлением термометра при температуре  $T_0$  [как правило,  $T_0 = 293 \text{ K}$  ( $20^\circ\text{C}$ )], а значение  $B$  зависит от материала полупроводника, из которого изготавливается термометр. В связи с тем, что технология получения полупроводниковых термопреобразователей сопротивления не позволяет изготавливать их с идентичными характеристиками (они не отвечают полностью требованию воспроизводимости), все полупроводниковые термопреобразователи

сопротивления имеют индивидуальные градуировочные характеристики. Особенно большое распространение получили германиевые терморезисторы для измерения температур от 1,5 К и выше. Для интервала от 4,2 до 13,81 К они применяются для воспроизведения температурной шкалы. Германиевые терморезисторы, применяемые для технических измерений, имеют предел допускаемых погрешностей  $\pm (0,05 \div 0,1)$  К.

Для эталонных германиевых терморезисторов стабильность градуировочной характеристики не хуже  $\pm 0,001$  К.

Для измерения температур от  $-100$  до  $+300^{\circ}\text{C}$  применяются окисные полупроводниковые материалы. Коэффициенты преобразования полупроводниковых терморезисторов могут быть на несколько порядков выше, чем у термометров сопротивления с чувствительным элементом из металлической проволоки. Однако, необходимость индивидуальной градуировки (или определения значений  $A$  и  $B$ ) существенно ограничивает возможности широкого применения полупроводниковых терморезисторов для измерения температуры.

Полупроводниковые терморезисторы находят широкое применение в системах температурной сигнализации. Это вызвано тем, что они обладают способностью изменять свое сопротивление при достижении определенной температуры скачкообразно в несколько раз, что вызывает соответствующее увеличение тока и срабатывание системы сигнализации (релейный эффект).

## 6.2 Устройство термометров сопротивления

Чувствительный элемент металлического термометра сопротивления состоит, как правило, из проволоки или ленты, которая намотана на каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы. От чувствительного элемента идут выводы к зажимам головки термометра, к которым подсоединяются провода, идущие затем к измерительному прибору. Вариант устройства термометра сопротивления приведен на рис. 13. Чувствительный элемент термометра сопротивления выполняется в виде спирали из проволоки 1, помещенной в четырехканальный керамический каркас 2. Для защиты от механических повреждений и вредного воздействия измеряемой или окружающей среды чувствительный элемент помещен в защитную оболочку 3, которая уплотнена керамической втулкой 4. Выводы 5 чувствительного элемента проходят через изоляционную керамическую трубу 6. Все это находится в защитном чехле 7, установленном на объекте измерения с помощью резьбового штуцера 8. На конце защитного чехла располагается соединительная головка 9 термометра. В головке находится изоляционная колодка 10 с винтами 11 для крепления выводов термометра и подключения соединительных проводов. Головка закрывается крышкой. Соединительные провода выводятся через штуцер. Для уменьшения влияния внешних электрических и магнитных полей чувствительные элементы термометров сопротивления делают с безындуктивной намоткой.

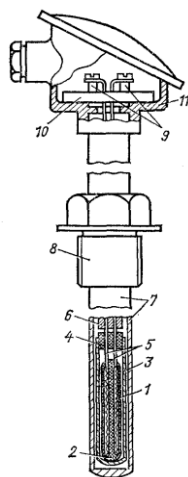


Рисунок 13. Устройство термометра сопротивления

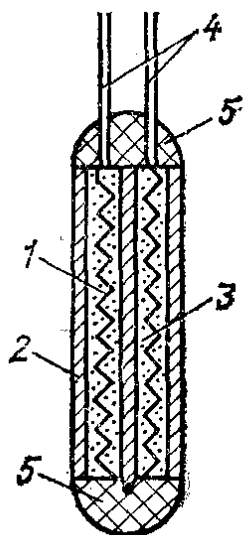


Рисунок 14. Чувствительный элемент платинового термометра сопротивления

Чувствительный элемент медного термометра сопротивления состоит из медной изолированной проволоки диаметром 0,1 мм, намотанной в несколько слоев на цилиндрический каркас из пластмассы или металла. Слои проволоки скрепляются между собой и каркасом лаком. К обоим концам проволоки припаиваются медные выводы диаметром 1 ÷ 1,5 мм. Чувствительный элемент помещают в защитную оболочку. Кроме каркасных выпускаются бескаркасные чувствительные элементы медных термометров сопротивления. Чувствительный элемент изготавливается из изолированной проволоки диаметром 0,08 мм безындуктивной бескаркасной намоткой. Отдельные слои скреплены лаком, и затем весь чувствительный элемент обернут фторопластовой пленкой. Чувствительный элемент помещают в тонкостенную защитную металлическую оболочку, которая засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Чувствительный элемент платиновых термометров состоит из двух или четырех платиновых спиралей 1, расположенных в капиллярных каналах керамического каркаса 2 (рис. 14). Каналы каркаса заполняются керамическим порошком 3, который служит изолятором и создает подпружинивание спиралей. К концам спиралей припаяны выводы 4 из платиновой или иридиево-

родиевой проволоки. Чувствительный элемент в керамическом каркасе герметизируется специальной глазурью 5. Такая конструкция обеспечивает хорошую герметичность ввиду малой газопроницаемости керамики каркаса и глазури. Закрепление спирали только в двух точках обеспечивает незначительное механическое напряжение. Чувствительные элементы оказываются вследствие плотной засыпки пространства между спиралями и каркасом керамическим порошком достаточно прочными и вибростойкими. Они могут применяться в интервале температур от - 260 до +1000°С. Специально для низкотемпературных измерений разработаны конструкции миниатюрных платиновых термометров сопротивления.

В эксплуатации применяются чувствительные элементы платиновых термометров сопротивления со слюдяным каркасом, на котором намотана специальным образом неизолированная платиновая проволока. В лабораторной практике применяются платиновые термометры сопротивления с каркасом из кварца или специального стекла также с неизолированной платиновой проволокой. Трудности покрытия платины изоляционными лаками и эмалями не давали возможности получать платиновую проволоку в изоляции, что существенно затрудняло разработку малогабаритных и надежных платиновых термометров сопротивления.

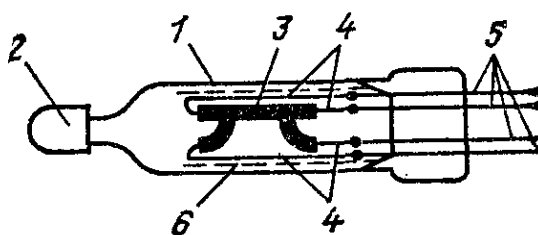


Рисунок 15. Чувствительный элемент германиевого термометра сопротивления

Германиевые термометры сопротивления для низкотемпературных измерений представляют собой медную луженую гильзу 1 (рис. 15), которая заполнена газообразным гелием и закрыта герметичной пробкой 2. Внутри гильзы находится монокристалл германия 5, легированного сурьмой. К кристаллу приварены четыре золотых проводника 4, к которым припаяны



платиновые выводы 5. Кристалл изолирован пленкой 6. Такие термометры применяются для измерения температур от 1,5 до 50 К.

В лабораторной практике иногда встречаются платиновые термометры зарубежного производства, которые представляют собой платиновую проволоку или ленту, запаянную в стекло. Такие термометры могут надежно работать до 500 ÷ 600 °С. При более высоких температурах стекло становится электропроводящим и, кроме того, температурные напряжения могут существенно исказить результаты измерения.

### 6.3 Особенности измерения сопротивления термометров и способы их подключения

При измерении температуры термометрами сопротивления возникает необходимость измерения сопротивления термометра, который подсоединяется к измерительному прибору соединительными проводами. Поэтому сопротивление, подключенное к измерительному прибору, больше, чем сопротивление термометра. Чтобы исключить или уменьшить влияние этого дополнительного сопротивления на результаты измерения, используют различные способы, которые зависят от схемы подключения термометра и метода измерения или схемы измерительного прибора. Сопротивление соединительных проводов должно с помощью подгоночного сопротивления быть подогнано до значения, при котором производилась градуировка прибора. Градуировочное значение сопротивления соединительных проводов указывается на шкале прибора либо в его паспорте.

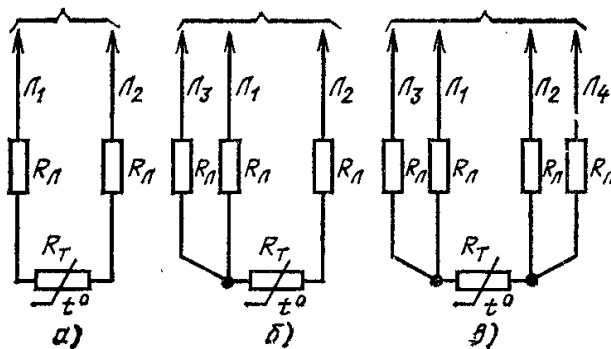


Рисунок 16. Схемы подсоединения термометров сопротивления

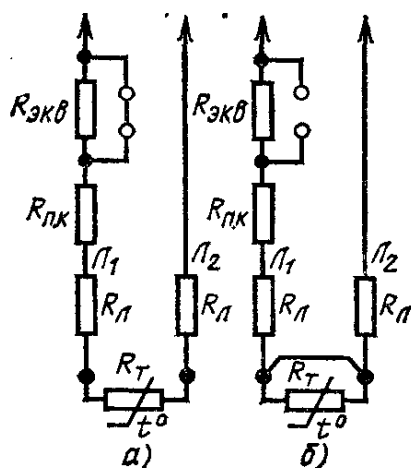


Рис. 17. Схема подгонки сопротивления соединительных проводов двухпроводной линии

Различают двух-, трех- и четырехпроводные схемы подсоединения термометров сопротивления к измерительному прибору (рис. 16).

При двухпроводной схеме включения термометр сопротивления и сопротивление соединительных проводов последовательно включены в одну из ветвей измерительной схемы (рис. 16,а). Подгонка сопротивления соединительных проводов до градуировочного значения чаще всего осуществляется следующим образом. После того как собрана схема и проложены (смонтированы) соединительные провода, последовательно с термометром и соединительными проводами включаются подгоночная катушка  $R_{П.К.}$  (рис. 17) и эквивалентное сопротивление  $R_{Экв.}$ . Значение эквивалентного сопротивления соответствует сопротивлению термометра при определенной температуре, например 100, 50 или 250°C. Зажимы термометра закорачивают, и ветвь измерительной схемы состоит из сопротивления реальных соединительных проводов  $R_{л}$ , эквивалентного сопротивления, имитирующего сопротивление термометра при определенной температуре,  $R_{Экв.}$  и подгоночного сопротивления  $R_{П.К.}$  (рис. 17,б). Затем включают измерительную схему и изменяют  $R_{П.К.}$  до тех пор, пока измерительный прибор не встанет на отметку шкалы, соответствующую температуре, на которую рассчитано эквивалентное сопротивление. После этого эквивалентное сопротивление либо отключается,

либо закорачивается, а закоротка с зажимов термометра снимается. Таким образом, подгоняют сопротивление соединительных проводов термометра до расчетного (градуировочного) значения. Однако если в процессе эксплуатации температура соединительных проводов (как правило, медных) будет отличаться от их температуры при подгонке сопротивления, то и само сопротивление этих проводов будет отличаться от градуировочного значения. Погрешность, вызванная неправильностью подгонки или изменением сопротивления с температурой, независимо от диапазона измерения измерительного прибора для двухпроводной схемы подключения термометра может быть определена из выражения:

$$\Delta t = (R_{л}^{эк} - R_{л}^{сп}) / S, \quad (6.7)$$

где  $\Delta t$  – погрешность измерения, °С;

$R_{л}^{эк}$  – значение сопротивления линии (соединительных проводов) в условиях эксплуатации, Ом;

$R_{л}^{сп}$  – градуировочное (расчетное) значение сопротивления линии, Ом;

$S$  – коэффициент преобразования термометра в области измеряемой температуры, Ом/К.

Для уменьшения погрешности, вызываемой несоответствием сопротивления соединительных проводов градуировочному значению, применяют термометры с тремя выводами от термометра сопротивления в измерительную схему. При трехпроводной схеме подключения термометра (рис. 17, б) соединительные провода от головки термометра идут к измерительной ветви, сравнительной ветви и источнику питания. В симметричных уравновешенных схемах, когда сопротивления измерительной и сравнительной ветвей одинаковы, изменение температуры соединительных проводов не вызывает погрешности, так как сопротивление проводов изменяется на одну и ту же величину. Подгонка сопротивления соединительных проводов осуществляется последовательным измерением попарно соединенных проводов.

Четырехпроводная схема подключения термометра (рис.17, в)

применяется, как правило, при компенсационном методе измерения сопротивления, который позволяет полностью исключить влияние изменения сопротивления соединительных проводов на показания прибора.

Еще одна особенность, которая имеет место при измерении сопротивления термометра, заключается в том, что для измерения сопротивления по термометру должен идти ток. При этом согласно закону Джоуля – Ленца выделяется теплота, которая нагревает термометр до более высокой температуры, чем температура измеряемой среды, что вызывает соответствующее изменение его сопротивления.

В промышленных условиях рассчитывают измерительный ток таким образом, чтобы погрешность за счет самонагрева не превышала  $0,1 \% R_0$  – сопротивления термометра при  $0^\circ\text{C}$ .

## ГЛАВА 7. ТЕРМОПАРЫ, ТЕРМОТРАНЗИСТОРЫ ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

### 7.1 Измерение температуры термопарой

Термопара, образованная двумя проводниками А и В, два спая которых находятся при температурах  $T_1$  и  $T_2$ , создает ЭДС, зависящую, с одной стороны от материала проводников А и В и, с другой стороны, от температур  $T_1$  и  $T_2$ . Металлы можно расположить в следующий термоэлектрический ряд: (-) Вi, Со, Ni, К, Pd, Na, Hg, Pt, Al, Mg, Sn, Pb, Cs, Ag, Cu, Zn, Cd, Мо, Fe, Sb, Si (+) .

Если составить термоэлемент из двух любых металлов, входящих в этот ряд, то предшествующий металл окажется электроотрицательным, а последующий – электроположительным. Чем дальше друг от друга стоят в термоэлектрическом ряду металлы, составляющие термоэлемент, тем больше при заданной разности температур возникающая ЭДС.

Обычно температура одного спая постоянна и известна, она служит опорной нулевой точкой. Температура другого спая  $T_2$  является температурой  $T_c$ , которую приобретает этот спай в исследуемой среде.

*Преимущества термопар по сравнению с термометрами сопротивления* заключаются в следующем. Малые размеры спая обеспечивает высокое быстродействие и позволяет проводить точечные измерения температуры. Другое достоинство термопары заключается в вырабатываемом сигнале – Э Д С, для измерения которого не требуется пропускать ток через датчик, поэтому не возникает никакой погрешности, связанной с саморазогревом, что существенно для измерений в системах с малой инерцией или при низких температурах.

*Недостаток термопары* заключается в том, что для измерения необходимо знать температуру опорного спая.

Основные типы термопар, используемые на практике, и их технические характеристики, приведены в таблице 5.3.

Диапазон температур, в котором применима термопара, ограничивается

при низких температурах снижением термоэлектрической способности, а при высоких температурах – опасностью проникновения примесей из внешней среды, испарением одного из компонент сплава термопары, роста кристаллических зерен и плавление одного из проводников. Кроме того, максимальная рабочая температура зависит от толщины проволоки, поскольку в тонкой проволоке структурные изменения проникают на всю толщину быстрее. Например, для термопар хромель константан установлены следующие максимальные температуры:

Таблица 11. Зависимость температуры термопары от диаметра

Диаметр, мм	3,25	1,63	0,81	0,33
Температура (макс.) °С	870	650	540	430

При изготовлении термопары необходимо избегать конструктивных неоднородностей, возникающих по трем основным причинам:

а) вследствие механических внутренних напряжений сжатия, от которых удается избавиться посредством отжига;

б) вследствие химического воздействия проволоки термопар должны быть защищены от прямого контакта с веществами, способными реагировать с ними;

в) вследствие воздействия радиоактивного излучения способного вызвать структурные превращения некоторых сплавов, используемых для изготовления термопар.

Изготовление спая осуществляется следующими методами:

- пайка оловом, если температура не очень высокая;
- автогенная сварка при помощи кислородно–ацетиленовой горелки;
- электросваркой.

Проволоки термопар пропускают через керамические изоляторы, которые должны быть химически стойки и иметь большое электрическое изолирующее сопротивление.

Обычно в термопарных измерениях используют два метода:

- 1) прямое измерение ЭДС с помощью милливольтметра;

2) метод компенсации, который позволяет проводить точные измерения, поскольку в этом случае ток через термопару не течет.

В первом случае измеренное напряжение  $v$  на клеммах милливольтметра с внутренним сопротивлением  $R_V$  равно:

$$V = E R_V / (R_t + R_l + R_V) \quad (7.1)$$

или

$$E = V / [1 + (R_t + R_l / R_V)], \quad (7.2)$$

где  $R_t$  и  $R_l$  - сопротивление термопары и сопротивление электрических проводов.

Вследствие неопределенности  $R_t$  и  $R_l$  необходимо сделать их влияние малым и должно выполняться условие  $R_V > R_t + R_l$ .

Во втором случае суть метода состоит в приложении противоположного и равного ЭДС термопары напряжения  $V$  точно известного и снимаемого с клемм резистора  $R$ , по которому течет ток  $I$ . Равенство ЭДС  $E$  и напряжения  $V$  устанавливается с помощью гальванометра в аппаратуре с ручной регулировкой или электронным способом в автоматической аппаратуре.

ЭДС термопары зависит от температуры спая  $T_2$ , расположенного в точке измерения:  $T_1 = 0^\circ \text{C}$ ,  $T_1$  - постоянна, но не равна нулю, и  $T_1$  - переменная, обычно равная окружающей среде.

В случае, когда опорная температура равна  $0^\circ \text{C}$  измеренная ЭДС позволяет непосредственно определить температуру среды по таблице для применяемой термопары.

А так же к величине измеренной величине ЭДС необходимо прибавить ЭДС температуры  $T_1$  и по таблицам определить значение измеряемой температуры. Например, платинородиевая – платиновая термопара, ЭДС опорного спая которой  $26^\circ \text{C}$  равен  $0,150 \text{ мВ}$  можно вычислить ЭДС измеряемой среды равной  $2,95 \text{ мВ}$ , и по таблице определить значение измеряемой температуры равной  $368^\circ \text{C}$

## 7.2 Термометры термотранзисторные

Термотранзисторами названы транзисторы, применяемые как первичные преобразователи температуры. В качестве термометрической характеристики термотранзистора выбирают напряжение эмиттер – база  $V_{эб}$ . Термотранзисторы применяются при измерении температуры в пределах от - 70 до + 150<sup>0</sup>С. Термотранзисторы обладают следующими положительными качествами: высокая стабильность и чувствительность, линейность характеристики, идентичность образцов, малые габариты, небольшая стоимость.

Температурная зависимость напряжения эмиттер – база  $V_{эб}$  с достаточной точностью определяется выражением:

$$V_{эб} = V_{эб}^0 - A t \quad (7.3)$$

где  $V_{эб}^0$  – напряжение эмиттер – база при 0<sup>0</sup>С;

$A$  – постоянная величина;

$t$  – температура.

Термометры с транзисторами содержат мостовую измерительную схему, одним из плеч которой является переход эмиттер-база, на коллектор которого подается запирающее напряжение. Источник питания моста и транзистора должен быть стабилизированным, напряжение на выходе моста определяется выражением

$$V = c t \quad (7.4)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от параметров измерительного моста и характеристик термотранзистора, т.е. для определенного вида термотранзисторного термометра величина постоянная.

Серийно выпускается транзисторный электротермометр марки ТЭТ-2. Этот прибор предназначен для измерения температуры почвы и грунта на глубинах до 50 см с помощью переносного датчика щупа в диапазоне температур (-40 ) до (+80) <sup>0</sup>С с дискретной точностью до 0,2 <sup>0</sup>С.



### 7.3 Оптическая пирометрия

Оптическая пирометрия – это метод измерения температуры основанный на соотношении, существующем между температурой тела и оптическим излучением, которое это тело испускает. Преимуществом оптической пирометрии является то, что она позволяет определять температуру объекта без контакта с ним и эти методы являются особенно подходящими, когда условия измерений не позволяют использовать классические термометры. К таким условиям относятся :

- ✓ очень высокая температура ( $>2000$  °C);
- ✓ измерение на большом расстоянии;
- ✓ агрессивная среда;
- ✓ материалы плохо проводящие тепло (пластмассы, стекло, дерево);
- ✓ движущие тела (например, листовой материал на прокатном стане);
- ✓ оптическая пирометрия позволяет получить карту распределения температур, когда температура исследуемого объекта неравномерна.

Физический принцип оптической пирометрии основан на том, что все тела спонтанно и непрерывно испускают электромагнитное излучение, распределение энергии, в непрерывном спектре которого есть функция температуры – это тепловое излучение. Излучение является следствием вызванных тепловым возбуждением радиационных переходов в атомах и молекулах. Законы испускания этого излучения установлены для идеального излучателя – абсолютно черного тела, поглощающего все падающее на него излучение. Тепловое излучение реального тела в зависимости от его коэффициента поглощения приближается к излучению абсолютно черного тела.

Дадим некоторые основные определения:

$E_n$  – энергетическая светимость, полная мощность излучения испускаемого в полусферу с единицы поверхности излучателя. Она, согласно закона Стефана – Больцмана для тела с абсолютной температурой  $T$ , равна:

$$E_n = \delta T^4, \quad (7.5)$$

где  $\delta$  - постоянная Стефана – Больцмана;

$E_\lambda$  – спектральная мощность энергетической светимости излучаемая в полусфере с единицы поверхности излучателя на длине волны  $\lambda$  в единичном интервале длин волн с центром в  $\lambda$ .

Согласно закону Вина, длина волны  $\lambda_{\text{макс}}$  соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости источника с данной абсолютной температурой  $T$ :

$$\lambda_{\text{макс}} = 2898 / T (K). \quad (7.6)$$

Установлено, что более 90 % полной энергии излучается в диапазоне между:  $\lambda_{\text{макс}}/2$  и  $5\lambda_{\text{макс}}$ .

Эти законы показывают, что с повышением температуры быстро увеличивается энергетическая светимость и происходит сдвиг спектра излучения в сторону коротких длин волн (от инфракрасного в видимый диапазон).

Таким образом, чтобы измерить температуру тела необходимо иметь приемник излучения который преобразовывал принимаемый поток излучения в электрический сигнал. Соотношение между температурой тела  $T$  и элементарным электрическим сигналом на выходе приемника излучения выражается в виде:

$$ds_{el} = S(\lambda) \times K(\lambda) \times e(\lambda T) \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 \{\exp(c_2/\lambda^{-1})\}}, \quad (7.7)$$

где  $ds_{el}$  – элементарный электрический сигнал,

$S(\lambda)$  – чувствительность приемника излучения,

$K(\lambda)$  – коэффициент зависящий оптической системы приемника и поглощения излучения средой в которой распространяется излучение,

$e(\lambda T)$  – коэффициент излучения на длине волны  $\lambda$  при температуре  $T$  материала из которого состоит объект измерения,  $C_1$  и  $c_2$  - коэффициенты из уравнения Планка для теплового излучения тела.

На практике используются пирометры полного излучения, узкополосные пирометры, пирометры с исчезающей нитью и бихроматические пирометры .

## ГЛАВА 8. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

### 8.1 Общие сведения об оптических датчиках

*Свет и его основные свойства.* Свет одновременно имеет волновую и корпускулярную природу. В волновом аспекте он представляет собой электромагнитные колебания, излучаемые при электронных переходах в атомах источника с одного энергетического уровня на другой. Эти волны распространяются в вакууме со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с, а в веществе с меньшей скоростью  $v = c/n$ , где  $n$  – показатель преломления среды.

В корпускулярном аспекте свет рассматривается, когда речь идет о взаимодействии его с веществом. Свет представляется состоящим из частиц – фотонов, каждый из которых несет элементарную энергию

В веществе электроны связаны с атомами и для того чтобы стать свободными, они должны получить энергию  $w$  равную энергии их связи. Поглощение одного фотона вызывает освобождение одного электрона

$$\lambda < h c/w. \quad (8.1)$$

Максимальная длина волны способная вызвать освобождение электрона в веществе, называется пороговой длиной волны  $\lambda = 1,237/w$ .

Тип освобожденных световым излучением носителей заряда зависит от природы освещаемого материала.

Это:

- ✓ электронно - дырочные пары в изоляторах и очень чистых полупроводниках;
- ✓ электроны в примесных полупроводниках с дырочными уровнями;
- ✓ дырки в примесных полупроводниках с акцепторными уровнями.

Освобождение носителей под действием светового излучения называется фотоэлектрическим эффектом. На этом эффекте, приводящем к изменению электрических свойств материала, основано действие оптических датчиков

В зависимости от явлений, происходящих в освещаемом объекте фотоэлектрический эффект проявляется во внешнем фотоэффекте и различных

видах внутреннего фотоэффекта (фотопроводимость, фотогальванический эффект, фотоэлектромагнитный эффект).

Величины, относящиеся к световому излучению, оцениваются:

✓ исключительно по количеству энергии, ее распределению в пространстве и во времени в обычных физических величинах (джоулях, ваттах) – это энергетическая фотометрия;

✓ оценка делается с учетом производимого зрительного впечатления, дополняющего чисто энергетическую оценку, т. е. речь идет о световых измерениях (визуальная фотометрия), которые относятся только к видимой области спектра.

Таблица 11. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	$\Phi_e$	Вт	$W$	$N_{ph}/s$ (кол-во фотонов в секунду)
Энергия излучения	$Q_e$	Дж	$J$	$N_{ph}$ (кол-во фотонов)
Энергетическая сила излучения (сила излучения)	$I_e$	Вт/ср	$W/sr$	$N_{ph}/sr \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле 1ср в секунду)
Поверхностная плотность потока излучения	$M_e$	Вт/м <sup>2</sup>	$W/m^2$	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов излучаемых с 1м <sup>2</sup> в секунду)
Энергетическая освещенность (облученность)	$E_e$	Вт/м <sup>2</sup>	$W/m^2$	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов на 1м <sup>2</sup> в секунду)
Энергетическая яркость	$L_e$	Вт/ср*м <sup>2</sup>	$W/sr \cdot m^2$	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле в 1ср на 1м <sup>2</sup> в секунду)

Таблица 12. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	$\Phi_v$	лм	$lm$
Световая энергия	$Q_v$	лм*с	$lm \cdot s$
Сила света	$I_v$	лм/ср =кд	$lm/sr = cd$
Поверхностная плотность светового потока	$M_v$	лм/м <sup>2</sup>	$lm/m^2$
Освещенность	$E_v$	лк	$lm/m^2 = lx$
Яркость	$L_v$	лм/ср*м <sup>2</sup> = кд/м <sup>2</sup> = нит	$lm/sr \cdot m^2 = cd/m^2 = nit$

Для оптического излучения также как и для электрического тока, можно указать две основные области применения:

- ✓ Энергетическое применение, когда источник излучения является преобразователем энергии (освещение, инфракрасный нагрев).
- ✓ Информационное применение, когда свет является носителем информации, которую он должен передавать.

Во втором случае измеряемая величина изменяет один из физических параметров излучения, воздействуя на него непосредственно или косвенно. Этот процесс может рассматриваться как первичное преобразование измеряемой величины. Физический параметр излучения, на который оказано воздействие, является вторичной измеряемой величиной и к ней чувствителен оптический датчик.

## **8.2 Метрологические характеристики оптических датчиков**

Выходной характеристикой оптических датчиков обычно является электрический ток, поэтому ток и его вариации в функции различных параметров служит для характеристики свойств датчиков.

В качестве метрологических характеристик выступают:

- ✓ темновой ток;
- ✓ чувствительность;
- ✓ спектральная чувствительность;
- ✓ интегральная чувствительность;
- ✓ обнаружительная способность (соотношение между собственным шумом и сигналом).

*Темновой ток* – это ток, постоянно имеющийся на выходе фоточувствительного устройства, помещенного в темноту и находящегося при определенных условиях питания.

Он возникает по двум причинам: *во - первых* внутренняя причина за счет наличия теплового возбуждения носителей, и его величина определяется

свойствами материала, и, во – вторых, внешняя причина поскольку внешняя среда является источником теплового излучения и датчик его воспринимает. В общем случае выгодно выбрать и использовать такой датчик, у которого темновой ток существенно меньше минимального фототока, обусловленного сигналом. Для датчиков ИК - излучения это приводит к необходимости помещать датчик в охлажденный корпус чтобы уменьшить тепловое возбуждение датчика и ограничить поток излучения из окружающей среды.

*Чувствительность.* Поток излучения оптического сигнала, воспринимаемого датчиком, приводит к возникновению фототока  $I_p$  который вместе с темновым током  $I_0$  составляет общий ток на выходе датчика:

$$I = I_0 + I_p. \quad (8.2)$$

Реакцию датчика на принимаемое излучение обычно характеризуют, исходя из фототока  $I_p$ . Эта реакция зависит с одной стороны от устройства датчика, а с другой – от природы излучения, его спектрального состава и величины потока.

Если датчик подвергается воздействию потока  $\Phi$  и выдает ток  $I_p$  при постоянном темновом токе, то чувствительность датчика выражается как:

$$S = d I_p / d \Phi. \quad (8.3)$$

В зависимости от единиц, в которых измеряется поток чувствительность выражается в А/Вт, А/лм или А/лк, если поток оценивается по создаваемой им визуальной освещенности.

*Спектральная чувствительность* - это чувствительность датчика, когда воспринимаемый им поток монохроматичен, и записывается для определенной длины волны  $\lambda$

$$S(\lambda) = d I_p / d \Phi(\lambda). \quad (8.4)$$

Кривая спектральной чувствительности показывает изменение относительной чувствительности в функции длины волны:  $S(\lambda)/S(\lambda_p)$ , где  $(\lambda_p)$  – длина волны соответствующая максимуму спектральной чувствительности.

*Интегральная чувствительность*  $S_t$  – это чувствительность датчика, принимающего немонахроматический оптический сигнал. Она зависит, с одной

стороны, от спектральной чувствительности датчика к различным составляющим воздействующего излучения, и, с другой стороны, от спектрального распределения самого излучения.

*Обнаружительная способность.* Она связана в соотношении определения характеристик датчика, в отношении его собственных шумов и способности датчика обнаруживать слабые сигналы.

## ГЛАВА 9. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ

### 9.1 Фоторезисторы

Физическое явление, на котором основано действие датчика – фотопроводимость, представляет собой внутренний фотоэффект, т.е. освобождение в материале датчика электрических зарядов под действием света и обусловленное этим увеличением проводимости. Соединенный с соответствующей схемой формирования сигнала фоторезистор является одним из самых чувствительных оптических датчиков. Упрощенная модель фотопроводимости может быть представлена в следующем виде.

Пусть имеется полупроводниковая пластина, находящаяся в темноте, легированная донорными примесями с концентрацией носителей заряда  $n_0$  ионизированных за счет теплового возбуждения и энергией ионизации  $W_d$ .

Темновая  $\delta_0$  проводимость в этом случае будет равна:

$$\delta_0 = q \mu n_0, \quad (9.1)$$

где  $q$  – величина заряда электрона,  $\mu$  – подвижность электронов.

При освещении полупроводника фотоны с энергией  $h \nu \geq W_d$  ионизируют доноры, освобождая электроны, и общее число  $n$  электронов существенно превышает число электронов, освобожденных за счет теплового возбуждения  $n_0$ .

Соответствующая проводимость  $\delta = q \mu n$  под воздействием светового потока

увеличится, при этом проводимость является нелинейной функцией потока и меняется как  $\Phi^{0.5}$ .

Основными характеристиками фоторезисторов являются: сопротивление, спектральная характеристика, рассеиваемая мощность, чувствительность, постоянная времени.

Сопротивление. Величина темнового сопротивления зависит от формы, размеров, температуры и физико-химической природы фоточувствительного слоя фоторезисторов. Очень высоким темновым сопротивлением от  $10^4$



до  $10^9$  Ом при  $25^\circ\text{C}$  обладают PbS, CdS. Невелико сопротивление у In Sb, InAs (от  $10$  до  $10^3$ ).

Сопротивление фоторезистора, подвергаемого облучению световым потоком, быстро падает с увеличением светового потока. Так, при изменении освещенности от 0,01 до 1000 лк (освещенность при полной луне и при дневном свете) сопротивление изменяется на пять порядков. Сопротивление освещенного фоторезистора зависит от температуры, однако чувствительность к температуре с ростом светового потока падает.

Спектральная характеристика определяется свойствами полупроводникового материала - величиной запрещенной зоны.

Рассеиваемая мощность – она лимитируется нагревом фоторезистора и составляет около одного милливатта на  $1\text{ мм}^2$ .

Чувствительность. Она самая высокая для фоторезисторов из всех оптических датчиков. Так как фоторезистор является не линейным датчиком, то его чувствительность уменьшается с ростом светового потока. Отметим, что чувствительность пропорциональна приложенному к фоторезистору напряжению до тех пор, пока нагрев за счет джоулева тепла не приводит к повышению температуры.

Постоянная времени – характеризует быстроту, с которой сопротивление фоторезистора принимает новое значение при резком изменении действующего на него потока. Она определяется физическими явлениями, обуславливающими время жизни освобожденных носителей заряда.

По порядку величины постоянная времени фоторезисторов зависит:

✓ от природы материала фоторезисторов и способов их изготовления и для низкоомных фоторезисторов составляет 0,1 мкс, а высокоомных - до 100 мс;

✓ от амплитуды перепада потока, воздействующего на фоторезистор (постоянная времени уменьшается с ростом перепада освещенности).

К недостаткам фоторезисторов следует отнести:

✓ нелинейность энергетических характеристик;

- ✓ зависимость характеристик от температуры;
- ✓ быстрое старение;
- ✓ необходимость охлаждения для некоторых типов фоторезисторов.

Фоторезисторы находят применение, когда не требуется прецизионных измерений, а делается оценка уровня принимаемого потока.

## 9.2 Фотодиоды

Известно, что по разные стороны от перехода полупроводника  $p$  - типа к полупроводнику  $n$  - типа образуется обедненный слой с недостатком свободных носителей заряда и состояние равновесия поддерживается электрическим полем, и, благодаря наличию поля между двумя типами полупроводникового материала, устанавливается потенциальный барьер. В отсутствие приложенного внешнего напряжения ток через переход равен нулю, поскольку ток основных носителей (дырки в полупроводнике  $p$  - типа и электроны в  $n$  - типа) компенсируют ток неосновных носителей (электроны в  $p$  - типа полупроводнике и дырки в  $n$  - типа). При приложении обратного напряжения к диоду ширина обедненной зоны увеличивается, и обратный ток определяется током неосновных носителей. Когда фотодиод подвергается воздействию светового потока, образуются пары электрон - дырка. Чтобы эти носители внесли вклад в протекающий ток, они должны быть быстро разнесены электрическим полем. Это возможно только в обедненном слое, и падающее излучение должно достичь его без заметного ослабления. Таким образом, необходимо, чтобы верхний слой полупроводника был очень тонким, а обедненный слой – толстым, для максимального поглощения излучения.

Два режима работы фотодиодов используются на практике – фотодиодный и фотогальванический.

При фотодиодном режиме принципиальная схема содержит источник ЭДС, напряжение которого приложено к фотодиоду в обратном направлении, и резистор, на клеммах которого получается выходной сигнал.

Темновой ток имеет порядок наноампер и соответствует очень слабому

световому потоку (от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  Вт), однако он быстро возрастает при росте температуры.

Чувствительность очень высокая, поскольку в случае излучения определенного спектрального состава фототок с очень высокой точностью пропорционален падающему потоку в диапазоне 5-6 порядков. Характер спектральной чувствительности для каждого фотодиода паспортизируется.

Быстродействие фотодиода определяется временем нарастания и временем спада. Время нарастания фототока составляет несколько пикосекунд, а время спада зависит от схемы включения и составляет наносекунды.

При фотогальваническом режиме работы фотодиод не имеет, какого либо, внешнего источника питания. В этом случае он работает как преобразователь энергии, и эквивалентен генератору, с выходными характеристиками: напряжение холостого хода и ток короткого замыкания. Выходные характеристики определяются свойствами материала датчика. Коэффициент полезного действия таких генераторов составляет 12-15 %.

### **9.3 Фототранзистор**

Фототранзистор – полупроводниковый элемент которого, представляющий базу, может быть освещен. Электрически к базе подключиться нельзя и внешнее напряжение обычно подключается между коллектором и эмиттером. Фототранзистор можно рассматривать как фотодиод, соединенный с транзистором. Он может использоваться в двух режимах: либо как коммутатор, либо в линейном режиме. В режиме коммутации информация носит дискретный характер: присутствует ли излучение, или точнее, превосходит ли освещение определенный порог. В зависимости от этого фототранзистор блокирует или пропускает ток, управляя логической схемой или реле.

Фототранзистор в линейном режиме находит применение:

✓ для измерения постоянной освещенности, когда на базе фототранзистора можно построить простой люксметр;

✓ для приема модулированных сигналов в виде  $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_1(t)$  и ток коллектора в этом случае будет равен  $I(t) = I_c(\Phi_0) + S \Phi_1(t)$ .

#### 9.4 Фотоэмиссионные датчики

В датчиках этого типа преобразование оптического сигнала в электрический сигнал, происходит в результате фотоэмиссии, или внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект состоит в освобождении из твердого тела (фотокатода) электронов, число которых пропорционально падающему потоку. Первичные электроны, эмитируемые фотокатодом, образуют ток катода, который затем собирается анодом, либо этот ток служит источником дальнейшего процесса умножения электронов за счет ударной ионизации молекул газа или за счет вторичной эмиссии.

В явлении внешнего фотоэффекта имеются три стадии:

- ✓ освобождение электрона поглощенным фотоном внутри материала;
- ✓ перемещение освобожденного электрона к поверхности;
- ✓ эмиссия электрона к поверхности.

В случае полупроводника с собственной проводимостью для освобождения электронов требуется, чтобы энергия падающего фотона была не меньше ширины запрещенной зоны, однако, этой энергии не достаточно для обеспечения выхода электрона из твердого тела. Эмиссия электрона с поверхности становится возможной, если он способен преодолеть потенциальный барьер, отделяющий полупроводник от внешнего пространства, высота которого равна энергии электронного сродства. Среднее число эмитируемых электронов (квантовый выход) находится от 10 до 30%. Величина квантового выхода и спектральный диапазон работы фотокатода определяется материалом на основе тройных соединений  $A_3B_5$  и щелочных металлов.

Существуют вакуумный и газонаполненный фотоэлементы.

В вакуумном фотоэлементе фотокатод и анод помещают внутрь баллона с прозрачным окном, а внутри баллона поддерживается глубокий вакуум.

На зависимости анодного тока от напряжения анод-катод имеются две

области:

- ✓ область пространственного заряда, где ток быстро возрастает с увеличением напряжения;
- ✓ область насыщения, где все носители заряда, эмитируемые катодом, собираются анодом. Ток анода в этой области зависит только от падающего потока.

Основные метрологические характеристики:

- ✓ темновой ток имеет порядок  $10^{-8} - 10^{-13}$  А;
- ✓ чувствительность - линейная и составляет от 10 до 100 мА/Вт;
- ✓ быстродействие определяется быстродействием схем, поскольку время пролета электронов менее  $10^{-9}$  с.

Главным достоинством вакуумных фотоэлементов является – возможность выбирать тип фотокатода, согласовав его со спектральной областью, линейность и слабая зависимость от температуры, поэтому они особенно подходят для фотометрии. Кроме того, возможность обеспечить весьма большие выходные токи в максимуме позволяет принимать и измерять мощные импульсы светового потока, например, от импульсных ламп или лазеров.

Газонаполненные фотоэлементы устроены также, как и вакуумные, однако, баллон наполнен разреженным газом (обычно аргоном) при небольшом давлении ( $10^{-1} - 10^{-2}$  мм. рт. ст.). При достаточно большом анодном напряжении электроны, эмитируемые фотокатодом, инициируют процессы ударной ионизации газа и достигается эффект умножения тока фотоэмиссии с коэффициентом умножения 5-10. Поэтому чувствительность этих фотоэлементов на эту же величину выше, чем у вакуумных. Однако, из-за нелинейности, посредственной стабильности и плохой частотной характеристики фотоэлементы этого типа стараются не применять, заменяя их на фототранзисторы.

## 9.5 Фотоэлектронные умножители

Высокоэнергетические электроны, бомбардируя поверхность твердого тела, могут, в свою очередь, выбить электроны из поверхности. Это явление называется вторичной электронной эмиссией. Когда число эмитируемых поверхностью электронов превосходит число упавших, возможно усиление сигнала. Первичные электроны обычно фокусируются электрическим полем на первый из последовательно расположенных электродов – динодов. Потенциалы к последовательно расположенным динодам возрастают, и число вторичных электронов последовательно увеличивается. Если в фотоумножителе число динодов от 5 до 15, коэффициент вторичной эмиссии от 5 до 10, и эффективность сбора и переноса электронов превышает 90%, то коэффициент усиления составляет от  $10^6$  до  $10^8$ . Величина высокого напряжения, которое подается на фотоумножитель заключена между 700 и 3000 В. Темновой ток является функцией усиления, величины приложенного высокого напряжения и его распределения между различными динодами, а также тока, зависящего от температуры катода. Эффективный способ снижения темнового тока – охлаждение фотоумножителя. Снижение температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$  уменьшает темновой ток до 100 раз. Чувствительность фотоумножителей достигает величины от  $10^3$  до  $10^7$  А/Вт и является самой высокой для оптических датчиков. Быстродействие фотоумножителей определяется временем пролета электронов от фотокатода к динодам и аноду. Обычно оно составляет от 10 до 100 нс.

Преимущества фотоумножителей прежде всего связаны с их высокой чувствительностью, минимальным шумом и высоким быстродействием. Это очень важно для обнаружения оптических сигналов очень малого уровня в таких областях, как спектрофотометрия, лазерная телеметрия, оптическая локация.

К существенным недостаткам следует отнести значительные габариты, хрупкость, необходимость питания высоким напряжением и высокая стоимость.

## **ГЛАВА 10 ТЕПЛОВЫЕ ПРИЁМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ДАТЧИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА, ЛАЗЕРНЫЕ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ**

### **10.1 Тепловые приемники излучения**

В рассмотренных выше оптических датчиках преобразование оптического сигнала в электрический сигнал осуществляется за счет фотоэлектрического эффекта под действием света. Энергия фотонов передается освобождаемым электронам.

В случае теплового приемника излучения первичным процессом является преобразование энергии поглощенного света в энергию теплового возбуждения решетки, которое вызывает повышение температуры приемника, приводящее к изменению его электрических свойств. Поглощению теплового излучения содействует чернение поверхности приемника излучения соответствующим покрытием (например, платиновой чернью). Поглощение теплового потока для такого покрытия происходит довольно в широком длинноволновом спектре от 0,8 микрон до 1 миллиметра. Эти характерные свойства определяют специфические области применения приемников.

Наиболее часто используются болометры – тепловые, неселективные приемники излучения, основанные на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента из металла или полупроводника при его нагревании вследствие поглощения измеряемого потока излучения.

Болометры используются для измерения суммарной мощности излучения, а в сочетании со спектральным прибором – для определения спектрального состава излучения. При использовании эффективных фильтров болометр может использоваться как селективный приемник.

Чувствительный элемент, металлический или полупроводниковый, имеет форму ленты, тонкой пластины или пленки, поверхность которой зачернена.

Болометры включают по мостовой схеме, в два плеча которой включены два одинаковых термочувствительных элемента: один – рабочий, а другой –

компенсационный для устранения влияния температуры окружающей среды на балансировку моста. Относительное изменение сопротивления чувствительного элемента болометра  $\Delta R/R$  при изменении его температуры на величину  $\Delta T$  описывается приближенным равенством:

$$\Delta R/R = \beta \Delta T, \quad (10.1)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент сопротивления, для большинства металлов  $\beta = T^{-1}$ , для полупроводников  $\beta = -3 \times 10^3 T^{-2}$ .

Как приемник оптического излучения характеризуется чувствительностью, порогом чувствительности или пороговым потоком – минимальным потоком, при котором сигнал близок или равен шумам болометра и постоянной времени, характеризующей время установления стационарного режима.

Металлические болометры, работающие при собственном  $R = 5 \div 50$  Ом, имеют чувствительность  $5 \div 10$  В/Вт, пороговый поток  $10^{-10} \div 10^{-9}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и постоянную времени  $2 \cdot 10^{-1}$  с.

Типичные параметры полупроводниковых болометров:

- ✓ собственное  $R = 1 \div 10$  МОм;
- ✓ чувствительность  $50 \div 5000$  В/Вт;
- ✓ пороговый поток  $10^{-11} \div 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>;
- ✓ постоянная времени  $0,1 \div 5$  мс.

## 10.2 Датчики изображения

Датчики изображения выдают электрические сигналы, в которых содержится преобразованная, представляющая интерес информация об оригинальном изображении. Эти электрические сигналы поступают в различные электронные устройства обработки и используются для восстановления изображения на экране электроннолучевой трубки. С другой стороны, датчики изображения применяются в научных исследованиях и в промышленности для обследования технологических установок и неблагоприятной окружающей среды, бесконтактной метрологии и т.д.



Основной принцип работы. Датчик состоит из большого числа связанных между собой элементарных оптических датчиков и на их совокупную чувствительную поверхность проектируется изображение. Каждый оптический датчик выдает электрический сигнал пропорционально освещенности спроецированной на фоточувствительный элемент этого датчика. Таким образом, получается пространственная выборка изображения: каждый ФЧЭ элементарного оптического датчика соответствует элементарному участку изображаемой картины. Каждый элементарный датчик необходимо опросить один за другим в строго определенной последовательности, чтобы можно было по полученным сигналам восстановить исходную картину. Порядок, в котором осуществляется такой опрос, определяется видом анализа – развертки изображения. Наиболее часто изображение анализируют осуществляя развертку построчно – строка за строкой сверху вниз. Датчики изображения используются таким образом, что в результате фотоэффекта в каждом ФЧЭ происходит накопление заряда, пропорционального освещенности ФЧЭ и времени накопления – константе, т.е. временному промежутку, разделяющему два последовательных опроса информации с каждого ФЧЭ

Существуют два типа датчиков изображения – вакуумные трубки и твердотельные датчики.

Устройство и принцип действия видиконов заключается в следующем. Торцевая часть стеклянной трубки (диаметром от 15 до 40 мм) такого датчика изображения покрыта с внутренней стороны тонкой прозрачной металлической пленкой; на этот прозрачный слой через резистор подается напряжение величиной несколько десятков вольт.

На металлическую пленку нанесен слой полупроводника толщиной  $1 \div 2$  мкм. Оптическое изображение проецируется через металлическую пленку на полупроводниковый слой. Анализ изображения производится построчно сканированием электронного луча по внутренней поверхности полупроводника. Электроны, выходящие из катода (с потенциалом массы), сообщают этот потенциал внутренней поверхности полупроводника. Таким образом,

непосредственно после прохождения пучка электронов устанавливается разность потенциалов, между противоположными сторонами объемного полупроводникового элемента. На освещенных участках изображения в результате фотоэлектрического эффекта каждую секунду освобождается число электронно - дырочных пар, пропорционально освещенности. Перемещение этих зарядов под действием поля за время между двумя последовательными прохождениями электронного пучка локально уменьшает первоначально установившуюся разность потенциалов между двумя поверхностями полупроводника и это уменьшение тем сильнее, чем выше освещенность рассматриваемого участка. В результате описанного процесса на внутренней поверхности полупроводника образуется потенциальный рельеф, и это распределение зарядов является электростатическим отображением оптического изображения. Возвращаясь к каждому элементу, электронный луч устанавливает нулевой потенциал полупроводниковой поверхности, принося заряд, необходимый для нейтрализации существующего на данном элементе фотоэлектрического заряда. Это вызывает протекание в сигнальном резисторе  $R_s$  тока  $I_s$  и этот ток тем больше, чем в большей степени уменьшилась разность потенциалов между двумя поверхностями элемента за время, прошедшее между двумя последовательными опросами электронным лучом, т.е. чем больше освещенность рассматриваемого элемента. Напряжение  $R_s I_s$  и есть сигнал изображения или видеосигнал.

Принцип работы твердотельного датчика изображения аналогичен.

В едином кремниевом кристалле располагается ряд элементов, необходимых для фотоэлектрического преобразования и анализа изображения, а именно:

- ✓ фотоэлементы или элементарные датчики, организованные в линейки или матрицы, и каждый элементарный датчик запасает электрический заряд, пропорциональный освещенности ФЧЭ и продолжительности его экспозиции;
- ✓ аналоговые регистры, позволяющие осуществлять индивидуальное

хранение зарядов, генерируемых каждым фотоэлементом, и передачу их в порядке, необходимом для анализа изображения;

- ✓ преобразователь заряд – напряжение, выдающий сигнал в схему последующей обработки.

Устройство элементарного датчика следующее. На подложке, например,  $p$  - типа, поверхность которой покрыта изолирующим слоем  $\text{SiO}_2$ , нанесен прозрачный электрод. На этом электроде поддерживается положительный потенциал достаточный для того, чтобы отталкивать основные носители – дырки. В результате этого, под электродом образуется обедненная зона. Свет, прошедший через прозрачный электрод, вызывает в подложке образование электронно - дырочных пар. Электроны притягиваются к электроду, накапливаясь на границе раздела полупроводник – диэлектрик. Число носителей заряда, накопленных таким образом под фотоемкостным элементом, пропорционально освещенности и продолжительности экспозиции. Набор таких элементов позволяет построить датчики - линейки в которых  $N$  фотоэлементов вытянуты в одну строку ( $N$  может составлять 256, 1024, 1728, 2048) или двумерные датчики, объединяющие  $M \times N$  элементов расположенных в  $M$  строк ( $M=244, 488$ ), причем каждая строка содержит  $N$  фотоэлементов ( $N = 190, 380$ ).

Метрологические характеристики датчиков изображения существенно шире оптических датчиков.

К основным метрологическим характеристикам относятся:

- ✓ экспозиция – это произведение освещенности на время, разделяющее два последовательных акта считывания фотоэлектрических зарядов;

- ✓ экспозиция насыщения – минимальная экспозиция, при которой достигается насыщение сигнала на выходе;

- ✓ темновой сигнал – выходной сигнал в темноте, обусловленный зарядами, накапливаемыми в каждом элементарном датчике в результате теплового возбуждения за время экспозиции;

- ✓ область спектральной чувствительности – диапазон длин волн, внутри которого при одинаковой экспозиции выходной сигнал составляет не менее 10% от своего максимального значения;
- ✓ чувствительность – это частное от деления выходного сигнала на экспозицию для заданного спектрального состава излучения;
- ✓ неравномерность чувствительности – разность между выходными сигналами наиболее и наименее чувствительного ФЧЭ при равномерной освещенности;
- ✓ пространственное разрешение – оно определяется для твердотельных датчиков числом элементарных датчиков (элементов разложения) на строку и колонку для матричных датчиков разложения;
- ✓ ослепление – фотоэлектрические заряды в сильно освещенной зоне могут диффундировать в соседние ФЧЭ, приводя к искажениям.

### **10.3 Волоконная оптика**

Волоконная оптика находит применение для:

- ✓ передачи информации, преобразованной в оптические сигналы;
- ✓ наблюдение и или измерение оптическими средствами в труднодоступных зонах или неблагоприятной окружающей среде;
- ✓ использование в качестве датчиков;

Рассмотрим строение и свойства оптического волокна.

В наиболее простой форме волокно состоит из:

- а) сердцевины с показателем преломления  $n_1$  и радиусом  $a$ , величина которого может составлять от нескольких мкм до нескольких десятков мкм,
- б) оболочки с показателем преломления  $n_2$  немного меньшим чем  $n_1$  и толщиной порядка 50 мкм.

Для изготовления волокна используются двуокись кремния и полимеры.

Ослабление излучения при прохождении по волокну меняется от типа стекла и наименьшее для чистого кварца.

На поверхности, разделяющей две среды с показателями преломления  $n_1$

и  $n_2$ , углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  между световым лучом и нормалью подчиняются закону синусов Декарта:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (10.2)$$

при  $n_1 > n_2$  переход из среды 1 в среду 2 становится невозможным, начиная с момента, когда

$$\theta_1 > \arcsin (n_2 / n_1) = \theta_0 \quad (10.3)$$

и, следовательно, происходит полное внутреннее отражение.

В случае оптического волокна световой луч распространяется в сердцевине волокна за счет последовательного отражения.

Максимальный угол, под которым можно вводить в волокно световой луч (апертурный угол  $\Gamma$ ), в пределах которого может происходить распространение света в волокне, определяется выражением:

$$\Gamma = \arcsin (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}. \quad (10.4)$$

Так для случая  $n_1 = 1,51$  и  $n_2 = 1,50$  апертурный угол равен  $10^\circ$ .

Рассмотрим возможность использования волоконной оптики для измерений.

Пусть источник испускает излучение, которое в определенных случаях может быть импульсным, чтобы обеспечить его выделение на фоне окружающего света. Это излучение подводится к зоне измерений. Измеряемой величиной может быть, например, положение отражающего или поглощающего излучения объект, смещение, измеряемое счетом интерференционных полос, скорость вращения, химический состав среды, температура.

Излучение в зоне измерения подвергается преобразованию, в зависимости от измеряемой величины и это может быть:

- ✓ изменение интенсивности в случае измерения положения объекта или его прозрачности;
- ✓ модуляция, полная или частичная, с частотой пропорциональной измеряемой скорости вращения;
- ✓ изменение длины волны в случае измерения температуры.

Отраженное, пропущенное или переизлученное излучение объекта

воспринимается волокном, обеспечивающим возврат излучения к приемнику.

Приемник выдает электрический сигнал, содержащий информацию, относящуюся к измеряемой величине.

#### 10.4 Лазерные и волоконно-оптические гироскопы

*Лазерный гироскоп* представляет собой конструкцию, кольцевой лазер у которой является чувствительным элементом, генерирующий две встречные волны. Принцип работы лазерного гироскопа основан на зависимости собственных частот кольцевого оптического резонатора для встречных волн от скорости его вращения относительно инерциальной системы отсчёта.

Лазерный гироскоп состоит из активной среды, зеркала, зеркал смесителя встречных волн, невзаимного элемента, фотодатчика, системы стабилизации параметров лазера, система обработки информации, блока питания.

Резонатор у кольцевых лазеров, как правило, состоит из трёх или четырёх отражателей, жёстко зафиксированных на основании для обеспечения замкнутой траектории для встречных волн. Из-за зависимости времени обхода светом вращающегося контура от скорости вращения и направления обхода возникает разность частот встречных волн. В соответствии с общей теорией относительности для разности времён обхода вращающегося контура и в рамках классической кинематики:

$$\tau = \tau_0 \cdot (4S\Omega / cL) \cdot \cos v, \quad (10.5)$$

где  $\tau$  – разность времён обхода вращающегося контура,

$\tau_0$  – время обхода неподвижного контура,

$S, L$  – площадь и оптический периметр контура с учётом показателя преломления,

$\Omega$  – угловая скорость вращения (в рад/с),

$v$  – угол между осью вращения и нормалью к плоскости контура.

Достоинства:

- ✓ цифровой выход информации;
- ✓ возможность использования в движущихся объектах;

✓ большой диапазон угловой скорости вращения, малая чувствительность к перегрузкам и малое время запуска.

*Волоконно-оптический гироскоп* измеряет углы поворота и угловую скорость объекта, в основе работы такого гироскопа положен вихревой (вращательный) эффект Саньяка.

Работа волоконно-оптического гироскопа базируется на одномодовых диэлектрических световодах с малым затуханием.

Достоинства:

✓ малые габариты и масса, отсутствие механически вращающихся элементов;

✓ высокая чувствительность менее 0,1 град/ч;

✓ энергоэффективность;

✓ большой диапазон измеряемых угловых скоростей (от 1град/ч до 300 град/ч);

✓ малое время запуска.

## ГЛАВА 11. ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ

### 11.1 Общие сведения о датчиках деформации

Знание механических напряжений, которые возникают в конструкциях при определенных условиях эксплуатации, является главным условием обеспечения надежности ее функционирования. Напряжения в материале вызывают его деформацию. Поэтому измерение деформации позволяет вычислить вызывающие их напряжения.

Дадим основные определения.

Деформация  $\varepsilon$  - это отношение приращения  $\Delta l$  к первоначальному значению этого размера  $l$ ,  $\varepsilon = \Delta l/l$ .

Упругая деформация – деформация, которая исчезает после устранения силы ее вызывающей.

Напряжение  $\delta$  – сила на единицу площади сечения,  $\delta = F/s$ .

Предел упругости – максимальное напряжение, не вызывающее остаточной деформации, большей 0,2 %. Порядок величины предела упругости (в Н /мм<sup>2</sup>) для стали - 200 ÷ 800, для свинца – 5 ÷ 10.

### 11.2 Закон Гука

В области упругости деформации пропорциональны напряжениям.

Модуль Юнга  $\gamma$  определяет деформацию в направлении действия силы

$$\varepsilon = (l/\gamma) (F/s) \quad (11.1)$$

Порядок величин модуля Юнга (в кН/мм<sup>2</sup>) для стали 180 ÷ 290, для свинца 5 ÷ 18.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  определяет деформацию, перпендикулярную направлению действия силы:

$$\varepsilon = -\nu \varepsilon \quad (11.2)$$

В области упругости  $\nu$  обычно близок к 0,3.

В качестве датчиков деформации наиболее часто используются



резисторные датчики, которые приклеиваются на образец и деформируются вместе с ним.

При этом малые размеры датчика (от 1 мм до 1 см) обеспечивают весьма точные измерения. Резисторные датчики являются пассивными, так как они преобразуют в изменение сопротивления их собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика.

Деформации, измеряемые с погрешностью до 0,1%, лежат в области примерно от  $10^{-5}$  до  $2 \cdot 10^{-1}$ . Нижний предел измерений определяется шумами датчика и связанной с ним электрической схемы. Верхний предел зависит от упругости датчика и фиксирующего его клея.

Используются датчики металлические и полупроводниковые.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками с удельным сопротивлением  $\rho$ , площадью поперечного сечения нити  $s$  и длиной  $n l$ , где  $l$  – длина одного нитевидного элемента,  $n$  – их количество, для металлических датчиков  $n$  обычно составляет от 10 до 20, и равно 1 для полупроводниковых.

Датчик закрепляется на изолирующей подложке – бумаге или пластике, который наклеивается на исследуемый образец.

Сопротивление датчика определяется выражением  $R = \rho n l / s$ ; под действием деформации сопротивление датчика изменяется на  $\Delta R$ :

$$\Delta R / R = \Delta l / l - \Delta s / s + \Delta \rho / \rho. \quad (11.3)$$

Продольная деформация нити приводит к изменению поперечных размеров сторон  $a$  и  $b$  в случае прямоугольного сечения. Поперечная деформация пропорциональна продольной деформации:

$$\Delta a / a = - \nu (\Delta l / l). \quad (11.4)$$

Металлические и полупроводниковые датчики различаются как выражениями для изменения удельного сопротивления, так и его величиной. Для металлических датчиков используется формула Бриджмена, после преобразования которой получаем:

$$\Delta R / R = \{ (1 + 2 \nu) + C (1 - 2 \nu) \} (\Delta l / l) = K (\Delta l / l), \quad (11.5)$$

где  $K$  – коэффициент преобразования датчика и выражается формулой

$$K = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu), \quad (11.6)$$

где  $C$  – константа Бриджмена,

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Учитывая, что  $\nu = 0,3$  и  $C = 1$  получаем, что коэффициент преобразования для металлических датчиков приблизительно равен 2.

Для полупроводниковых датчиков изменение сопротивления можно записать в виде:

$$\Delta R/R = \{(1 + 2\nu) + \eta Y\}(\Delta l/l), \quad (11.7)$$

$$K = 1 + 2\nu + \eta Y, \quad (11.8)$$

где  $\eta$  – коэффициент пьезорезистивности, зависящий от направления кристаллографической ориентации полосок и от типа и концентрации примеси;

$Y$  – модуль Юнга.

Коэффициент преобразования для полупроводниковых датчиков достигает абсолютных значений от 100 до 200.

Полупроводниковые датчики предназначены, главным образом, для измерения малых деформаций, но по сравнению с металлическими, они обычно не линейны и более чувствительны к температуре.

Основные характеристики металлических датчиков.

Для изготовления металлических датчиков обычно используют сплавы на основе никеля. Для проволочных датчиков используется проволока диаметром 20 мкм, толщина подложки 30 мкм для пластика и 100 мкм для бумаги. Датчики из фольги изготавливаются по технологии печатных плат и применением фотолитографии, что позволяет сократить размеры датчика и обеспечить более точные измерения.

Сопротивление. Удельное сопротивление материала должно быть достаточно высоким, чтобы требуемые значения сопротивления (от 100 до 5000 Ом) достигались на достаточно короткой нити и без существенного уменьшения ее поперечного сечения. Чрезмерная длина приводит к завышению размера датчика; меньшей толщине нити соответствует более слабый

измеряемый ток; и то и другое уменьшает чувствительность.

Коэффициент преобразования датчика, как указывали ранее, близок, к 2, за исключением сплавов платина – вольфрам, для которого он равен 4,1.

Следует учитывать влияние температуры на сопротивление установленного датчика.

Три причины вызывают температурное изменение сопротивление установленного датчика:

1 Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от температуры  $T$

$$\rho(T) = \rho_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\}, \quad (11.9)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления для разных материалов находящийся в пределах  $(2 - 15) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

2 Зависимость размеров проволоки от температуры

$$l = l_0 \{1 + \lambda (T - T_0)\}, \quad (11.10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент линейного расширения материала датчика, имеющий значения для разных материалов в пределах  $(0,7 \div 2,5) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

3 Температурное расширение образца, на котором наклеен датчик.

Таким образом, при оценке деформации необходимо учитывать влияние температуры.

Полупроводниковые датчики в зависимости от способа их изготовления бывают диффузионные и вырезанные.

Вырезанные датчики образуются полоской, вырезанной механически или фотохимически из монокристалла легированного кремния. Длина такой полоски от 0,1мм до нескольких мм, а толщина – 0,01мм. Полоска наклеивается на пластиковую подложку.

Диффузионные датчики изготавливаются путем диффузии в полупроводниковый кремний примеси противоположного типа проводимости. На образованный диод подается запирающее напряжение для того чтобы изолировать датчик от подложки (область p - типа должна находиться под отрицательным потенциалом относительно n- области). Вся эта структура покрывается защитным слоем двуокиси кремния, сквозь который

осуществляется контакт проводящего элемента датчика с металлическими выводами. Такой способ производства позволяет путем одновременной диффузии четырех одинаковых проводящих слоев на одной и той же подложке получить после их соединения металлизацией полный мост Уитстона. Эта технология обеспечивает превосходный механический и тепловой контакт между образцом и установленным на нем датчиком. Равенство коэффициентов линейного расширения подложки и проводящего элемента датчика позволяет избежать эффектов разностного расширения. Кроме того, образец, являясь монокристаллом, обладает совершенной упругостью и не подвержен гистерезису.

Основным фактором, влияющим на характеристики полупроводниковых датчиков является количество введенной примеси, поскольку удельное сопротивление для полупроводника  $n$  – типа определяется в виде:

$$\rho = 1/q \mu_n N_d, \quad (11.11)$$

где  $q$  – абсолютное значение заряда электрона или дырки,

$\mu_n$  – подвижность электронов,

$N_d$  – концентрация донорной примеси.

Аналогично вышесказанному, удельное сопротивление зависит для полупроводника  $p$  - типа.

Обычно с возрастанием количества примеси коэффициент преобразования датчика уменьшается, так при концентрации носителей  $n$ -типа  $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  коэффициент преобразования равен 175, а при концентрации  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , однако, улучшается его линейность и уменьшается термочувствительность.

При использовании датчиков деформации необходимо учитывать, что многократное повторение противоположных по знаку деформаций приводит к медленному, но прогрессирующему возрастанию собственного сопротивления датчика, которое проявляется в уходе нуля моста от точки первоначального равновесия, который обусловлен искривлением решетки, а также появлением дислокаций и микротрещин.

Под пределом усталости понимают как число циклов деформации заданной амплитуды, которые приводят к изменению сопротивления, эквивалентного деформации  $10^{-4}$ . В зависимости от типа материала число циклов колеблется от  $10^4$  до  $10^8$ .

Датчик деформации можно использовать как индикатор усталости, задача которого состоит не в измерении деформации, а в накоплении и запоминании совокупности испытанных деформаций. Начальное сопротивление датчика обычно равно 100 Ом. Оно непрерывно увеличивается в зависимости от амплитуды и числа испытанных деформаций до значения 107 Ом, которое рассматривается как предельное. Если установлено соответствие между усталостью датчика и усталостью испытываемого образца, то можно оценить степень повреждения последнего.

Методы измерения. Сопротивление датчиков и их изменения измеряют с использованием моста Уитстона и потенциометрической схемы.

Наибольшие трудности связаны с учетом влияния температуры и нелинейности датчиков.

Существующие шесть схем датчиков в мосте Уитстона можно разделить на три группы, в каждой из которых полумост строится следующим образом:

- ✓ группа 1, рабочий датчик  $R_c$  и постоянное балластное сопротивление  $R_0$ ;
- ✓ группа 2, рабочий датчик  $R_c$  и эталонный (термокомпенсирующий) датчик  $R_{c0}$
- ✓ группа 3, два рабочих датчика  $R_c (+)$  и  $R_c (-)$ , сопротивления которых меняются в противоположных направлениях. Это достигается использованием двух однотипных датчиков, испытывающих деформацию разных знаков, или двух полупроводниковых датчиков (один p - типа, другой n- типа), испытывающих деформацию одного знака.

Для каждой группы возможны две схемы в зависимости от того, сформирован ли полумост из балластного сопротивления  $R_0$ , или оба полумоста симметричны.

### 11.3 Экстензометр с вибрирующей струной

Этот тип измерителя деформации использует в качестве чувствительного элемента стальную струну, натянутую между двумя зажимами, закрепленными в конструкции, деформации которой изучаются. Принцип работы этого типа датчиков заключается в изменении частоты колебаний струны  $N$  в зависимости от деформации. Этот датчик может надежно функционировать при неблагоприятных окружающих условиях (высокая влажность, радиоактивность).

Частота  $N$  может быть выражена в функции деформации  $\Delta/l$  в виде:

$$N = \frac{Y}{2l} \times \frac{\Delta l}{d \times l}, \quad (11.12)$$

где  $d$  – плотность материала струны,

$Y$  – модуль Юнга.

Зная первоначальную частоту, и, измеряя частоту колебания струны, в процессе изменений, можно определить деформацию конструкции. Процедура измерения заключается в следующем. Стальная струна колеблется с частотой  $N$  перед сигнальной катушкой, вызывая периодические колебания магнитного сопротивления ее магнитного контура, что порождает электрический сигнал той же частоты  $N$ . Этот сигнал передается на катушку возбуждения, которая поддерживает вибрацию. Частота может измеряться с помощью частотомера.

## ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

### 12.1 Общие сведения

Электрохимический датчик используется для химических исследований. Он представляет собой проводник электрического тока, который помещается в исследуемую среду и при этом устанавливается перенос зарядов между присутствующими в среде заряженными частицами и датчиком. Результирующая разность свободных энергий на границе раздела фиксируется датчиком и передается в измерительную систему в виде электрического сигнала – тока или напряжения. Селективность рассматриваемых датчиков зависит от их природы. Так датчики электронной проводимости, изготовленные из химически стойких материалов (платины, графита и т.д.) чувствительны к химическим процессам, протекающим с участием электронов, т.е. ко всем окислительно - восстановительным процессам. Датчики ионной проводимости проявляют чувствительность к частицам, которые присоединяют ионы или служат источником ионов, проявляющих подвижность в материале, из которого состоит чувствительный элемент.

В соответствии с принципами, на которых основано функционирование электрохимических датчиков их можно разделить на три основные группы: потенциметрические, амперометрические и кондуктометрические.

Потенциметрические датчики. Их работа основана на определении разности потенциалов, которая устанавливается между измерительным электродом и электродом сравнения (электродом с постоянным и воспроизводимым потенциалом не зависящим от среды, в которую он помещается). Эта разность потенциалов определяется активностью ионов электролита, в которой погружен датчик. Этот режим работы называют потенциметрией при нулевом токе, если в измерительной цепи ток не возникает. В противном случае, говорят о потенциметрии при наличии тока.

Амперометрические датчики. Их функционирование связано с прохождением электрического тока в измерительной цепи. При этом между

двумя электродами создается разность потенциалов (обычно используют металлический электрод и электрод сравнения). Концентрация исследуемых частиц пропорциональна силе тока, возникающей в электродной цепи.

Кондуктометрические датчики. Измерение либо силы тока при известном приложении напряжения, либо напряжения при известной силе приложенного тока позволяет определить сопротивление или проводимость исследуемой среды. Для таких измерений используют датчик с двумя электродами из химически стойкого материала, на которые подается напряжение или переменный ток. Использование переменного тока позволяет уменьшить ошибки, обусловленные поляризацией, вызывающей электродные реакции.

## 12.2 Потенциометрические датчики

Работа датчиков основана на измерении разности потенциалов между двумя погруженными в раствор электродами. Потенциал электрода зависит от концентрации присутствующих в растворе ионов, определение потенциалов электрода позволяет оценить концентрацию частиц (ионометрия) или проследить за изменением этой концентрации в ходе химической реакции (потенциометрическое титрование).

Соответственно различают: электроды для определения окислительно - восстановительных потенциалов; электроды для измерения  $pH$ ; ион - селективные электроды.

Для электродов первого типа потенциал зависит от окислительно - восстановительных реакций протекающих в растворе и сопровождающихся обменом электронов: Окислитель +  $n e^{-1} \rightarrow \leftarrow^{-2}$  Восстановитель.

Вещество, присоединяющее электроны в направлении (1), играет роль окислителя и восстанавливается. Вещество, которое отдает электроны в направлении (2), играет роль восстановителя и окисляется. Электроны могут поступать из проводника в раствор, являющийся окислителем, или из раствора в проводник. Обмен электронами, между электродом и веществом в растворе, означает, что идет электрохимическая реакция, в которой, через определенный



промежуток времени, устанавливается равновесие между прямой и обратной реакциями. С этого момента изменение состава раствора вблизи электрода более не происходит, и проводник приобретает равновесный потенциал  $E$ .

Величина равновесного потенциала определяется из уравнения Нерста в виде:

$$E = E_0 + \frac{2,3RT}{n \times F} \times \lg \frac{(\text{окислит.})}{(\text{восстанов.})}, \quad (12.1)$$

где  $F$  – постоянная Фарадея (96493 Кл);

$R$  – универсальная газовая постоянная;

(окислит.) и (восстанов.) – активности окисленной и восстановленной форм.

Член  $2,3 RT/nF$  называется коэффициентом Нернста и определяет электродный потенциал. Этот коэффициент, величина которого изменяется в зависимости от температуры, составляет 59,16 мВ при 25 С. Потенциал электрода нельзя измерить непосредственно, а можно определить только разность потенциалов между двумя электродами. Поэтому измеряют разность потенциалов между металлическим (индикаторным) электродом и электродом сравнения, потенциал которого постоянен и принимается за точку отсчета. Наиболее часто в качестве электрода сравнения используется *каломельный электрод*, который состоит из стеклянного корпуса заполненного насыщенным раствором хлорида калия. Нижний конец стеклянного корпуса закрыт диафрагмой из пористого керамического материала, которая обеспечивает непосредственный контакт с исследуемым раствором, создавая, таким образом, электрическую цепь. В стеклянном корпусе размещается собственно элемент сравнения, который состоит из ртути, находящийся в контакте с хлоридом ртути:  $Hg/Hg_2Cl_2/\text{насыщенный раствор } KCl$ . Равновесие каломельного электрода определяется реакцией:  $2 Hg + 2 Cl \leftrightarrow Hg_2Cl_2 + 2e$ . Его потенциал, составляющий  $E = E_0 - 0,058 \lg [Cl]$  для насыщенного раствора хлорида калия составляет 244,5 мВ при 25 С по сравнению с нормальным водородным электродом.

## ГЛАВА 13. ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

### 13.1 Общие положения.

Под влажностью воздуха подразумевается содержание водяных паров в воздухе.

Абсолютная влажность  $a$  – количество водяного пара в граммах содержащихся в одном кубическом метре воздуха ( $\text{г}/\text{м}^3$ ).

Упругость водяного пара  $e$ - находящегося в воздухе или парциальное давление, выражается в миллибарах или мм. рт. ст. Абсолютная влажность и упругость водяного пара воздуха связаны выражением

$$a=217 e/T \quad \text{или} \quad a=0,8e/1+\alpha t, \quad (13.1)$$

где  $T$  и  $t$  – температура водяного пара ( воздуха ) в К и  $^{\circ}\text{C}$  соответственно,  
 $\alpha$  - температурный коэффициент объемного расширения пара.

Относительная влажность воздуха  $f$  – отношение упругости водяного пара, содержащегося в воздухе , к упругости водяного пара насыщающего пространство при температуре  $t$  – выраженное в процентах:

$$f=e 100\% / E, \quad (13.2)$$

где  $E$  – максимально возможная упругость пара при данной температуре.

Точка росы  $t$  – температура, при которой водяной пар, находящийся в воздухе достигает насыщения при неизменном давлении, т. е.  $e=E$

Гигрометры можно разделить на две группы:

а) гигрометры, основанные на физическом законе, позволяющем непосредственно определять влажность, это – конденсационные гигрометры, психрометры, электролитические и сорбционные гигрометры;

б) гигрометры, принцип действия которых основан на измерении свойств тела, связанных с влажностью, например, импедансные гигрометры.

Перед выбором типа гигрометра важно выделить параметр, который хотят измерить. Точку росы целесообразно определять с помощью конденсационных, сорбционных и электролитических гигрометров, относительную влажность – с помощью гигрометров на основе изменения

сопротивления и емкости (импедансные гигрометры), а температуру влажного термометра – психрометрами.

### **13.2 Конденсационные гигрометры**

Тело, температуру которого в любой момент времени можно измерить, постепенно охлаждают до появления росы или инея на его поверхности. Затем процесс стабилизируют таким образом, чтобы между воздухом и каплями точки росы поддерживалось равновесное состояние. Измеряемая температура представляет собой точку росы.

Основными элементами гигрометра являются: зеркало, система регулирования его температуры, датчик для измерения температуры зеркала, источник светового пучка и оптический детектор.

Источник света освещает металлическое зеркало таким образом, чтобы в отсутствие конденсата свет на детектор не попадал. Затем производится охлаждение зеркала вплоть до появления конденсата. При появлении слоя росы рассеянный свет попадает на детектор, который дает команду на подогрев зеркала и, таким образом, достигается равновесие и получение конденсата определенной толщины. Датчик температуры, прикрепленный к обратной стороне зеркала, позволяет измерить его температуру.

Метрологические характеристики:

- ✓ рабочий диапазон – от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ;
- ✓ точность измерения –  $0,5^{\circ}\text{C}$ ;
- ✓ время запаздывания – несколько минут и определяется диапазоном измерений;
- ✓ способность работать в коррозионной среде.

### **13.3 Сорбционные датчики**

Измерение влажности с помощью гигрометров данного типа основано на двух явлениях:

-давление пара над насыщенным раствором солей ниже давления пара

над чистой водой при той же температуре;

-электропроводность кристаллической соли ниже электропроводности раствора этой же соли на три – четыре порядка.

Кроме того, кристаллическая соль должна обладать высокой гидрофильностью, т.е. хорошей адсорбцией водяного пара.

Принцип действия сорбционного гигрометра состоит в нагревании насыщенного солевого раствора до тех пор, пока в растворе не установится давление пара, равное давлению пара в окружающей среде. Зная эту температуру можно определить давление пара и, следовательно, точку росы по предварительно снятым зависимостям.

Датчик состоит из трубки обернутой тканью, которая предварительно пропитана раствором хлорида лития. На трубу намотаны два электрода изготовленные из коррозионно-стойкого металла. На электроды подается переменное напряжение, создающее в растворе ток, который нагревает его и вызывает испарение воды. После испарения воды ток, проходящий между электродами, резко уменьшается, поскольку проводимость кристаллического хлорида лития значительно ниже проводимости раствора и, соответственно, снижается температура датчика. Затем хлорид лития, гидрофобильность которого очень высока, адсорбирует влагу из объекта измерения, что приводит к увеличению силы тока и увеличению температуры и, таким образом, достигается равновесие при температуре непосредственно связанной с давлением пара и, следовательно, с точкой росы.

Метрологические характеристики:

- ✓ диапазон измерения точки росы - от  $-40$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ ;
- ✓ точность измерения  $-2^{\circ}\text{C}$ ;
- ✓ воспроизводимость – высокая.

Электролитический (кулонометрический) гигрометр позволяет определить очень низкое содержание пара в воздухе. Чувствительный элемент состоит из трубки длиной 10 см, в которой размещены скрученные в спираль электроды из платины со слоем фосфорного ангидрида ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) между ними.

Исследуемый газ циркулирует в измерительной трубке, а содержащийся в нем водяной пар поглощается фосфорным ангидридом, который при этом превращается в фосфорную кислоту. Между электродами создается постоянное напряжение около 70 В, вызывающее электролиз воды с выделением кислорода и водорода, и регенерацию фосфорного ангидрида. Количество электричества, в соответствии с законом Фарадея, является мерой количества разложенной воды, следовательно, и количества извлеченного из воздуха водяного пара. Если процесс поглощения и электролиз стационарен, то мерой влажности является сила тока электролиза, которую можно записать как:

$$I = \frac{96500}{9 \times 10^{-3}} \times \alpha C Q, \quad (13.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент захвата молекул воды слоем фосфорного ангидрида,  
 $C$  – концентрация водяного пара в воздухе,  
 $Q$  – расход воздуха циркулирующего в датчике.

Данные гигрометры целесообразно использовать для измерения в газах с точкой росы до  $-70^{\circ}\text{C}$ . Исследуемыми газами могут быть азот, водород, метан, двуокись углерода.

Датчики влажности воздуха. Наиболее распространенными датчиками измерения влажности являются психрометры и волосные гигрометры.

Работа психрометрических датчиков основана на зависимости интенсивности испарения с водной поверхности от дефицита влажности соприкасающегося с ней воздуха. Для измерения влажности этот метод практически реализует косвенным определением интенсивности испарения путем измерения понижения температуры тела, с поверхности которого происходит испарение, за счет затраты тепла тела на испарение воды.

Масса воды  $M$ , испаряющаяся с поверхности площадью  $S$  за отрезок времени  $t$ , определяется формулой Дальтона:

$$M = \frac{C \times S (E - e)}{P} \times t \quad (13.4)$$

Расход тепла  $Q$  на испарение массы воды  $M$  будет равен

$$Q = M L = \frac{C \times S(E - e)}{P} \times t L, \quad (13.5)$$

где  $L$  – теплота парообразования воды.

Как только температура поверхности тела (воды) понизится относительно окружающего воздуха, благодаря теплообмену из воздуха к телу через охлажденную поверхность начнет поступать тепло  $Q$ , которое определяется формулой:

$$Q = B \times S \times (T_e - T_m) \times t \quad (13.6)$$

где  $B$  – коэффициент внешнего теплообмена;

$T_e$  и  $T_m$  – соответственно температура воздуха и охлажденного тела;

$S$  – площадь поверхности, через которую осуществляется теплообмен;

$t$  – отрезок времени.

При установившемся процессе расход тепла на испарение будет равен притоку тепла из воздуха:

$$Q_u = Q_e \quad (13.7)$$

Следовательно, будем иметь:

$$\frac{C \times S(E - e)}{P} \times t L = B \times S \times (T_e - T_m) \times t \quad (13.8)$$

Решая это уравнение относительно  $e$ , и, полагая, что  $S = S$ , получаем:

$$e = E - A (T_e - T_m) \times p \quad (13.9)$$

Данное выражение называют психрометрической формулой, а коэффициент:

$$A = B/c \quad (13.10)$$

Психрометрический коэффициент зависит от скорости движения воздуха испаряющегося с поверхности, однако при скорости более 2 м/с эта зависимость становится слабой.

Приборы, принцип работы которых основан на указанном методе, называются психрометрами и содержат два термометра. Одним из них измеряют температуру тела  $T_m$ , с поверхности которого происходит испарение, а другим – температуру окружающего воздуха  $T_e$ .

Психрометры, содержащие аспирационное устройство, обеспечивающее

протяжку воздуха с постоянной скоростью 2 м/с называются аспирационными. Психрометрический коэффициент для этого вида психрометров  $A = 0,00662$ , а формула для вычисления влажности по аспирационному психрометру имеет вид:

$$e = E - 0,00662Ap(T_g - T_m). \quad (13.11)$$

На практике влажность вычисляют по специальным психрометрическим таблицам.

Волосные гигрометры широко используются для определения влажности в помещениях. Принцип его работы основан на способности человеческого волоса изменять свою длину, при изменении влажности окружающей среды. Удлинение волоса при изменении относительной влажности от 0 до 100% составляет 2,5%. Волосы для гигрометра подвергаются специальной химической и механической обработке. Широкое применение нашли волосные гигрометры барабанного типа с фиксацией влажности на ленте.

Гигрометры на основе измерения импеданса имеют чувствительный элемент, состоящий из гигроскопического вещества, у которого происходит изменение какого – либо электрического параметра (сопротивления или емкости) при изменении влажности.

Содержание воды в гигроскопических веществах зависит от относительной влажности воздуха, в равновесии с которым они находятся. Импедансные гигрометры можно разделить на три группы:

- ✓ резистивные гигрометры;
- ✓ емкостные гигрометры на основе полимерных диэлектриков;
- ✓ емкостные гигрометры на основе диэлектрического оксида алюминия.

Конструктивно резистивный гигрометр выполнен следующим образом. Определенное количество гигроскопического вещества наносится на подложку небольших размеров. На эту же подложку наносится два металлических контакта из коррозионно-стойкого металла. Сопротивление между этими двумя электродами зависит от температуры и содержания воды. Интервал изменения

сопротивления может охватывать диапазон от менее 1 Ом до 80 МОм.

Датчики этого вида позволяют измерять относительную влажность в диапазоне от 5 ÷ 10% до 95% при температуре от –10 до 60<sup>0</sup> С.

Постоянная времени составляет около 14 секунд. Паспортная точность – 5%.

Принцип действия емкостного гигрометра основан на поглощении слоем полимерного диэлектрика толщиной несколько микрон молекул воды из окружающего воздуха, что приводит к изменению диэлектрической постоянной слоя и соответственно изменению емкости конденсатора, в котором используется этот диэлектрик.

Изменение емкости в зависимости от относительной влажности достаточно хорошо описывается линейным законом, а коэффициент пропорциональности слабо зависит от температуры. Технология изготовления включает осаждение полимера на первый танталовый электрод, а затем нанесение на полимер тонкого толщиной от 100 до 1000Å слоя хрома путем вакуумного напыления. Этот слой вызывает появление трещин в диэлектрическом слое и обеспечивается контакт с измеряемой средой.

Метрологические характеристики: диапазон измерений влажности – от 0 до 100 % для температур от -40<sup>0</sup> С до + 100<sup>0</sup> С; постоянная времени – 1 ÷ 2 сек; точность измерения -3%.

Емкостной гигрометр, на основе оксида алюминия, устроен аналогичным образом. Используемый диэлектрик представляет собой слой оксида алюминия нанесенный посредством анодного осаждения на алюминиевую пластинку, представляющую собой первый электрод. В качестве другого электрода служит слой металла, нанесенный на диэлектрик (медь, золото, серебро, платина).

Исследования показали, что при толщине оксида менее 0,3 мкм изменение импеданса этого конденсатора зависит только от парциального давления водяного пара и не зависит от температуры. Это позволяет измерять абсолютную влажность и определять точку росы причем в широком интервале температур ( от –80 до + 70<sup>0</sup> С )



## ГЛАВА 14. ДАТЧИКИ ГАЗОВОГО СОСТАВА

### 14.1 Общие сведения

Датчики, предназначенные для определения химического состава газовой смеси, получили широкое распространение, связанное с контролем загрязнения окружающей атмосферы. Большинство датчиков предназначено для анализа газового состава горючих смесей или продуктов сгорания:  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO_x$ ,  $CH_x$  и т.д.

Для определения границы между понятиями датчики и анализаторы газа используются три критерия:

- ✓ возможность оперативного использования в непрерывном режиме для контроля газовой среды либо определения ее физических параметров;
- ✓ отсутствие необходимости в использовании химических реагентов;
- ✓ невмешательство оператора в каждое измерение (для отбора проб, поверки, и т.д.).

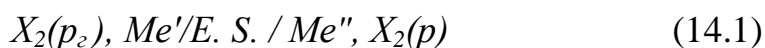
Возможна следующая классификация датчиков газового состава:

- ✓ электрохимические датчики на основе твердых электролитов;
- ✓ электрические датчики;
- ✓ катарометры;
- ✓ парамагнитные датчики;
- ✓ оптические датчики.

Анализаторы, которые не рассматриваются как датчики газового состава – это масс-спектрометры, приборы ядерного магнитного резонанса и анализаторы на основе хемолюминесценции (ионизация газа под действием высокоэнергетического ультрафиолетового излучения).

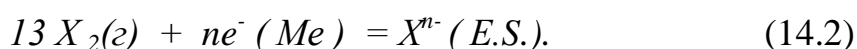
### 14.2 Датчик на основе твердых электролитов

Физический принцип работы датчика на основе твердых электролитов можно представить в виде концентрационного элемента:



Здесь  $Me'$  и  $Me''$  – два электронные проводника (химически инертные и одинаковой природы), контакты которые с твердым электролитом ( $E.S.$ ) образуют электроды; электролит  $E.S.$  – вещество, физически непроницаемое для газов и являющееся ионным проводником, содержащим ионы  $X^{n-}$ ;  $X_2$  – анализируемый газ (который может находиться в чистом виде, растворенным в газовой смеси, либо в равновесии с химической средой образованной газами, жидкостями или твердыми веществами);  $p$  и  $p_2$  – парциальное давление этого газа по обе стороны электролита.

На каждом электроде происходит реакция типа



В идеальном случае этот элемент создает разность потенциалов или ЭДС  $E$  между проводниками  $Me'$  и  $Me''$ , подчиняющуюся закону Нернста:

$$E = (RT/2nF) \ln (p/p_2), \quad (14.3)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R= 8,31 \text{ Дж} \times \text{моль}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ );

$F$  – постоянная Фарадея (96500 Кл);

$n$  – число электронов участвующих в реакции;

$T$  – абсолютная температура элемента.

Подставляя в выражение значение постоянных величин, получаем

$$E = 0,9926 \times 10^{-4} (T/n) \lg (p/p_2). \quad (14.4)$$

Зная температуру  $T$  и парциальное давление  $p_2$  вблизи электрода сравнения, можно найти неизвестное парциальное давление газа  $p$  из измерения величины  $E$ , составляющей обычно от нескольких десятков до сотен милливольт.

Наиболее широко эта методика применима для измерения парциального давления кислорода и определения термодинамических величин и активности кислорода, растворенного в металлах.

Основные требования к составляющим датчика:

- ✓ твердый электролит должен иметь сопротивление до 1 Мом;
- ✓ электронная проводимость электролита минимальная;
- ✓ электролит должен обладать химической инертностью по

отношению к исследуемым газам, иметь физико-химическую стабильность и совместимость с другими частями датчика.

Систему сравнения выбирают из условия малочувствительности к возможным отклонениям в процессе измерений и используют в качестве электрода сравнения газовые смеси (кислород, воздух и т. д.) или системы металл/металлическое соединение (Ni/NiO, Fe/FeO).

Измерительный электрод должен быть химически стойким к электролиту, обладать высокой электронной проводимостью и обладать каталитическими свойствами по отношению к электродной реакции и для этих целей используют электроды из платины и серебра.

Метрологические характеристики данных датчиков:

- ✓ выходное напряжение – несколько сотен милливольт;
- ✓ ЭДС датчика пропорциональна логарифму давления анализируемого газа и линейно зависит от температуры;
- ✓ постоянная времени – зависит от парциального давления и составляет от нескольких секунд до минуты.

Конструктивно потенциометрический датчик газового состава выполнен следующим образом. Оксидные твердые электролиты на основе диоксида циркония (15 %  $ZrO_2/CaO$ ) обычно изготавливают в виде трубок, внутри которых циркулирует анализируемый газ. Газом сравнения служит окружающий воздух. Электроды состоят из двух металлических колец с нанесенным на них путем осаждения слоем платины или серебра. Температуру измерительного электрода определяют с помощью термопары ЭДС датчика измеряют с помощью платиновых нитей, соединенных с электродами с внутренней и внешней стороны трубки.

Кислородные датчики подобного типа широко используются для:

- ✓ контроля состава смеси в двигателях внутреннего сгорания;
- ✓ контроля сгорания продуктов в горения в котельных;
- ✓ контроль газового состава при термообработке в металлургии;
- ✓ контроль загрязнения воздуха в помещениях;

✓ контроль состава газов используемых для хранения продуктов питания.

Электрические датчики. Принцип действия датчика основан на изменении электропроводности полупроводниковой пленки вследствие адсорбции газа на ее поверхности. Датчики на основе пленок оксида титана  $TiO_2$ , используют для контроля работы двигателей внутреннего сгорания, датчики на основе двуокиси олова  $SnO_2$  для определения содержания следующих газов:  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $NO_x$ .

Конструктивно датчик выполнен следующим образом. Тонкий слой оксида олова наносится на трубчатую подложку из оксида алюминия. Две золотые нити, связанные с двумя металлическими кольцами, прикрепленными к трубке подложки, служат для вывода тока. Резистивный нагреватель, помещенный внутри трубки, обеспечивает нагрев датчика до его рабочей температуры –  $350\text{ }^{\circ}C$ .

Адсорбция газа на поверхности полупроводникового оксида создает поверхностный заряд, вызывающий изменение плотности носителей заряда, соответствующее изменение поверхностной электропроводности.

- ✓ Главное достоинство таких датчиков – низкая себестоимость.
- ✓ Порог чувствительности составляет  $10^{-4}\%$ .
- ✓ Постоянная времени – от секунд до нескольких минут.
- ✓ Основной недостаток – нестабильность во времени и зависимость от окружающей температуры, влажности.

### 14.3 Кварцевый пьезоэлектрический датчик

Принцип действия кварцевого датчика основан на изменении частоты колебаний кварцевого кристалла, когда какая – либо частица адсорбируется на его поверхности. Селективность датчика обеспечивается путем осаждения соответствующего покрытия на две грани кристалла. Изменение частоты колебаний  $\Delta F$  подчиняется соотношению

$$\Delta F = K C, \quad (14.5)$$

где  $C$  – концентрация анализируемого вещества;

$K$  – постоянная, характерная для кристалла.

Устройство содержит низкочастотный генератор колебаний и частотомер.

Используются данные датчики для определения содержания влаги, анализа углеводородов, определения пестицидов и газов, таких как  $SO_2$ ,  $NO$ ,  $HCl$ ,  $NH_3$ .

Основная трудность состоит в выборе покрытия, которое должно селективно адсорбировать анализируемое вещество и проявлять хорошую стабильность.

#### 14.4 Катарометры

Как видно из таблицы 14.1. удельные теплопроводности газов существенно различаются, однако зависимость теплопроводности бинарных смесей от их состава часто имеет линейный характер. Метод количественного определения состава с помощью катарометров заключается в сопоставлении теплопроводности анализируемых смесей с соответствующими значениями для газа сравнения.

Таблица 12. Удельные теплопроводности газов

Газ	$H_2$	He	$CH_4$	$O_2$	$N_2$	CO	$NH_3$	$CO_2$
Удельная теплопроводность, $\lambda$ , $10^{-5}$ Дж/см $\times$ с $\times$ К	174	142	30	24,7	24,3	23,4	21,8	14,2

Датчик представляет собой трубку с термостатируемыми стенками, через которую пропускают анализируемый газ. Внутри трубки помещена нить (Pt, W). Если к концам этой нити приложить постоянное напряжение, то ее температура будет зависеть от теплоты, выделяемой в результате эффекта Джоуля и теплоты рассеиваемой путем излучения, конвекции и теплопроводности. Условия подбирают таким образом, чтобы потери за счет теплопроводности газа были наибольшими. Таким образом, температура нити и ее сопротивление зависят от состава газа.

Конструктивно катарометр выполнен следующим образом. В мост Уитстона включаются два одинаковых датчика М и N. В начальный момент в

рабочих объемах циркулирует один и тот же газ сравнения, и мост находится в состоянии равновесия. Если в рабочий объем датчика N ввести смесь газ сравнения и исследуемый газ, то сопротивление нити уменьшится и это изменение можно измерить.

Основные преимущества катарометров:

- ✓ сравнительно не высокая стоимость прибора;
- ✓ простота использования;
- ✓ достаточно высокая точность метода (0,5- 2 % в зависимости от модели датчика и анализируемого газа).

Основными недостатками катарометров являются:

- ✓ Низкая селективность – можно анализировать только бинарные смеси, составляющие которых известны;
- ✓ необходимость газа сравнения;
- ✓ возможность протекания химических реакций между газами, контактирующими с нитью накала и ее возможная коррозия.

#### 14.5 Парамагнитные датчики

На газ, помещенный в поле с градиентом магнитной индукции  $B$ , действует сила, параллельная полю, направление и величина которой зависит от магнитной восприимчивости газа  $\chi$ :

$$\chi = \frac{dF}{2\mu} dV \nabla B^2, \quad (14.5)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость в вакууме;

$dV$  – элементарный объем.

Для некоторых газов магнитная восприимчивость значительна ( $O_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ) и положительна, т.е. такие газы парамагнитные.

Другой особенностью парамагнитных газов является изменение их магнитной восприимчивости с температурой. Для определения кислорода существуют два типа датчиков – магнитодинамические и датчики на основе термомагнитной конвекции.

Первый тип датчиков конструктивно выполнен следующим образом. В стальной камере, через которую проходит анализируемый газ, полюсами треугольного сечения создается неоднородное магнитное поле. Гантель, состоящая из двух кварцевых оболочек диаметром 2 мм, заполненная азотом, подвешивается на кварцевой нити с зеркалом. Каждая сфера находится в зазоре магнита. Если исследуемый газ содержит кислород, то он притягивается в направлении более сильного магнитного поля, что приводит к смещению сфер, поворачивающихся вокруг нити подвеса до тех пор, пока действующая сила не уравновесится крутящимся моментом. Отраженный зеркалом луч света отмечает угловое положение вращающегося приспособления. Содержание кислорода непосредственно считывается с градуировочной шкалы, на которую попадает световое пятно.

Основные достоинства данного датчика:

- ✓ высокая стабильность нуля и шкалы концентраций;
- ✓ может быть изготовлен в портативном варианте;
- ✓ отсутствие нити накала;

Недостатки:

- ✓ Низкая чувствительность – концентрация должна превышать  $10^{-4}$  об. %
- ✓ Довольно большая постоянная времени – до 1 мин.

Принцип работы датчиков на основе термомагнитной конвекции основан на следующем: при нагревании анализируемого газа, помещенного в магнитное поле, магнитная восприимчивость нагретого кислорода снижается, и он захватывается потоком холодного кислорода который в свою очередь нагревается и происходит образование магнитного ветра.

Конструктивно датчик выполнен следующим образом. Анализируемый газ пропускается снизу вверх через расположенное вертикально кольцо. Небольшая трубка, располагаемая точно по горизонтали, соединяет два полукольца. Две платиновые нити накала, включенные в мост Уитстона, навиваются на трубку. По обе стороны одного из этих сопротивлений

помещают полюсы постоянного магнита. Мост уравнивается при пропускании через ячейку инертного газа. Если анализируемый газ содержит кислород, то последний притягивается магнитным полем в центральной трубке и нагревается, а его магнитная восприимчивость снижается, и он замещается более холодным газом, устанавливается магнитный ветер. Газовый поток в разной степени охлаждает нити накала и выводит мост из равновесия. Этот разбаланс моста зависит от концентрации кислорода.

Основные достоинства датчика – отсутствие постоянного источника помех со стороны диамагнитных газов (водорода, азота, окиси и двуокиси углерода, метана).



## ГЛАВА 15. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

Дозиметр – устройство для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения, полученной прибором за некоторый промежуток времени.

Радиоактивность – неустойчивость ядер некоторых атомов, проявляющаяся в их способности к самопроизвольным превращениям (распаду), сопровождающимся испусканием ионизирующего излучения или радиацией.

Радиация, или ионизирующее излучение – это частицы и гамма-кванты, энергия которых достаточно велика, чтобы при воздействии на вещество создавать ионы разных знаков.

Различают несколько видов радиации:

- ✓ Альфа-частицы – относительно тяжелые, положительно заряженные частицы, представляющие собой ядра гелия.
- ✓ Бета-частицы – это просто электроны.
- ✓ Гамма-излучение имеет ту же электромагнитную природу, что и видимый свет, однако обладает гораздо большей проникающей способностью.
- ✓ Нейтроны – электрически нейтральные частицы, возникают главным образом непосредственно вблизи работающего атомного реактора.
- ✓ Рентгеновское излучение подобно гамма-излучению, но имеет меньшую энергию.

Бытовой дозиметр предназначен для установления радиационной обстановки и представляют собой средства индикации. Дозиметры делятся на несколько основных групп: индикатор-сигнализатор, индикатор-измеритель, аппараты, комбинирующие эти функции, а также существуют дозиметры, которые измеряют еще ряд параметров, встроенные в какую либо бытовую технику. Обычно уровень радиации измеряют в мкЗв/ч и мкР/ч, например мощность дозы до 0,6 мкЗв/ч соответствует 60 мкР/ч.

Дозиметр основан на датчике ионизирующей радиации – счетчике

Гейгера. Счетчик Гейгера разработан в 1908 г., представляет собой вакуумный баллон с двумя электродами, в который введена газовая смесь, состоящая из легкоионизируемых неона и аргона с небольшой добавкой галогена – хлора или брома. К электродам прикладывают высокое напряжение, которое не вызывает каких-либо разрядных явлений пока в газовой среде не возникнет центр ионизации – след из ионов и электронов, от ионизирующей частицей. Первичные электроны, ускоряются в электрическом поле и ионизируют другие молекулы газовой среды, порождая новые электроны и ионы, данный процесс развивается лавинообразно до образования в межэлектродном пространстве электронно-ионного облака, резко увеличивающего проводимость, в счетчике Гейгера возникает разряд. Обратные процессы восстановления среды происходят под действием галогена, который способствует рекомбинации зарядов.

## Список литературы

1. Приборы и датчики экологического контроля: учебное методическое пособие для специальностей 020801 (013100) "Экология" 280101 "Безопасность жизнедеятельности в техносфере" / Г. В. Смирнов – Томск: ТУСУР, 2007. – 127 с.
2. Назаров В.Н., Карабегов М.А., Мамедов Р.К. Основы метрологии и технического регулирования. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 110 с.
3. Мониторинг и методы контроля окружающей среды: учебное пособие: В 2 ч. / Ред. Ю. А. Афанасьев, Ред. С. А. Фомин. – М.: МНЭПУ. – 2001.
4. Смирнов Г.В., Смирнов С.В. Физические методы исследования объектов окружающей среды: Учебное пособие.- Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2000. – 167с.
5. Смирнов Г.В. Физические методы исследования объектов окружающей среды: Учебное методическое пособие.- Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2001. – 107с.
6. Иванова Г.М. и др. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов / Г.М.Иванов, И.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232с.
7. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55-61.
8. Грибанов Ю.И. Измерения и приборы в радиолюбительской практике, М., «Энергия», 1999. – 192с.
9. Авдоченко Б., Вилисов А., Пушкарев В., Тепляков К., Юрченко В. Источник мощных оптических импульсов на диодах инфракрасного диапазона длин волн // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – Т. 3. – № 5. – С. 53-55.
10. Официальный сайт Научно-технического предприятия «ТКА». Электронный ресурс: <http://www.tkaspb.ru/main/index.php?productID=31>
11. Петров Б.М. Электромагнитные поля во вращающихся

интерферометрах и гироскопах. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 208 с.

12. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. - Москва: Техносфера, 2012. – 624 с.

13. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196с.

14. Виноградов Ю.А. Радиолобителю конструктору: Си Би связь, дозиметрия, ИК техника, электронные приборы, средства связи / М.:«ДМК». – 2006. – 240 с.

15. Кутьков В.А. Величины в радиационной защите и безопасности // АНРИ. – 2007. – №3. – С.2-25.

Приложение А. – Диапазоны электромагнитных волн.

	Наименование диапазона	Длина волны	Частота	Назначение
	Слышимый	> 100 км	20 Гц – 20 кГц	Акустика
Радиоволны $10^3 - 10^{14}$	Мириаметровые (сверхдлинные)	100 – 10 км	3 – 30 кГц	Радионавигация
	Километровые (длинные волны)	100 – 1 км	30 – 300 кГц	Радиовещание
	Гектометровые (средние волны)	1000 – 100 м	0,3 – 3 МГц	Радиовещание
	Декаметровые (короткие волны)	100 – 10 м	3 – 30 МГц	Радиовещание, мобильная радиосвязь, любительская радиосвязь (диапазон 27 МГц)
	Метровые (ультракороткие волны)	10 – 1 м	30 – 300 МГц	УКВ ЧМ вещание, телевизионное вещание, мобильная радиосвязь, самолётная радиосвязь (ФМ вещание 88 – 108 МГц)
	Дециметровые (L, S диапазоны)	1 – 0,1 м	0,3 – 3 ГГц	Телевизионное вещание, космическая радиосвязь и радионавигация, сотовая радиосвязь, радионавигация
	Миллиметровые	10 – 1 мм	30 – 300 ГГц	Космическая радиосвязь, радиолокация, радиоастрономия
ИК – излучен $10^3 - 10^5$ ГГц 300 мкм – 750 нм	Сверхдальняя зона	34 – 15 мкм		Тепловизоры, приборы ночного видения
	Дальняя зона	15 – 6 мкм		Охранные системы
	Средняя зона	6 – 3 мкм		ИК обогреватели
	Ближняя зона	3 – 0,76 мкм		Приборы ночного видения, оптическая связь
Видимый свет (750 – 380 нм, $10^{13} - 10^{15}$ ГГц)	Красный	620 – 760 нм		
	Оранжевый	590 – 620 нм		
	Жёлтый	560 – 590 нм		
	Зелёный	500 – 560 нм		
	Голубой	470 – 500 нм		
	Синий	430 – 470 нм		
	Фиолетовый	380 – 430 нм		
излучен ие (380 нм – 10 нм, $7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ Гц)	Ближний (длинноволновый)	400 – 300 нм		Обеззараживание, технологические процессы
	Средний (средневолновый)	300 – 200 нм		
	Дальний (коротковолновый)	200 – 122 нм		
	Экстремальный	121 – 10 нм		
	Рентгеновское излучение	10 нм – 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ Гц – $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
	Гамма излучение	менее 5 пм	более $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад.